

---

## Aproveitamento do resíduo de rochas ornamentais com adição de CuO e SiC para aplicação em superfície seletiva de coletor solar

### Use of ornamental rock residue with the addition of CuO and SiC for application on selective surface of a solar collector

---

#### **Geraldo Magela de Andrade**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5418-4140>

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais / Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: [geraldom40@gmail.com](mailto:geraldom40@gmail.com)

#### **Daniel Araújo de Macedo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0466-1458>

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais / Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: [damaced@gmail.com](mailto:damaced@gmail.com)

#### **Kelly Cristiane Gomes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0255-8740>

Departamento de Engenharia de Energias Renováveis / Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Email: [gomes@cear.ufpb.br](mailto:gomes@cear.ufpb.br)

#### **Rafael Alexandre Raimundo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9943-9464>

Departamento de Física Teórica e Experimental / Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Email: [rafael.alexandre19@hotmail.com](mailto:rafael.alexandre19@hotmail.com)

---

#### **RESUMO**

Geração de energia elétrica no Brasil é menor do que o consumo, daí a importância das pesquisas sobre energias alternativas e renováveis. A radiação do Sol pode ser transformada em energia solar fotovoltaica e em energia térmica. O objetivo deste estudo é a produção de superfície seletiva para coletor solar utilizando resíduo de rochas ornamentais, com a adição de óxido de cobre e carbeto de silício, submetidos às análises de DRX, DSC, TGA e FTIR. A partir dos pós coletados, procedeu-se a caracterização com ensaios de granulometria, estequiometria e formulação dos compósitos, misturados com adesivo araldite A + B, dando origem a uma pasta que foi aplicada por deposição pelo método *screen printing* no substrato de aço inoxidável AISI 304; após ensaios de perfilometria, UV-Vis e microdureza obteve-se filmes finos preto, sinterizados a 200°C, que após análises de perfilometria, microdureza e UV-Vis os resultados apresentaram boa aderência, dureza média, baixa rugosidade, absorvância alta no espectro ultravioleta próximo e média no UV-Vis. Concluindo que o material é promissor para aplicação em superfície seletiva.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável; Coletor solar; Energia solar térmica; Superfície seletiva.

---

## ABSTRACT

Electricity generation in Brazil is lower than consumption, hence the importance of research into alternative and renewable energy. The Sun's radiation can be transformed into photovoltaic solar energy and thermal energy. The objective of this study is the production of a selective surface for a solar collector using ornamental rock residue, with the addition of copper oxide and silicon carbide, subjected to XRD, DSC, TGA and FTIR analyses. From the collected powders, characterization was carried out with granulometry, stoichiometry and formulation tests of the composites, mixed with araldite A + B adhesive, giving rise to a paste that was applied by deposition using the screen printing method on the 304 AISI stainless steel substrate; After profilometry, UV-Vis and microhardness tests, black thin films were obtained, sintered at 200°C, and after profilometry, microhardness and UV-Vis analyses, the results showed good adhesion, medium hardness, low roughness, high absorptance in the near ultraviolet spectrum and average in UV-Vis. Concluding that the material is promising for application on selective surfaces.

**Keywords:** Stainless steel; Solar collector; Solar thermal energy; Selective surface.

---

## INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia elétrica no Brasil tem trazido preocupações tendo em vista que a capacidade de geração de energia com matriz, na maioria de fonte hidrelétrica, é menor do que às necessidades dos consumos residencial, comercial e industrial, este déficit obrigou o Governo Federal a construir usinas termelétricas que funcionam por calor obtido da queima de carvão, óleo combustível e gás natural. Para complementar a geração de energia nos períodos de seca e/ou baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

A composição da matriz elétrica brasileira, com a participação das fontes na capacidade instalada: Hidroelétrica 58%; Eólica 12,6%; Solar 3,9%; Biomassa 8,8%; Não renovável 15,7% e nuclear 1,1%. (EPE 2023, ano base 2022, p.15).

O uso de aquecedor de água elétrico, chuveiro elétrico, torneira elétrica e aquecedor a gás é uma prática comum em grande parte das unidades habitacionais e nas indústrias, no entanto esta demanda de água quente, especialmente nas habitações populares é mais raro, tendo em vista o alto custo da energia elétrica distribuída pelas concessionárias o que inviabiliza, por exemplo, a sua plena utilização pela população de baixa renda. Podendo atender outros potenciais utilizadores: comércio e indústria.

O aproveitamento da radiação solar varia em função do tipo de aplicação, pode ser aplicado em condutividade fototérmica e fotovoltaica, para a conversão em energia térmica, energia elétrica, energia cinética e energia química.

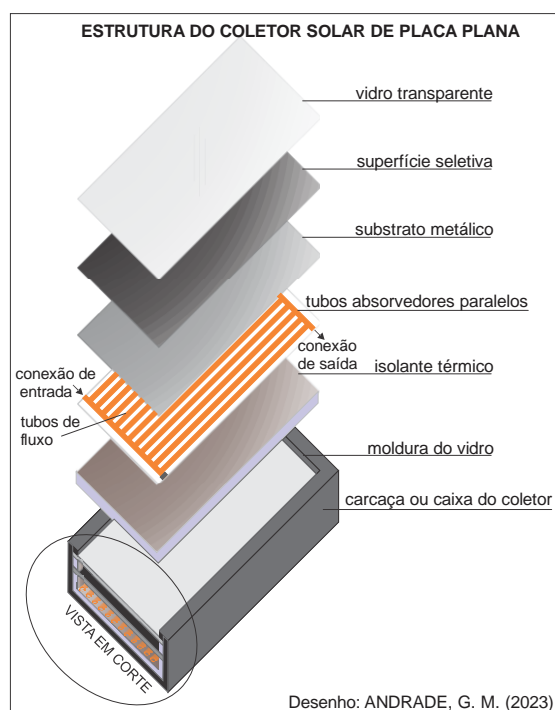
“A energia solar é, literalmente toda a energia irradiada pelo Sol, seja em sua forma de luz visível ou não.” (VIAN *et al.*, 2021, p.70).

Estima-se que a Terra recebe 174 petawatts (PW) de radiação solar (insolação) na zona superior da atmosfera. (PINHO *et al.* 2014, p.76).

Este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de aplicação de resíduo de rochas ornamentais graníticas com adição de óxido de cobre – CuO e carbeto de silício –SiC, para aplicação em superfície seletiva sobre um substrato de aço inoxidável AISI 304, instalado em coletor solar de placa plana, Figura 1, que atinge temperaturas de 35°C a 100°C.

Os coletores solares consistem numa das formas de aproveitamento da energia solar térmica, sendo, basicamente, constituídos por superfícies seletivas e substratos metálicos absorvedores de calor que captam essa energia térmica para promover o aquecimento de um fluido.

