

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB  
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS  
– PPECM

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS GRANÍTIAS COM A  
ADIÇÃO DE OUTROS MATERIAIS PARA APLICAÇÃO EM SUPERFÍCIE SELETIVA

GERALDO MAGELA DE ANDRADE

João Pessoa – Paraíba

2024

GERALDO MAGELA DE ANDRADE

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS GRANÍTIAS COM A  
ADIÇÃO DE OUTROS MATERIAIS PARA APLICAÇÃO EM SUPERFÍCIE SELETIVA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Ciência e Engenharia dos Materiais da  
Universidade Federal da Paraíba como parte dos  
requisitos para a obtenção do grau de doutor.

Linha de pesquisa: Materiais para conversão e  
armazenamento de energia

Orientador: Prof. Dr. Daniel Araújo de Macedo

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Kelly Cristiane Gomes

João Pessoa – Paraíba

2024

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

A553u Andrade, Geraldo Magela de.

Utilização do resíduo de rochas ornamentais graníticas com a adição de outros materiais para aplicação em superfície seletiva / Geraldo Magela de Andrade. - João Pessoa, 2024.

109 f. : il.

Orientação: Daniel Araújo de Macedo.

Coorientação: Kelly Cristiane Gomes.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Aço inoxidável. 2. Aquecedor solar. 3. Coletor solar. 4. Energia solar. I. Macedo, Daniel Araújo de. II. Gomes, Kelly Cristiane. III. Título.

UFPB/BC

CDU 669.14.018.8(043)

GERALDO MAGELA DE ANDRADE

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS GRANÍTICAS COM A  
ADIÇÃO DE OUTROS MATERIAIS PARA APLICAÇÃO EM SUPERFÍCIE SELETIVA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aprovado em 23 / 05 / 2024

BANCA EXAMINADORA



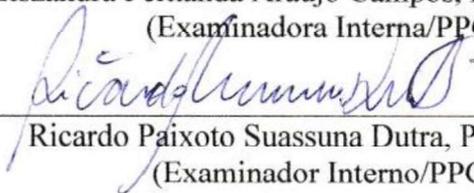
Daniel Araújo de Macedo, Prof. Dr., UFPB  
(Presidente, Orientador/PPCEM)



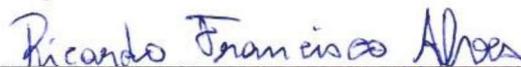
Kelly Cristiane Gomes, Profa. Dra., UFPB  
(Coorientadora – Membro externa ao PPCEM)



Liszandra Fernanda Araújo Campos, Profa. Dra., UFPB  
(Examinadora Interna/PPCEM)



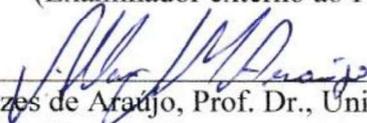
Ricardo Paixoto Suassuna Dutra, Prof. Dr., UFPB  
(Examinador Interno/PPCEM)



Ricardo Francisco Alves, Prof. Dr., UFPB  
(Examinador externo ao Programa)



Rafael Alexandre Raimundo, Prof. Dr., UFRN  
(Examinador externo ao Programa)



Allan Jedson Menezes de Araújo, Prof. Dr., Universidade de Aveiro – Portugal  
(Examinador externo à instituição)

João Pessoa – Paraíba

2024

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida, aos familiares pelo incentivo incontestado durante esse período de estudos na busca da realização de mais um sonho pessoal e profissional, em especial à minha esposa Betânia e aos nossos filhos Leandro e Luciana.

Aos meus pais Raimundo (*in memoriam*) e Izaura (*in memoriam*), espelhos da minha vida, obrigado mamãe e papai pelas primeiras letras, pela educação, pelos exemplos de probidade – legado deixado para sempre em nossas vidas.

Aos professores do PCEM/CT/UFPB que nos transmitiram com sabedoria os conhecimentos técnicos-científicos, no decorrer do curso.

Aos colaboradores técnicos-administrativos e técnicos dos laboratórios LMC/UFPB, LSR/UFPB, LabFilm/CEAR/UFPB, LABIO/UFPB, LACOM/NPE/UFPB, LAMAB/UFPB e GNMS/UFRN que viabilizaram os diversos ensaios das amostras e demais materiais para as análises técnicas.

Aos colegas de curso do doutorado e mestrado em ciência e engenharia de materiais com quem tivemos o privilégio de conviver nas salas de aulas, nos laboratórios e nos grupos de estudos nas diversas atividades intraclasse e extraclasse.

Aos colegas de trabalho do Departamento de Gestão Pública – DGP/CCSA/UFPB, pelo incentivo à qualificação docente em programa de pós-graduação *stricto sensu*.

Agradecimentos especiais ao orientador prof. Dr. Daniel Macêdo pelos ensinamentos em ciências dos materiais e células combustíveis que contribuíram de forma relevante na escolha dos compostos químicos, nas estequiometrias, nos incentivos à caminhada acadêmica, um exemplo de dedicação e tranquilidade na condução do processo educacional; à coorientadora profa. Dra. Kelly Gomes pelas considerações incisivas que – com seu vasto conhecimento em estudos aplicados à energia solar – ajudaram na interpretação das análises e a aprimorar o texto final da tese.

“Nós devemos ser a mudança que queremos ver no Mundo”  
Mahatma Gandhi

## RESUMO

O consumo de energia elétrica no Brasil é maior do que sua capacidade de geração em alguns períodos do ano, a geração principal é hidroelétrica que em períodos de seca não atende plenamente à demanda, o que fez o Governo Federal construir várias usinas termelétricas e incentivar as contribuições de outras fontes alternativas de energias solar e eólica. Uma das alternativas de redução do consumo de energia elétrica é o uso da energia solar térmica para aquecimento de água em coletores solares, reduzindo o consumo de energia elétrica com aquecedores e chuveiros elétricos. Esta pesquisa avaliou o potencial de uso do resíduo de rochas ornamentais (RRO) com adição de outros materiais, formando novos compósitos para aplicação em superfície seletiva de coletor solar; a influência dos revestimentos aplicados no substrato de aço inoxidável AISI 304; o efeito do tratamento térmico na morfologia, microestrutura e absorvância das superfícies produzidas. São apresentados fundamentos da radiação solar, estrutura e funcionamento dos coletores solares, tipos de materiais aplicados nos substratos, estudos sobre granito, aspectos da física e matemática aplicados à potência e calor, eficiência do coletor solar e refração da luz. O resíduo foi coletado em empresa de beneficiamento de rochas ornamentais, misturados a outros elementos totalizando cinco amostras e os substratos foram preparados nos laboratórios do Centro de Tecnologia da UFPB, onde se procedeu a caracterização dos pós e dos filmes aplicados por deposição pelo método *screen printing*, foram realizados ensaios de granulometria, difração de raios-X, espectrometria no infravermelho - FTIR, análises térmicas DSC e TGA, UV-Vis, testes de perfilometria e microdureza. Análises de DRX mostraram que o resíduo é, na maioria, de rochas graníticas tendo em vista as fases observadas. No conjunto das análises realizadas, a amostra composta por RRO, CuO, SiC e adesivo araldite profissional apresentou melhor desempenho. Imagens de MEV da superfície evidenciam a microestrutura com alta densificação, alvéolos, microfissuras de clivagem e baixa rugosidade. Os resultados obtidos nos espectros do UV-Vis, ultravioleta próximo e infravermelho próximo – sem prejuízo dos demais aspectos analisados – mostraram que entre os filmes sem tratamento térmico, o filme (Fc) obteve melhor desempenho, pois apresentou absorvância média 88,4% e máxima 95,2%; no entanto após o tratamento térmico o filme (Fb) apresentou melhor desempenho, com absorvância média 90,5% e máxima 94,9%. A pesquisa realizada confirma que os materiais são viáveis para a obtenção de novos produtos voltados para aplicação em superfície seletiva para conversão de energia solar em energia térmica, concluindo que dentre os materiais pesquisados o filme (Fb) – após tratamento térmico – é o mais indicado para aplicação em superfície seletiva de coletor solar, ainda assim o desempenho pode ser melhorado com futuras pesquisas científicas.

Palavras-chaves:

Aço inoxidável; aquecedor solar; coletor solar; energia solar.