**Figura 1** – Estrutura do coletor solar de placa plana



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

Em estudo comparativo entre coletores energético e exergético de coletores solares de ar de convecção forçada, feito com grãos de pós de pedras, (ABUSKA *et al.*, 2019), projetaram novos coletores solares de ar que permaneçam aquecidos em tempo nublado e após o pôr do Sol, avaliando em termos de energia e exergia se os pós de

pedras são apropriados para uso como material para armazenamento de energia térmica. Os resultados, segundo os autores, foi que os materiais são promissores para a conservação de calor 4 a 5 horas após o pôr do Sol e apresentaram eficiência exergética de até 7% no horário de Sol pleno.

Os coletores solares permitem diversas aplicações, por exemplo, aproveitamento da radiação solar para aplicações térmicas em aquecedor de ar para coleta de ar quente. (GOEL *et al.* (2021, p.112-147)

A radiação pode ser incidente, aquela que vem direto do Sol para a superfície terrestre conhecida como radiação ultravioleta e radiação emergente, conhecida como radiação infravermelha, aquela que vai da superfície para a atmosfera. Estima-se que do total da radiação ultravioleta, 45% são absorvidas pelas superfícies da Terra e dos mares, 5% são refletidas para a atmosfera, 25% são absorvidos pelas nuvens e outros 25% refletidos pelas nuvens. (PEREIRA *et al.* 2017. P.17).

“Os sistemas de energia solar são considerados um dos substitutos mais eficazes e eficientes dos combustíveis fósseis tradicionais, pois permitem a conversão direta da energia solar em calor e energia elétrica sem quaisquer efeitos negativos no ambiente (...)” (DAS *et al.* (2021).

O granito é uma rocha ígnea intrusiva que se cristaliza a partir de magma félsico, com mais de 65% de sílica. Composto, principalmente, por quartzo, feldspato, plagioclásio sódico-cálcico e mica(biotita). (REED e MONROE, 2017, p. 86-90).

A norma da ABNT, NBR 15.844/2015, especifica que o peso específico do granito é  $\geq 2.550 \text{ kg/m}^3$ , no entanto, de acordo com (ALENCAR, 2013, p.79-205), sua variação de peso se dá de acordo com a tonalidade variando do mais claro  $2550 \text{ Kg/m}^3$  ao mais escuro, podendo atingir até  $3.109 \text{ kg/m}^3$ .

O filme fino aplicado no substrato metálico vai compor um revestimento denominado de superfície seletiva.

“A superfície seletiva é geralmente composta por um filme fino aplicado sobre um substrato condutor térmico, podendo ser procedido por uma camada antioxidante e sucedido por uma camada antirreflexiva, em contato direto com o ambiente.” (DUTRA, 2022, p.25).

Os substratos metálicos mais comuns contidos nos coletores solares comerciais são de alumínio e cobre. Neste estudo propomos o substrato de aço inoxidável AISI 304, como mais uma alternativa.

Para aplicações em energia solar térmica, uma superfície seletiva deve ter alta absorvância à radiação solar na região do espectro visível e baixa emitância de radiação térmica na região do espectro infravermelho. (RODRIGUES, 2014, p.16).

KREITH *et al* (2014, p.4-5) ao mencionarem os mecanismos de transferência de calor enfocam que a literatura referente à transferência de calor geralmente reconhece três modalidades distintas de transmissão de calor: condução, radiação e convecção. No entanto, apenas condução e radiação devem ser classificadas como processos de transferência de calor, porque apenas esses mecanismos dependem da existência de uma diferença de temperatura para sua operação. No entanto, apesar da convecção não satisfazer plenamente a definição de transferência de calor, sua operação também depende de transporte mecânico em massa, por isso, segundo os autores, a “transferência de calor por convecção”, torna-se um termo geralmente aceito.

A Lei de Kirchoff da radiação térmica é uma teoria que propõe a igualdade entre emissão e absorção ( $\alpha = \varepsilon = 1$ ), em que o emissor ideal seria o material aplicado em um corpo negro capaz de absorver toda a energia incidente sobre ele.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi elaborado com uma sequência de atividades distribuídas em várias etapas, compreendendo a escolha dos materiais, preparação das amostras, tratamento dos substratos, deposição dos filmes pelo método *screen printing*, caracterização dos pós e dos filmes, análises e discussão dos resultados.

O resíduo de rochas ornamentais – RRO, foi obtido por doação de uma empresa beneficiadora de rochas ornamentais, localizada em Cabedelo – PB, Brasil. A partir da lama da serragem e corte de rochas ornamentais: granito, quartzito e mármore, com maior incidência de granito cuja origem foi de Cachoeiro do Itapemirim – ES, Brasil.

Os elementos químicos óxido de cobre (CuO) com partículas  $\varnothing \leq 38\mu\text{m}$ , e carbeto de silício (SiC) com partículas  $\varnothing \leq 45\mu\text{m}$ , foram adquiridos de fornecedores no Brasil, bem como o adesivo Araldite profissional, a cola térmica e as telas *silk screen* de nylon.

O resíduo coletado foi desumidificado em estufa com temperatura de 100°C, durante 72 horas; macerado com almofariz e no moinho de bolas de alumina e passado na peneira ABNT #325, obtendo 486g de partículas finas  $<0,05\text{mm}$  ( $\varnothing \leq 50\mu\text{m}$ ), após granulometria realizada com base na norma NBR-6502/ABNT (1995), aplicada às rochas e solos.

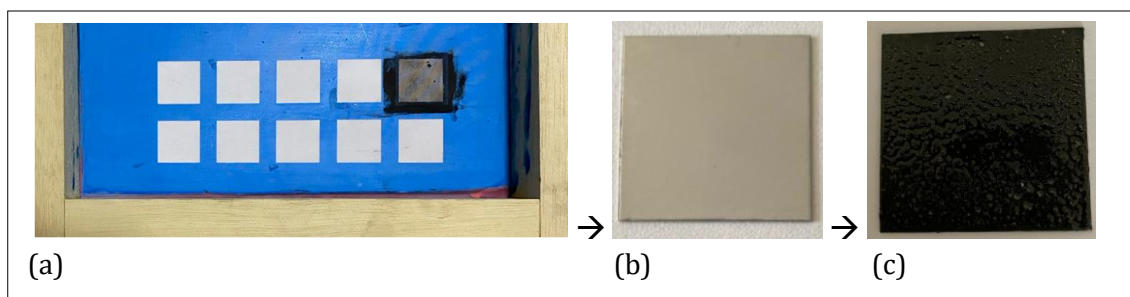
Os materiais foram divididos em duas amostras S1 e S2, sendo S1 contendo apenas RRO puro, (100% RRO puro) e S2 composta por RRO, CuO e SiC, na proporção (40% RRO + 50% CuO + 10% SiC), cujos compósitos foram misturados com espátula.