## ABSTRACT

Electricity consumption in Brazil is greater than its generation capacity in some periods of the year, the main generation is hydroelectric in periods of drought it does not fully meet demand, which made the Federal Government build several thermoelectric plants and encourage contributions other alternative sources of solar and wind energy. One of the alternatives for reducing electrical energy consumption is the use of solar thermal energy to heat water in solar collectors, reducing electrical energy consumption with heaters and electric showers. This research evaluated the potential for using of the ornamental rocks residue (RRO) with the addition of other materials, forming new composites for application on selective solar collector surfaces; the influence of coatings applied to the AISI 304 stainless steel substrate; the effect of heat treatment on the morphology, microstructure and absorption of the produced surfaces. The fundamentals of solar radiation, structure and functioning of solar collectors, types of materials applied to substrates, studies on granite, aspects of physics and mathematics applied to power and heat, solar collector efficiency and light refraction are presented. The exception was collected at the ornamental stone processing company, mixed with other elements totaling five samples and the substrates were prepared in the laboratories of the UFPB Technology Center, where the characterization of the powders and films applied by deposition using the screen printing method was carried out, particle size tests, X-ray diffraction, infrared spectrometry - FTIR, DSC and TGA thermal analyses, UV-Vis, profilometry and microhardness tests were carried out. XRD analyzes showed that the residue is, in the majority, granitic rocks considering the phases observed. In all the analyzes carried out, the sample composed of RRO, CuO, SiC and professional araldite adhesive presented the best performance. SEM images of the surface show the microstructure with high densification, alveoli, cleavage microcracks and low roughness. The results obtained in the UV-Vis, near-ultraviolet and near-infrared spectra – without prejudice to the other aspects analyzed – showed that among the films without heat treatment, the film (Fc) performed better, as it presented an average absorptance of 88.4% and maximum 95.2%; however, after heat treatment, the film (Fb) showed better performance, with an average absorptance of 90.5% and a maximum of 94.9%. The research carried out confirms that the materials are viable for obtaining new products aimed at application on selective surfaces for converting solar energy into thermal energy, concluding that among the materials researched, film (Fb) – after heat treatment – is the most suitable for application on selective solar collector surfaces, performance can still be improved with future scientific research.

Keywords: Stainless steel; solar heater; solar collector; solar energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre

Figura 2: Mapa Solarimétrico do Brasil – média anual de radiação solar  $\text{wh/m}^2 \times \text{dia}$

Figura 3: Incidência dos raios solares na Terra durante solstícios e equinócios

Figura 4: Diagrama de instalação de painéis-coletores em sistema fixo-semifixo e móvel

Figura 5: Perfis de radiação solar diária com valores equivalentes em HSP

Figura 6: Mecanismos da absorção de fótons

Figura 7: Perfil de absorvância da superfície seletiva ideal

Figura 8: Desenho esquemático dos tipos de tratamentos para superfícies seletivas solares

Figura 9: Efeito da rugosidade na absorvância

Figura 10: Representação das reflexões provocadas pelas ondulações na superfície

Figura 11: Altura máxima dos picos ( $R_p$ ) do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)

Figura 12: Altura máxima dos vales ( $R_v$ ) do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)

Figura 13: Desvio aritmético médio do perfil avaliado ( $R_a$ ): do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)

Figura 14: Representação gráfica do parâmetro rugosidade  $A_s$

Figura 15: Coletor solar de placa plana

Figura 16: Tubos absorvedores paralelos (PTC) x Tubo absorvedor em serpentina (STC)

Figura 17: Desenho das trocas de energia no coletor solar

Figura 18: Modelagem física de um coletor experimental

Figura 19: (a) Representação esquemática do mecanismo de absorção de um fóton para os materiais metálicos, nos quais um elétron é excitado para um estado não ocupado de maior energia. A variação na energia do elétron  $\Delta E$  é igual à energia do fóton. (b) A reemissão de um fóton de luz pela transição direta de um elétron de um estado de alta energia para um de baixa energia.

Figura 20: Ilustração esquemática para um átomo isolado da absorção de um fóton pela excitação de um elétron de um estado de energia para outro. A energia do fóton ( $h\nu = E_4 - E_\beta$ ) deve ser exatamente igual à diferença de energia entre os dois estados ( $E_4 - E_\beta$ ).

Figura 21: Onda eletromagnética mostrando os componentes do campo elétrico  $\epsilon$ , do campo magnético

Figura 22: Espectro eletromagnético

Figura 23: Diagrama de Schaeffler com destaque das regiões predominantes para aços inoxidáveis

Figura 24: Seção transversal de lingote de cobre

Figura 25: Classificação das rochas ígneas

Figura 26: Radiação em uma superfície. (a) Reflexão, absorção e transmissão da irradiação em um meio semitransparente. (b) A radiosidade de um meio opaco

Figura 27: Trajetória de um raio de luz atravessando um vidro transparente de faces paralelas

Figura 28: Refração da luz no vidro transparente

Figura 29: Desvio da luz ao penetrar no vidro

Figura 30: Incidência da Luz no vidro

Figura 31: Planejamento Experimental – Organograma

Figura 32: Fluxo de temperatura do aço inox 304

Figura 33: Tratamento térmico dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd, da temperatura ambiente 30°C até 200°C

Figura 34: (a) Difratoograma DRX dos pós do granito; (b) Granulometria com distribuição das partículas do granito com diâmetro médio de 28,31 $\mu$ m; (c) Curvas TG/DTG do resíduo de granito em temperatura de 0° - 1000°C

Figura 35: Difratomia do resíduo de mármore e granito

Figura 36: Padrões de difração de raios – X de (a) resíduo de granito, (b) formulação de porcelanato e (c) argila vermelha

Figura 37: Diagrama básico do endentador de Vickers

Figura 39: Curva de granulometria do resíduo

Figura 40: Curvas TGA/DSC da amostra A1 composta por pó de RRO

Figura 41: Curvas TGA/DSC da amostra A2 composta por pós de RRO + CuO

Figura 42: Curvas TGA/DSC da amostra A3 composta por pós de RRO + CuO + SiC

Figura 43: Curvas TGA/DSC da amostra A4 composta por pós de RRO + CuO + SiC +  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$

Figura 44: Curvas TGA/DSC da amostra A5 composta por pós de RRO + CuO + Cimento Portland +  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$

Figura 45: Difractogramas de raios-X dos pós das amostras A1, A2, A3, A4 e A5 sobrepostos

Figura 46: Difractogramas de raios-X dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd sem tratamento térmico e sobrepostos

Figura 47: Difractogramas de raios-X dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd com tratamento térmico e sobrepostos

Figura 48: Absortância dos filmes sem tratamento térmico

Figura 49: Dispersão dos filmes sem tratamento térmico

Figura 50: Absortância dos filmes com tratamento térmico

Figura 51: Dispersão dos filmes com tratamento térmico

Figura 52: Resultados Absorbância x refletância após tratamento térmico

Figura 53: Testes de microdureza Vickers (sem tratamento térmico)

Figura 54: Testes de microdureza Vickers (com tratamento térmico)

Figura 55: Espessura e rugosidade (sem tratamento térmico)

Figura 56: Espessura e rugosidade (com tratamento térmico)

## LISTA DE IMAGENS

Imagem 1: Foto do Campus I da UFPB/CT para geolocalização das coordenadas

Imagem 2: Vista em corte de um coletor solar de placa plana

Imagem 3: Três amostras de discos delgados, sobre uma página impressa para mostrar as diferenças em termos de características de transmitância de luz, o disco a esquerda é transparente, o disco do centro é translúcido e o disco da direita é opaco. Todos feitos com a mesma matéria-prima (óxido de alumínio), porém, com estruturas e processamentos diferentes.

Imagem 4: Micrografia eletrônica (2000x) do chip de circuito integrado onde podem ser observadas as regiões das interconexões de alumínio.

Imagem 5: fotos de placas de granito e peso específico  $\text{kg/m}^3$

Imagem 6: Placa de aço inoxidável AISI 304 (30mm x 30mm x 0,55mm)

Imagem 7: Fotomicrografia do filme Fb (com tratamento térmico) 500x

Imagem 8: Telas *screen printing* #43 e #61 fios/cm

Imagem 9: Aço inox 304 com rugosidade (ranhuras) e deposição de A3

Imagem 10: Aço inox 304 liso e deposição de A3

Imagem 11: Deposição de A3 com adesivo Araldite x cola térmica e com telas 43 fios x 61 fios, no aço inoxidável 304. sem tratamento térmico e com tratamento térmico

Imagem 12: Micrografia MEV (Fa) sem tratamento térmico

Imagem 13: Micrografia MEV (Fb) sem tratamento térmico

Imagem 14: Micrografia MEV (Fc) sem tratamento térmico

Imagem 15: Micrografia MEV (Fd) sem tratamento térmico

Imagem 16: Micrografia MEV (Fa) com tratamento térmico

Imagem 17: Micrografia MEV (Fb) com tratamento térmico

Imagem 18: Micrografia MEV (Fc) com tratamento térmico

Imagem 19: Micrografia MEV (Fd) com tratamento térmico

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Irradiação solar no plano horizontal para a cidade de João Pessoa – Pb
- Tabela 2: Propriedades físicas alumínio x aço x cobre
- Tabela 3: Propriedades físico-químicas do aço inoxidável AISI 304
- Tabela 4: Especificações para granito ABNT-ASTM
- Tabela 5: Amostras x percentuais dos materiais
- Tabela 6: Telas para *screen printing* 43 e 61 fios/cm x características técnicas
- Tabela 7: Características dos adesivos testados como aglomerantes
- Tabela 8: Granulometria da matéria-prima seca
- Tabela 9: Índices percentuais médios dos minerais presentes no granito puro e no RRO (A1)
- Tabela 10: Resumo dos dados detalhados nos gráficos de análises térmicas TGA x DSC
- Tabela 11: Valores da absorvância antes x após tratamento térmico
- Tabela 12: Teste microdureza de Vickers – (sem tratamento térmico)
- Tabela 13: Teste microdureza de Vickers – (com tratamento térmico)
- Tabela 14: Espessura média x rugosidade média (sem tratamento térmico)
- Tabela 15: Espessura média x rugosidade média (com tratamento térmico)