À amostra S2 foi adicionado o adesivo araldite profissional (A+B, na proporção 1:1) como aglomerante e endurecedor para a deposição no substrato dos filmes Fa, Fb e Fc. Para deposição do filme Fd no substrato foi adicionada a cola térmica.

O substrato de aço inoxidável AISI 304 com dimensões 30mm x 30mm x 0,55mm foi tratado com desengordurante e álcool isopropílico preparado para receber a deposição da pasta do compósito S2, imprimindo os filmes com as seguintes configurações: (Fa) aço com ranhuras, araldite e tela #43 fios; (Fb) aço liso, araldite e tela # 43 fios; (Fc) aço liso, araldite e tela #61 fios; (Fd) aço liso, cola térmica e tela #61 fios.

A mistura do compósito da amostra S2 foi realizada na proporção 1:1 (S2=1g + Araldite=1g), formando um material de consistência pastosa, o qual foi aplicado com espátula no substrato de aço inoxidável AISI 304, pelo método *screen printing*. Com telas de *nylon* de 43 e 61 fios/cm, cujas características são apresentadas na Figura 2.

**Figura 2** – (a)tela silk screen; (b) aço inox 304; (c)filme aplicado



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

## CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização foi realizada nos laboratórios da UFPB: PPCEM/CT – LAMAB, LMC e LSR; NPE/LACOM; CEAR/LabFilm; e PPGO/LABIO nos ensaios e equipamentos apresentados a seguir.

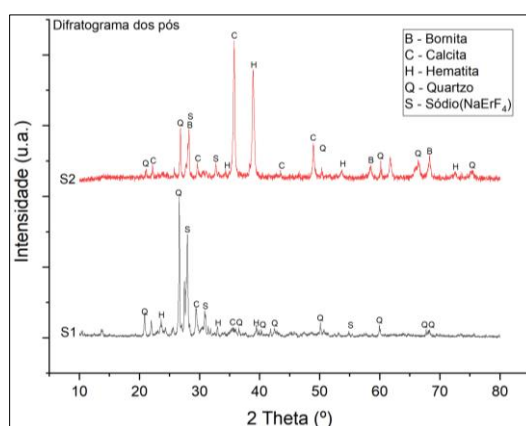
Caracterização dos pós: difração de raios – X (DRX) – (SHIMADZU, XRD6000); análises térmicas DSC e TGA (TA *Instruments* SDT-650); FTIR pelo método ATR (SHIMADZU, IRTracer – 100).

Caracterização dos filmes aplicados no substrato de aço inoxidável AISI 304: difração de raio-X (DRX) – (RIGAKU, *MiniFlexII* [GNMS/UFRN]); Perfilometria (*Taylor Hobson*, CCI-MP 20x); Microdureza Vickers (SHIMADZU, *HMV-Micro Hardness Tester*); UV-Vis (SHIMADZU, UV-2600) e MEV (TESCAN VEGA, S5123). Filmes sem tratamento térmico (cura à temperatura ambiente) e filmes com tratamento térmico (sinterizados em forno tipo mufla a 200°C, durante 6 horas).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, são apresentados os difratogramas de DRX realizado para identificar os minerais presentes nas amostras, tendo obtido os seguintes resultados: amostra S1 contém os minerais calcita, hematita, quartzo e fluoreto de sódio érbio; amostra S2 contém bornita (CuO adicionado ao experimento) calcita, hematita, quartzo (incluído o SiC adicionado ao experimento) e fluoreto de sódio érbio.

**Figura 3** – Difratogramas de raios-X dos pós das amostras S1 e S2



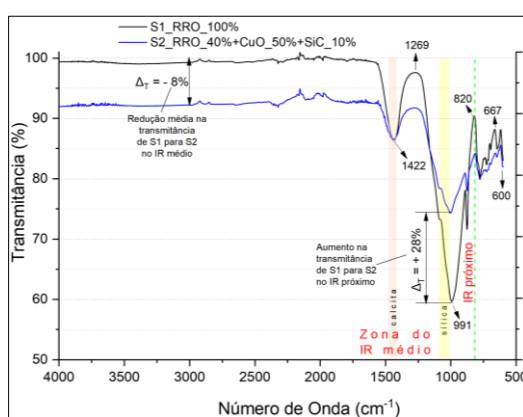
Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

Os resultados de FTIR apresentados na Figura 4, obtidos com a utilização da técnica de Reflexão Total Atenuada – ATR. Na qual à medida que foi aumentando a

carga da radiação infravermelha houve mudanças de posição (deslocamentos) para comprimentos de onda maiores. Surgiram picos nos seguintes comprimentos de onda: ( $667\text{cm}^{-1}$ ), ( $820\text{cm}^{-1}$ ) e ( $1269\text{cm}^{-1}$ ). Por outro lado, em termos quantitativos constatou-se o aumento de 28% na transmitância da amostra S1 para S2 no infravermelho próximo e uma redução média de 8% da amostra S1 para S2 no infravermelho médio.

De acordo com STUART (2007), para materiais inorgânicos, na faixa do número de onda de  $1.000$  a  $1.100\text{ cm}^{-1}$ , ocorre a maior concentração de sílica. Confirmando a característica predominante da sílica no resíduo do granito.

**Figura 4** – Resultados de FTIR das amostras dos pós S1 e S2 sobrepostos



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

A análise térmica por Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC dos pós foi necessária para medir as mudanças nas características físicas e químicas de cada amostra em função da variação de temperatura controlada, na qual foi calculada a diferença de entalpia ( $\Delta H$ ).

A análise termogravimétrica – TGA foi realizada para verificar a variação de massa ( $\Delta m$ ) de cada amostra por transformação física e por transformação química em função do tempo ou da temperatura aplicada, sob uma atmosfera específica.

O método de análise consistiu em enviar 1g da amostra S1, da qual foi extraída 12,07172mg de pó, submetida ao aquecimento com passos de  $15^\circ\text{C}/\text{min}$ , partindo da temperatura ambiente, até  $1000^\circ\text{C}$  na atmosfera de ar sintético.

Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra S1 e utilizando dados do arquivo (.txt) com valores gerados pelo equipamento SDT650, dividindo as perdas em três estágios distintos: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana, baixa temperatura ( $>35^\circ\text{C}<100^\circ\text{C}$ ), onde se verificou perda de massa de 0,26%;



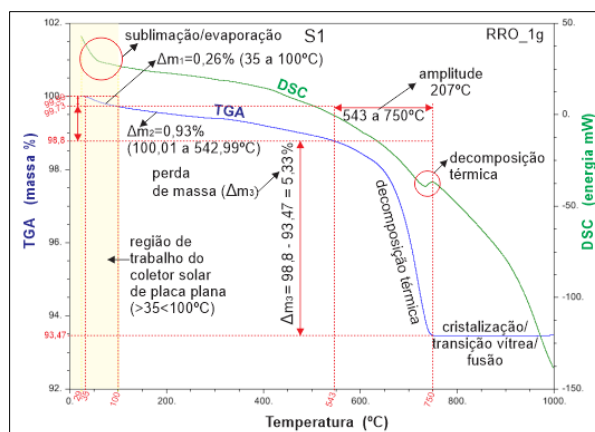
( $\Delta m_2$ ) região de média temperatura (100,01°C a 542,99°C), onde se verificou perda de massa de 0,93%; ( $\Delta m_3$ ) região de alta temperatura (543°C a 750°C) em que verificou-se perda de massa de 5,33%, com amplitude térmica – neste intervalo – de 207°C e razão perda de massa x amplitude térmica igual a 0,026. Entretanto, ao somar  $\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3$  obtendo perda de massa total de 6,52%, confirmando que a amostra S1 apresentou maior perda de massa.

A perda de massa se caracterizou provavelmente por decomposição térmica dos materiais aplicados; após o intervalo citado no parágrafo anterior verificou-se que de 750°C a 1010°C, apresenta uma linha reta característica de cristalização/transição vítrea. Apesar da linha reta – na análise de TG – também caracterizar fusão, é pouco provável que seja do granito, pois de acordo com a literatura publicada, seu ponto de fusão se dá entre 1215°C a 1260°C, já o quartzo é em torno de 1710°C. Considerando que o resíduo de rochas ornamentais RRO obtido é constituído por pós de granito, mármore e quartzito. Então é muito provável que tenha havido a fusão do mármore que ocorre entre 700°C e 1000°C, ou ainda, de outras impurezas e demais elementos químicos presentes no material.

Analisando a curva de DSC (linha verde) no gráfico da amostra S1 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, verificou-se entre a temperatura ambiente de 29°C até 100°C, uma curva característica de sublimação/evaporação, provocada provavelmente por reação endotérmica a qual absorveu calor e liberou energia; no entorno de 740°C verificou-se uma curva característica de decomposição térmica e ativação de energia.

Diante do exposto nos parágrafos anteriores pode-se concluir que dentre as duas amostras, o material da amostra S1 (RRO\_1g), apesar da baixa perda de massa entre a temperatura ambiente até 100°C, teve, na região de alta temperatura, a maior perda de massa entre as amostras ( $\Delta m_3=5,33\%$ ), o que caracteriza um material termicamente instável em relação ao S2, sendo suscetível a maior expansão térmica, retração, microfissuras, fissuras e deformações.

**Figura 5** – Curvas TGA/DSC da amostra S1 composta por pó de RRO



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

A Figura 6 apresenta o gráfico das curvas TGA/DSC da amostra S2 cujo compósito contém resíduo de rochas ornamentais (RRO) de predominância granítica, na proporção de 40% ou 0,4g por cada 1g de peso; óxido de cobre (CuO) na proporção de 50% ou 0,5g por cada 1g de peso; e, carbetto de silício (SiC) na proporção de 10% ou 0,1g por cada 1g de peso.

O método de análise de 1g de pó do compósito, do qual extraiu-se 12,42353 mg para análise, foi realizado com passos de 15°C/min, partindo da temperatura ambiente, até 860°C, na atmosfera de ar sintético.

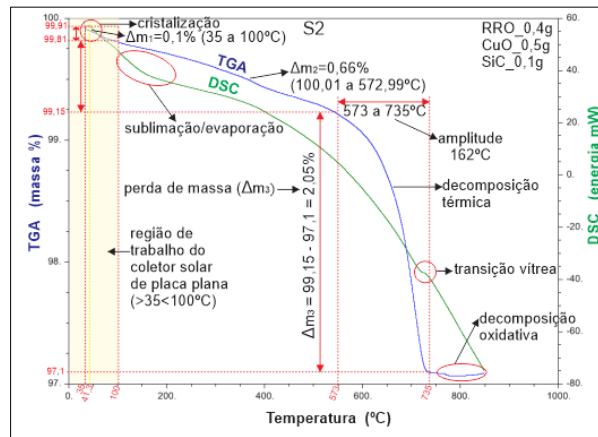
Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra S2 foram obtidos os seguintes resultados: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana (>35°C<100°C), onde se verificou perda de massa de 0,1%; ( $\Delta m_2$ ) região de média temperatura (100,01°C a 572,99°C), onde se verificou perda de massa de 0,66%; ( $\Delta m_3$ ) região de alta temperatura (573°C a 735°C) em que verificou-se perda de massa de 2,05%, com amplitude térmica – neste intervalo – de 162°C e razão perda de massa x amplitude térmica igual a 0,013. Entretanto, ao somar  $\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3$  obtendo perda de massa total de 2,81%, caracterizando a amostra S2 como a que apresentou menor perda de massa.

A perda de massa se caracterizou provavelmente por decomposição térmica dos materiais e/ou elementos químicos aplicados; após o intervalo supracitado verificou-se no entorno de 770°C, uma curva característica de decomposição oxidativa, seguida por ganho de massa pouco significativo.

Analisando a curva de DSC (linha verde) no gráfico da amostra S2, verificou-se à temperatura de 41,3°C uma curva característica de cristalização e ativação de energia, provocada provavelmente por reação exotérmica a qual libera energia e calor; entre

41,3°C e 380°C observou-se uma curva característica de sublimação/evaporação, provocada provavelmente por reação endotérmica; no entorno de 725°C verificou-se uma curva característica de transição vítrea.

**Figura 6** – Curvas TGA/DSC da amostra S2 composta por pós de RRO + CuO + SiC

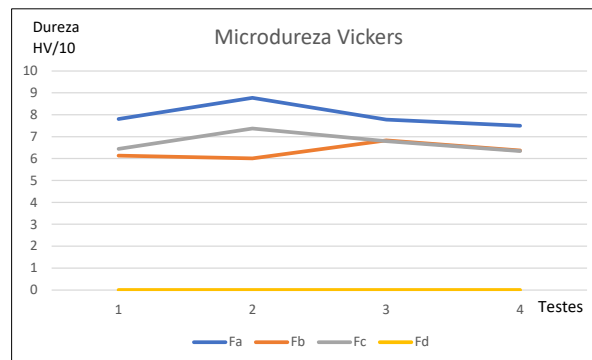


Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

Os testes de microdureza mostraram que os filmes – sem tratamento térmico – aplicados nos substratos, cuja cura foi em temperatura ambiente, apresentaram boa aderência. Os resultados dos ensaios de penetração do endentador (perfurador), em cada filme (corpo de prova), chegaram aos resultados apresentados na Figura 7.

Observou-se, no caso do filme Fd, que o equipamento não leu a amostra, provavelmente pelo fato do adesivo da cola térmica conter silicone em sua composição, impedindo o endurecimento do filme aplicado e, conseqüentemente, dificultando a marcação das diagonais pelo endentador, após aplicação da força 0,01kgf(10g), durante 15s. No entanto, Fb apresentou a maior dureza com média de 7,97HV; Fb e Fc com média de 6,54HV. Equivalente à dureza de materiais plásticos.