## LISTA DE SIGLAS

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano de Ferro e Aço)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Associação Americana de Testagem e Materiais)

BEN – Balanço Energético Nacional

CCEN – Centro de Ciências Exatas e da Natureza

CEAR – Centro de Energias Alternativas e Renováveis

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CPVC – Cloreto de Polivilina Clorado

CRESESB – Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito

CT – Centro de Tecnologia

DRX – Difração de Raios-X

DSC – *Differential Scanning Analysis* (Calorimetria Exploratória Diferencial)

DTG – Termogravimetria Derivada

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPS – *Expanded Polystyrene* (Polistireno Expandido – Isopor)

FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier)

GMNS – Grupo de Nanoestruturas Magnéticas e Semicondutoras

GPS – *Global Positioning System* (Sistema Global de Posicionamento)

HPS – Horas de Sol por Dia

IACS – *International Annealed Copper Standard* (Padrão Internacional de Cobre Recozido)

ICTAC – *International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry* (Confederação Internacional de Análise Térmica e Calorimetria)

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente  
IUGS – *International Union Geological Sciences* (União Internacional de Ciências Geológicas)

ITSD – *Indirect Type Solar Dryer*

LabFilm – Laboratório de Filmes Finos

LaCom – Laboratório de Combustíveis e Materiais

LCM – Laboratório de Material Cerâmico

MAUD – *Material Analysis Using Diffraction* (Análise de Materiais Usando Difração)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

ONU – Organização das Nações Unidas

PPCEM – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

PTC – *Parallel Tubes Collectors* (Tubos Absorvedores Paralelos)

QAPF – Quartzo, Feldspatos alcalinos, Plagioclásios, Feldspatóides.

RRO – Resíduo de Rochas Ornamentais

STC – *Serpentine Tube Collectors* (Tubo Absorvedor em Serpentina)

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

TGA – *Thermogravimetry Analysis* (Análise termogravimétrica)

TPPC – *Two Parallel Plate Collectors* (Placa Paralela com Dois Coletores)

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## SUMÁRIO

### 1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação . . . . .	18
1.2 Objetivo geral . . . . .	21
1.3 Objetivo específico . . . . .	21

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Radiação solar e solalimetria . . . . .	22
2.2 Superfícies seletivas . . . . .	28
2.3 Coletor solar . . . . .	34
2.3.1 Modelagem física . . . . .	38
2.4 Metais aplicados nos substratos . . . . .	39
2.4.1 Propriedades óticas dos metais . . . . .	39
2.4.2 Substrato de alumínio . . . . .	42
2.4.3 Substrato de Aço inoxidável 304 . . . . .	44
2.4.4 Substrato de cobre . . . . .	47
2.5 Estudos sobre o granito . . . . .	48
2.6 Potência e calor . . . . .	50
2.7 Propriedades da Radiação . . . . .	51
2.7.1 Cálculo da eficiência do coletor solar . . . . .	52
2.7.2 Refração da Luz – Lei de Snell . . . . .	53
2.7.3 Cálculo do índice de refração . . . . .	55

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais . . . . .	57
3.2 Preparação das amostras . . . . .	58
3.3 Preparação do substrato . . . . .	60
3.4 Deposição dos filmes . . . . .	61
3.5 Tratamento térmico . . . . .	62
3.6 Caracterização dos pós e dos filmes . . . . .	63
3.6.1 Granulometria dos pós . . . . .	63
3.6.2 Difração de Raios – X (DRX) . . . . .	63
3.6.3 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) . . . . .	65
3.6.4 Análise térmica TGA/DSC . . . . .	66
3.6.5 Análises de UV-Vis dos filmes . . . . .	67
3.6.6 Difratometria (DRX) dos filmes . . . . .	68
3.6.7 Perfilometria dos filmes . . . . .	68

3.6.8 Microdureza dos filmes .....	68
3.6.9 Microscopia de varredura (MEV) dos filmes .....	70
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	
4.1 Granulometria do resíduo .....	72
4.2 Resultados da FTIR .....	73
4.3 Análises térmicas: DSC e TGA .....	74
4.3.1 Análise térmica da amostra A1 .....	74
4.3.2 Análise térmica da amostra A2 .....	75
4.3.3 Análise térmica da amostra A3 .....	77
4.3.4 Análise térmica da amostra A4 .....	78
4.3.5 Análise térmica da amostra A5 .....	80
4.4 Difração de raios-X (DRX) .....	81
4.4.1 DRX dos pós .....	81
4.4.2 DRX dos filmes sem tratamento térmico .....	83
4.4.3 DRX dos filmes com tratamento térmico .....	84
4.5 Efeito da adição de óxidos na matéria-prima e sua influência na absorvidade dos filmes produzidos .....	85
4.6 Efeito do tratamento superficial do substrato na absorvidade dos filmes produzidos .....	86
4.7 Efeito da deposição na absorvidade dos filmes produzidos .....	86
4.8 Efeito do tratamento térmico na absorvidade dos filmes produzidos .....	90
4.9 Efeito do tipo do adesivo na aderência dos filmes produzidos aos substratos .....	92
4.9.1 Testes de microdureza .....	92
4.9.2 Perfilometria: espessura x rugosidade (sem tratamento térmico) .....	94
4.9.3 Perfilometria: Espessura x rugosidade (com tratamento térmico) .....	97
4.9.4 Microscopia de varredura (MEV) dos filmes (sem tratamento térmico) .....	99
4.9.5 Microscopia de varredura (MEV) dos filmes (com tratamento térmico) .....	100
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	103
<b>Referências</b> .....	105

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

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 hidroelétrica, que atendendo as necessidades dos consumos industrial, residencial e comercial. No entanto, em alguns períodos do ano – com o baixo nível dos reservatórios há um déficit entre a geração e o consumo de energia elétrica, esse 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 hidroelétricas.

A empresa de pesquisa energética – EPE, publicou o balanço energético nacional BEN (2023, ano base 2022, p.14), onde apresenta a relação setorial no consumo de eletricidade: Industrial 37,3%; Residencial 27%; Comercial 16,6%; Público 7,6%; Setor energético 6,1%; Agropecuário 5,5% e Transportes 0,3%.

O BEN (2023, ano base 2022, p.15), apresenta 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%.

Estudo do IEMA (2022, p. 5-6), mostra que o Brasil possui 82 usinas, movidas a combustíveis fósseis, que geraram 95,8 TWh de energia elétrica em 2021. Sendo 68,9 TWh produzidos a partir do gás natural (44 plantas), o que corresponde a 72% do total. O segundo em participação, o carvão mineral (8 plantas) foi responsável pela geração de 16,5 TWh, o que representa 17% da produção de eletricidade fóssil. Já o óleo combustível (18 plantas) e o óleo diesel (11 plantas), derivados de petróleo, tiveram participação de 9% e 2%, respectivamente. Uma única planta gerou eletricidade utilizando o gás de refinaria como combustível principal, tendo participação muito baixa em relação ao total inventariado. O referido estudo mostrou que em 2021, essas usinas termelétricas juntas emitiram 55,6 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera.

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 a 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 com menor fonte de renda.

O Brasil está localizado na sua maior parte na região intertropical, sendo assim, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante o ano todo. Analisando-se a médio e longo prazos a utilização e aplicação da energia solar em aquecedores solares poderá trazer grandes benefícios.

Nesse contexto justifica-se a importância de pesquisar novos materiais de baixo custo para aplicação em superfícies seletivas de coletores solares, com a utilização do resíduo de rochas ornamentais – RRO, adicionados ao óxido de cobre (CuO) como potencializador da condutividade térmica, carbeto de silício (SiC) como endurecedor e outros materiais para melhorar a plasticidade na manipulação e na cura após a deposição do (filme) – superfície seletiva – no substrato de aço inoxidável AISI 304.

O cobre, na zona oxidada, está associado aos minerais de sulfeto de cobre, presente no mineral bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) – utilizado nesta pesquisa – cuja composição contém 63,3% de cobre, será responsável pelo aumento da condutividade térmica do filme aplicado na superfície seletiva de aço inoxidável AISI 304; 11,1% de ferro, será responsável pela cor preta que reduz a refletividade do filme aplicado no substrato de aço inoxidável AISI 304; o carbeto de silício.