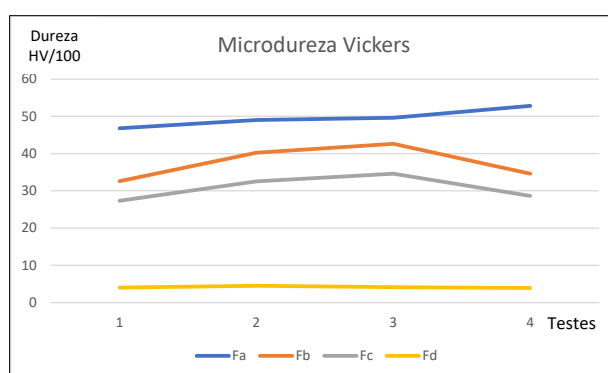
**Figura 7** – Testes de microdureza Vickers (sem tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

Nos testes da microdureza Vickers dos filmes com tratamento térmico, após aplicação da força 0,10kgf (100g), durante 15s, verificou-se que o filme Fd, aplicado com cola térmica, obteve média de dureza 4,13HV, ou seja, é um material mole. Entretanto, o filme Fa obteve a maior média de dureza com 49,55HV; Fb 37,5HV e Fc 30,75HV, conforme apresentado na Figura 8. A média de dureza de Fa e Fb é equivalente à dureza de ligas de alumínio e bronze, ou seja, resultou num material relativamente duro.

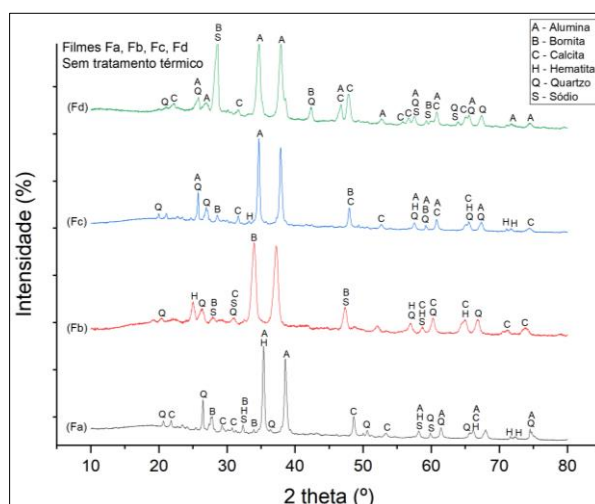
**Figura 8** – Testes de microdureza Vickers (com tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

Os difratogramas sobrepostos apresentados na Figura 9, mostraram que o filme Fd, sem tratamento térmico, apresentou picos com maiores intensidades, localizados entre 25° a 50°, com predominância da fase do mineral alumina. Por outro lado, ao observar os difratogramas dos filmes Fa, Fb e Fc, constata-se que os picos com maiores intensidades estão entre 25° e 50°, com predominância das fases do mineral alumina. As análises foram baseadas nas seguintes fichas de informações cristalográficas (CIFs): Alumina (ICSD60419), Bornita (ICSD 024174), Calcita (ICSD 16710), Hematita (ICSD 64599), Quartzo (ICSD62405), Fluoreto de Sódio Érbio (ICSD60256).

**Figura 9** – Difratomogramas de raios-X dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd sem tratamento térmico



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

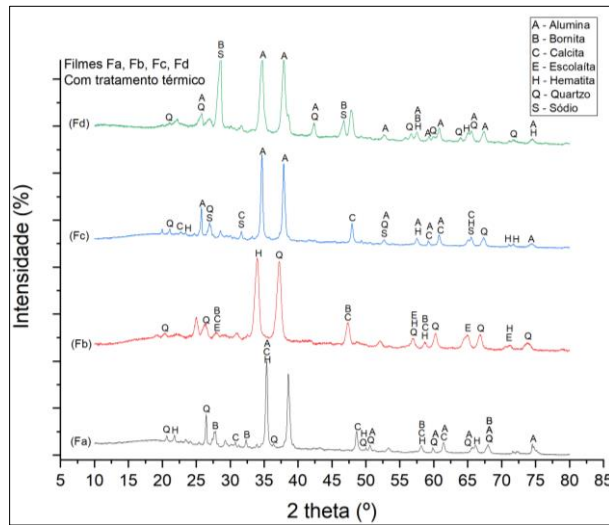
Os difratogramas sobrepostos dos filmes, apresentados na Figura 10, mostram que – após o tratamento térmico à temperatura de 200°C – os maiores picos permaneceram entre 25° e 50°, seguindo a tendência dos filmes sem tratamento térmico e da amostra do compósito S2, no entanto foram constatadas algumas mudanças de fase e deslocamentos angulares. Os maiores picos apresentaram fases com predominância dos minerais alumina (provavelmente do granito), calcita (do mármore), hematita (CuO e granito) e quartzo (do granito, SiC e quartzito).

Constatou-se no difratograma do filme Fc, após tratamento térmico, a ausência da fase referente ao mineral bornita (óxido de cobre), provavelmente por alguma mudança de fase, pois a fase desse mesmo mineral está presente no filme Fc sem tratamento térmico.

Analisando o difratograma do filme Fd, este foi o que apresentou maiores picos, entretanto ao comparar com outros ensaios como UV - Vis, foi o que apresentou menor percentual de absorvância; na deposição teve fraca aderência ao substrato.

As análises foram baseadas nas seguintes fichas de informações cristalográficas (CIFs): Alumina (ICSD60419), Bornita (ICSD 024174), Calcita (ICSD 16710), e Escolaita (ICSD202619), Hematita (ICSD 64599), Quartzo (ICSD62405) e Fluoreto de Sódio Érbio (ICSD60256).

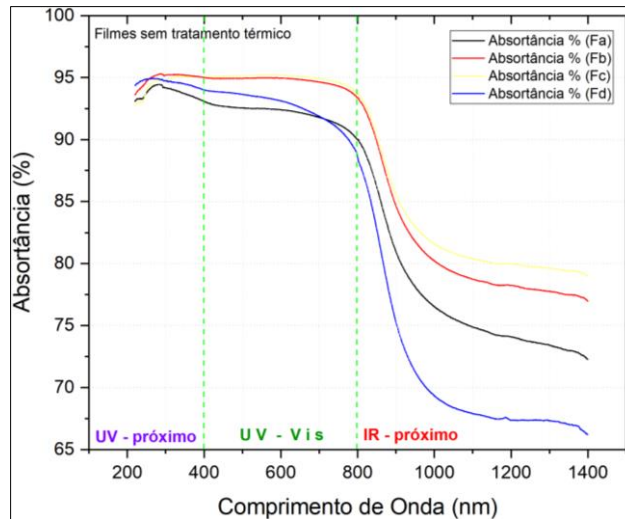
**Figura 10** – Difratomogramas de raios-X dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd com tratamento térmico



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Figura 11 mostra os resultados da análise de UV-Vis dos filmes sem tratamento térmico, quanto a absorptividade, verificou-se maior absorptância no filme (Fc).