A destinação do resíduo sólido oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais como granito, mármore e quartzitos, têm sido uma preocupação ambiental permanente em termos de sustentabilidade, tanto para as empresas beneficiadoras como para os governos, tendo em vista a potencial probabilidade de contaminação do meio ambiente, do solo e poluição do ar.

Mensurar a sustentabilidade não é algo fácil, no entanto Mibielli e Barcellos (*apud* MAY, 2018), dissertaram sobre as diversas maneiras de mensurar a sustentabilidade mesmo sabendo que, pelo atual estado da arte, a sustentabilidade é imensurável ou de difícil mensuração. De acordo com os autores “A abordagem discorre sobre a necessidade do uso de um marco referencial que, mesmo de forma parcial, possibilite obter medidas de aproximações sobre a sustentabilidade, úteis para o planejamento e implementação de políticas.” Entre os indicadores sugerem: Bem-Estar, de Crescimento Verde, dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

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 esta energia térmica para promover o aquecimento de um fluido.

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

Os sistemas de aquecimento solares de baixa temperatura atendem às demandas de edificações destinadas a habitação, no entanto existem outros potenciais utilizadores: agricultura, escolas, hospitais, hotéis, residências, indústria alimentar, indústria química, indústria têxtil, lavanderias, piscinas internas e quartéis.

De acordo com ARAÚJO<sup>(a)</sup> (2020), nos primórdios, quando se percebeu que a cor preta tinha maior capacidade de absorver a energia térmica do sol, em relação às demais, as primeiras superfícies seletivas propostas para coletores solares térmicos eram basicamente pinturas na cor preta.

Os coletores solares trabalham com transferência de calor, portanto deve-se considerar as perdas térmicas nos balanços de energia. Conforme explica ARAÚJO<sup>(a)</sup> (2020), as perdas ocorrem, devido à reflexão e à emissão de radiação nas placas absorvedoras, estando ligadas, respectivamente, à refletividade e à emissividade, que são propriedades térmicas do material que as compõe.

Esta pesquisa foi baseada em sistemas de aquecimento solar de baixa temperatura para a aplicação em unidades habitacionais recomendados para a demanda popular os quais requerem temperatura de até 80°C, conforme estabelece a NBR 7198/1993.

Para o dimensionamento de um sistema de aquecimento solar vários fatores deverão ser observados, pois o fornecimento de energia solar varia em função do local onde o coletor está instalado, horário e condições atmosféricas; também é necessário conhecer as quantidades de consumo, o perfil de consumo por tipo de habitação e a temperatura desejada para a água quente.

De acordo com a Organização das Nações Unidas - ONU, reportado pela SABESP, “cada pessoa necessita de 3,3 mil litros de água fria por mês (cerca de 110 litros por dia para atender suas necessidades de consumo e higiene).” No Brasil, a ABNT/NBR nº 5626/1998, item 5.2.5, recomenda a instalação de reservatório de água fria mínimo de 500L. Considerando que o consumo médio residencial *per capita* pode chegar a 200 litros/dia, dependendo do padrão da habitação (baixo, médio ou alto). Casas populares ou rurais: 120L/pessoa/dia; Residências: 150L/pessoa/dia; Apartamentos: 200L/pessoa/dia.

No caso do fornecimento de água quente para uma habitação unifamiliar, por exemplo, há alguns fatores a considerar, caso seja apenas para consumo de banho, no ponto do chuveiro, a NBR 15.569/2020, (anexo C, p.40) estima, conforme o padrão da habitação, o consumo de 3L a 15L/min, recomendando calcular o volume do consumo de água quente.

A temperatura da água armazenada no reservatório (*boiler*) pode atingir 80°C. A esse nível de temperatura deverá ser feito o teste de estanqueidade do sistema conforme recomendações da NBR 7198/1993, item 6.1.1.1. No entanto, considerando as perdas térmicas provocadas pela distância da tubulação entre o reservatório e o ponto de consumo, a água quente deverá chegar no ponto de banho na temperatura entre 39°C a 40°C, caso a temperatura da água quente seja maior que 40°C é recomendado a utilização de misturadores de água fria com a água quente, conforme recomendações da norma acima citada, item 5.3. Neste caso o projeto deverá contemplar uma rede de água fria e uma rede de água quente.

Esta pesquisa propôs desenvolver novos materiais para aplicação em superfície seletiva absorvedora de calor, para aplicação em substrato metálico de aço inoxidável AISI 304. Por deposição do resíduo de rochas ornamentais graníticas (RRO) e outros materiais.