**Figura 11** – Absortância dos filmes sem tratamento térmico

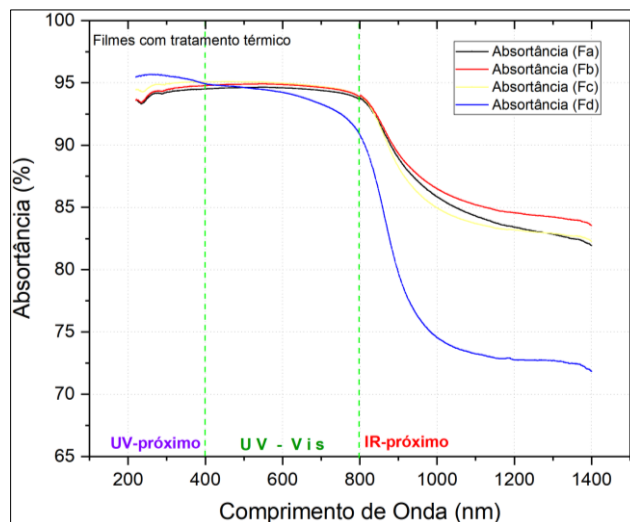


Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Figura 12 mostra os resultados da análise de UV-Vis após o tratamento térmico verificou-se vários efeitos como superfície fosca e uniforme, maior adesão entre as partículas, superfície sólida, baixa rugosidade, aumento da resistência mecânica, adesão entre partículas adjacentes e diminuição dos poros. Destacando-se a superfície

(Fb) como melhor resultado, por outro lado, a superfície de (Fd) não apresentou bons resultados.

**Figura 12** – Absortância dos filmes com tratamento térmico



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Tabela 1, apresenta o comparativo entre os filmes com melhor desempenho, sem tratamento térmico e com tratamento térmico, onde é possível verificar que após o tratamento térmico os valores da absorptância máxima, média\* e mínima.

\*Considerando todo o intervalo de varredura (220nm a 1400nm), com tendência de alta até o limite máximo nas regiões do UV-Vis e UV próximo.

**Tabela 1** – Valores da absorptância sem tratamento térmico e com tratamento térmico

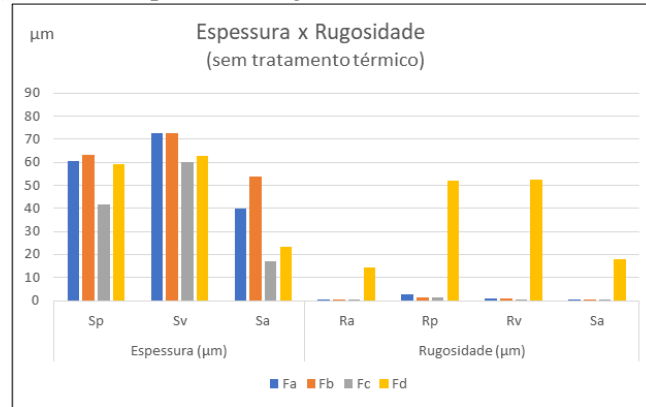
Tratamento / Filme	Absortância (%)		
	UV próximo (Máxima)	UV-Vis (média)	IR próximo (mínima)
Sem tratamento térmico / Fc	95,2	88,4	79
Com tratamento térmico / Fb	94,9	90,5	83,5

Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Figura 13, mostra os resultados da perfilometria dos filmes – sem tratamento térmico – onde é possível visualizar os comportamentos acerca da espessura (altura) e da rugosidade (aspereza) de cada filme (individualmente) e do conjunto dos filmes. Pode-se visualizar que o filme (Fc), apresentou menor espessura média e menor rugosidade

média. De modo geral, no filme Fc sem tratamento térmico, verificou-se espessura média  $\sim 17,23\mu\text{m}$  e rugosidade média  $\sim 0,17\mu\text{m}$ .

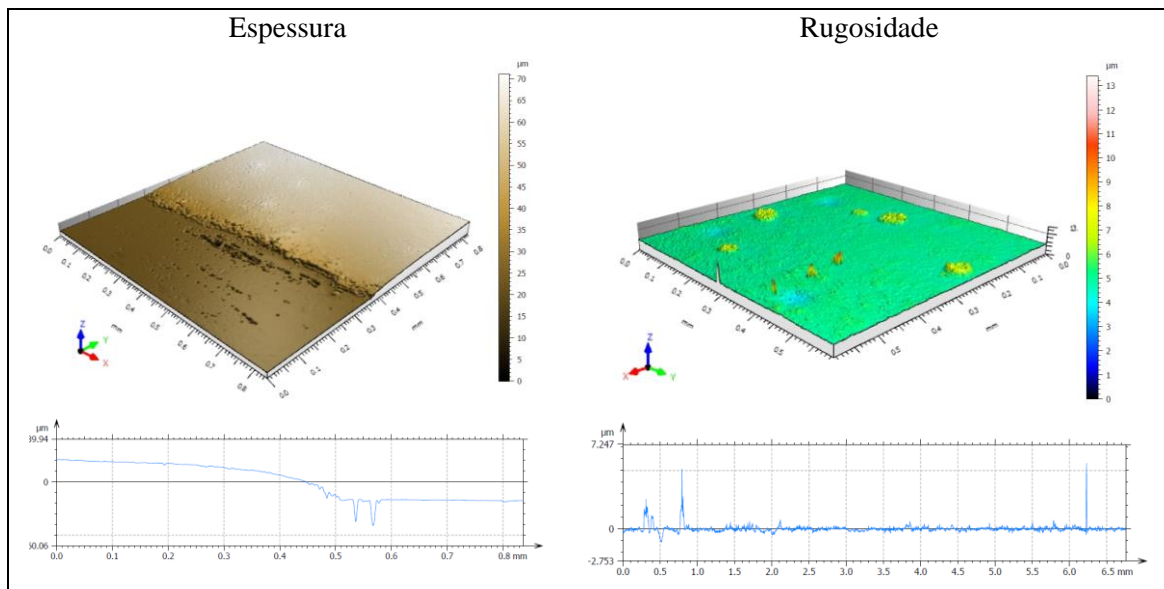
**Figura 13** – Espessura e rugosidade (sem tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Figura 14 apresenta imagens em 3D mostrando a espessura e rugosidade da superfície do filme Fc sem tratamento térmico:

**Figura 14** – Espessura e rugosidade do filme Fc (sem tratamento térmico)



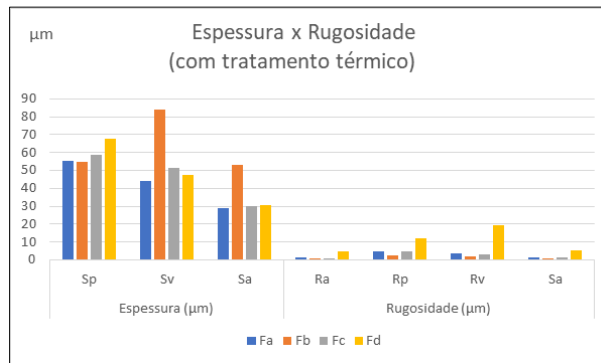
Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

A Figura 15, mostra os resultados da perfilometria dos filmes – com tratamento térmico – onde é possível visualizar os comportamentos acerca da espessura (altura) e da rugosidade (aspereza) de cada filme (individualmente) e do conjunto dos filmes. Pode-se visualizar que o filme (Fb), apresentou menor espessura média e menor



rugosidade média. De modo geral, após o tratamento térmico, verificou-se espessura média  $\sim 53,00\mu\text{m}$  e rugosidade média  $\sim 0,60\mu\text{m}$ , observou-se que a superfície do filme ficou com textura mais densa e uniforme.

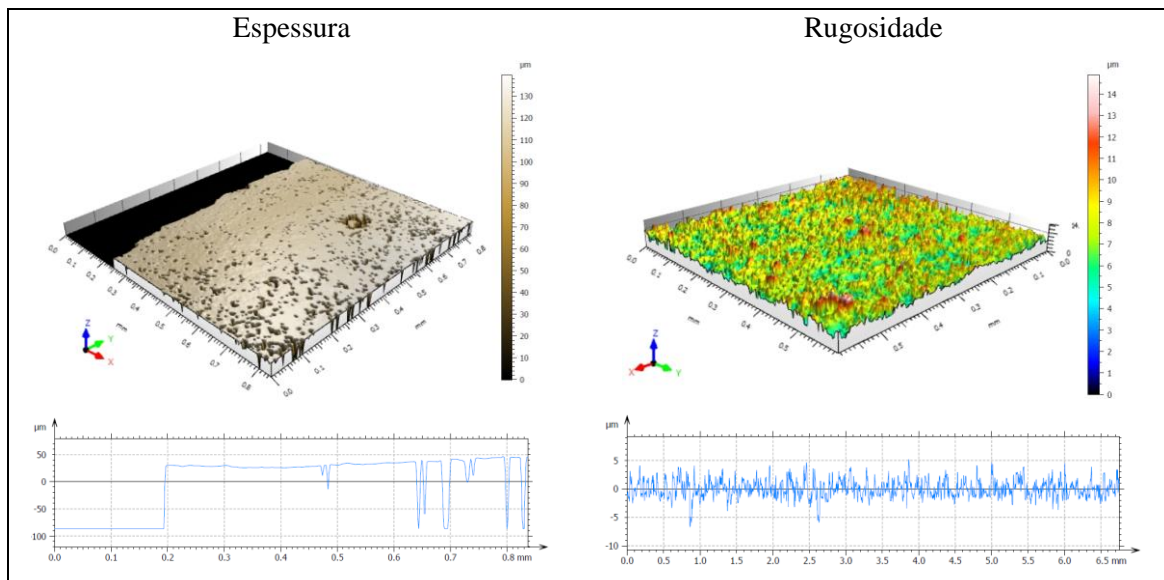
**Figura 15** – Espessura e rugosidade (com tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Figura 16 apresenta imagens em 3D da espessura e rugosidade do filme Fb com tratamento térmico:

**Figura 16** – Filme Fb (com tratamento térmico a 200°C/6 horas)



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2023).

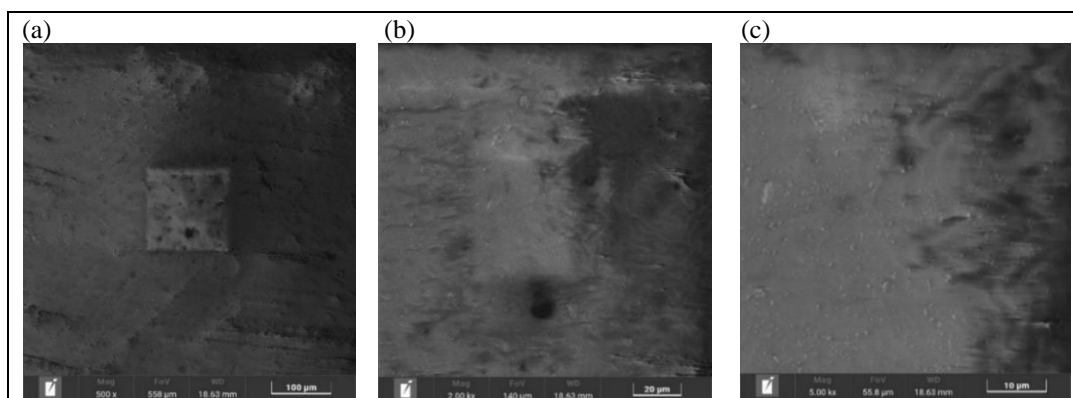
As imagens de microscopia eletrônica de varredura – MEV, contidas no conjunto da Figura 17 (a, b, c), foram obtidas a partir do filme Fc – sem tratamento térmico. Metalizado com ouro (Au) para facilitar o escoamento dos elétrons durante a

varredura, com campo de visão de 558  $\mu\text{m}$ , 140  $\mu\text{m}$ , 55,8  $\mu\text{m}$  e respectivas amplitudes de 500x, 2000x (2kx) e 5000x (5kx). As quais são apresentadas a seguir:

As imagens de MEV mostram características de elétrons retroespalhados e superfície com baixa rugosidade. No centro das imagens (a) e (b) verifica-se um prisma quadrangular de quartzo com cada lado da base medindo 130 $\mu\text{m}$ .

**Figura 17** – Micrografia MEV (Fc) sem tratamento térmico

(a) elétrons retroespalhados; (b) medindo e (c) superfície com baixa rugosidade.

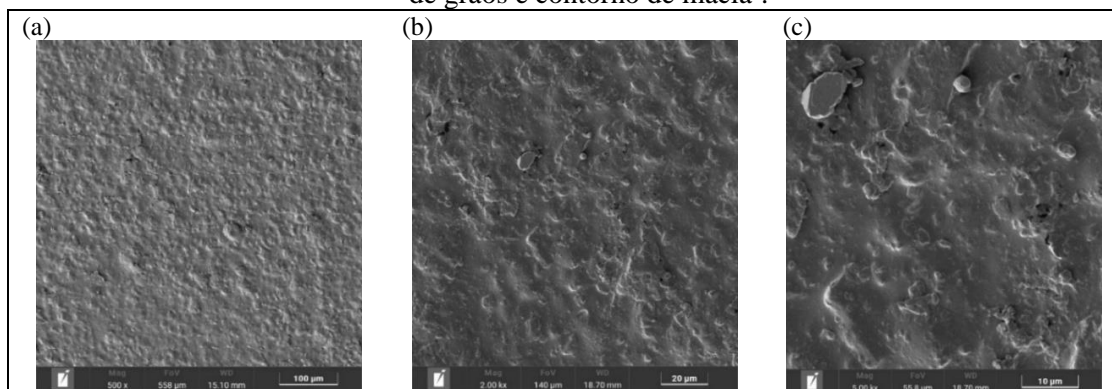


Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

A Figura 18 apresenta as imagens (a, b, c), de MEV, obtidas a partir do filme Fc, com tratamento térmico, cujas características apresentam superfície com microestrutura densa, topografia heterogênea, rugosidade, contorno de grãos e contorno de macla.

**Figura 18** – Micrografia MEV (Fc) com tratamento térmico

(a) microestrutura com alta densificação; (b) topografia heterogênea, rugosidade<sup>1</sup>; (c) contorno de grãos e contorno de macla<sup>2</sup>.



Fonte: ANDRADE; MACEDO; GOMES; RAIMUNDO (2024).

<sup>1</sup> FURTADO, J. G. de M. *et al.* (2010).

<sup>2</sup> CALLISTER Jr.; RETHWISCH, (2024, p. 169-188 e 289-302)

## CONCLUSÃO

Após as análises de DRX, FTIR, análises térmicas DSC e TGA dos pós das amostras S1 (RRO puro) e S2 (RRO+CuO+SiC), concluiu-se que a amostra S2, cujos compostos foram misturados com espátula e dissolvidos com adesivo araldite A + B, apresentou – no conjunto das análises – o melhor desempenho sendo escolhida para a deposição dos filmes no substrato de aço inoxidável AISI 304.

O carbetto de silício foi adicionado como endurecedor, a araldite (A + B), um adesivo epóxi, atuou como aglomerante dando consistência plástica no momento deposição nos substratos pelo método *screen printing* e, depois da cura, atuou como endurecedor, foi constatado nos testes de microdureza que a superfície dos filmes, submetidos ao tratamento térmico, apresentou maior grau de dureza, uniformização da superfície e baixa porosidade. Conclui-se então que o adesivo araldite e o carbetto de silício exerceram com êxito seus objetivos como plastificante e endurecedor, com resultados melhorados após o tratamento térmico a 200°C.

Imagens de MEV mostraram a morfologia de superfície seletiva aplicada no substrato evidenciando microestrutura com alta densificação, contorno de grãos, elétrons retroespalhados, contorno de macla e cristais de quartzo, concluindo-se que a deposição foi aplicada satisfatoriamente.

Do ponto de vista da absorvância os valores obtidos são promissores: na região do espectro ultravioleta próximo foi 94,9%; na região do UV-Vis atingiu média de 90,5% com tendência crescente até pico de 94,9; na região do infravermelho próximo 83,5%. Assim pode-se concluir que o filme Fb, com tratamento térmico, tem potencial para aplicação em superfícies seletivas. No entanto, pode ser aprimorado com a aplicação de materiais antirreflexos para melhorar ainda mais o seu desempenho, sendo assim são recomendados novos estudos e pesquisas científicas sobre o tema.

## REFERÊNCIAS

- ABUSKA. M.; SEVIK. S.; KAYAPUNAR. A.. *Comparative energy and exergy performance investigation of forced convection solar air collectors with cherry stone/powder*. **ELSEVIER: Renewable Energy**, nº143 (2019), 34-46. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119306330?via%3Dihub>
- ALENCAR, C. R. A. Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais. **IEL:Espírito Santo**. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.844:2015. Rochas para revestimento – Requisitos para granito. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502:1995. Rochas e solos. **ABNT**. Rio de Janeiro,1995.
- BERTENE, L. Propriedades do aço inoxidável AISI 304: resistência à tração e dureza. **COMPRACO:** Piracicaba. Fev/2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/propriedades-do-aco-inoxidavel-aisi-304-resistencia-a-tracao-e-dureza>
- CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G.. Tradução: SOARES, S. M. S.. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10ª ed.. 2ª reimpressão. **LTC**. Rio de Janeiro: 2024.
- DAS, L.; RUBBI, F.; HABIB, K.; ASLFATTAHI, N.; SAIDUR, R.; SAHA, B. B.; ALGARNI, S.; IRSHAD, K.; ALQAHTANI, T.. *State-of-the-art ionic liquid & ionanofluids incorporated with advanced nanomaterials for solar energy applications*. **ELSEVIER: Journal of molecular liquids**. Vol. 336, 15 august 2021, 116563. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732221012873> .
- DUTRA, K. H.. Obtenção de nova superfície seletiva usando compósitos a base de óxidos de cromo, ferro e alumínio para coletores solares térmicos. Tese (Doutorado). **PPECM/UFC**. Fortaleza, 2022.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional. **EPE**. 2023 – ano base 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>
- FURTADO, J. G. de M.; DIAS, R.; NÓBREGA, M. C. de S.; SERRA, E.T.. Uma aplicação da análise de imagens na caracterização microestrutural de cerâmicas varistoras. **Tecnologia Metalurgia, Materiais e Mineração**, vol.6, n3, p.179-184, 2010. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/doi/10.4322/tmm.00603011>
- GOEL. V. *et al*. *A comprehensive study on the progressive development and applications of solar air heaters*. **ELSEVIER: Solar Energy**. Vol. 229, 15 november 2021, pages

112-147.

Disponível

em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X21006095>

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S.. Princípios de transferência de calor. 7ª ed.. Revisão técnica: SEIDEL, K. F. *et al.* Tradução: Noveritis do Brasil. São Paulo: **Cengage Learning**, 2014.

LINGAYAT, A. B. *et al.* *A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights.* **ELSEVIER: Applied Energy.** Vol. 258, 15 junaury 2020, 114005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919316927>

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G.. Atlas brasileiro de energia solar. 2ª ed.. São José dos Campos: **INPE**, 2017, il. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (organizadores). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **CEPEL – CRESESB.** Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)

REED, W.; MONROE, J. S.. Geologia - Tradução da 2ª edição norte-americana. **Cengage Learning.** Brasil, 2017.

RODRIGUES, F. P.. Obtenção de superfície seletiva para coletores solares térmicos a partir de resíduos de granito. Dissertação (Mestrado). **UFC/CT/DEMP/PPGEM.** Fortaleza. 2014.

VIAN, Â.; TAHAN, C. M. V.; AGUILAR, G. J. R.; GOUVEIA, M. R.; GEMIGNANI, M. M. F.. Energia solar: fundamentos, tecnologias e aplicações. São Paulo: **Blucher**, 2021.