## **1.2 Objetivo geral**

Avaliar o potencial de aplicação do resíduo de rochas ornamentais graníticas com formulação de óxido de cobre e outros materiais – carbetos de silício e adesivos – para aplicação em superfície seletiva de coletor solar de placa plana.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Avaliar a influência dos revestimentos aplicados nos substratos de aço inoxidável AISI 304 em relação a absorvância das superfícies produzidas;
- Estudar os compósitos das camadas dos revestimentos e seu efeito na morfologia e na microestrutura das superfícies produzidas;
- Estudar o efeito do tratamento térmico na morfologia, microestrutura e na absorvância das superfícies produzidas antes e depois da sinterização;
- Comparar as propriedades físicas dos substratos existentes no mercado – em alumínio e cobre – com o substrato de aço inoxidável 304.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Radiação solar e solarimetria

Para compreender os processos de geração de energia solar térmica se faz necessário conhecer as noções gerais sobre solarimetria, georreferenciamento e meteorologia considerando que o termo energia solar faz referência à energia proveniente da luz e do calor do Sol. Há diferentes tecnologias para captação da energia solar como, por exemplo, o aquecimento solar, a energia solar fotovoltaica, a energia solar térmica ou heliotérmica, a arquitetura solar e a fotossíntese artificial.

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

Para avaliar a potência específica da radiação solar que atinge a superfície da Terra utiliza-se a lei da radiação esférica, expressa pela seguinte equação:

$$I_{Terra} = I_{Sol} \times \left[ \frac{R_{Solar}}{D_{Sol-Terra}} \right]^2 \quad (01)$$

Onde:

$R_{Solar}$  – raio solar médio,  $\sim 6,95 \times 10^5$  km;

$D_{Sol-Terra}$  – distância do Sol à Terra,  $\sim 149,6 \times 10^6$  km

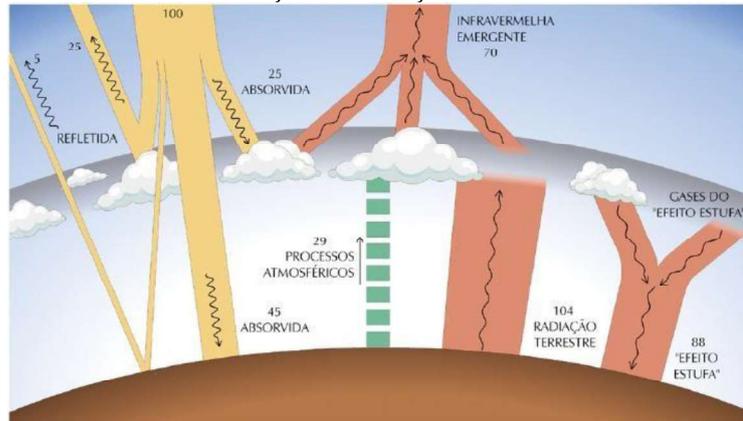
Aplicando a equação acima chega-se à potência específica estimada em  $1.353 \text{ W/m}^2$  – denominada de constante solar, que corresponde à integração do espectro de emissão em todo o domínio.

“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).

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

PEREIRA *et al.* (2017, p.17), estimam que do total dessa radiação, 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. Conforme se apresenta na Figura 1.

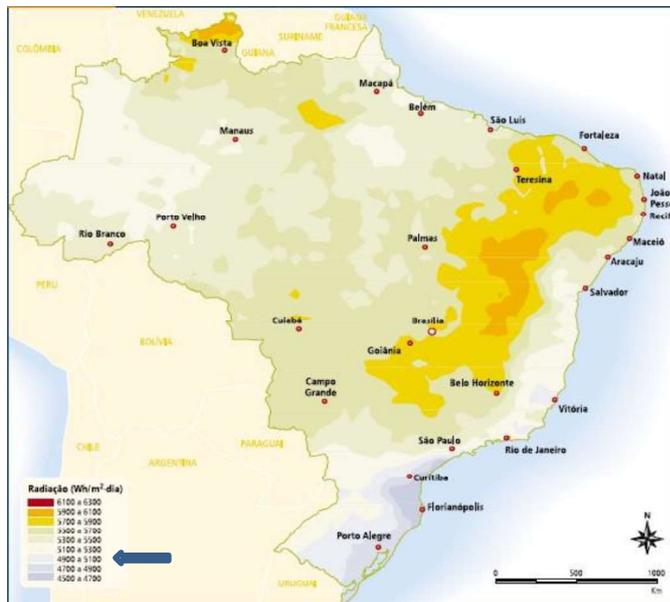
Figura 1: Processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.



Fonte: PEREIRA *et al* (2017, p.17).

Ao analisar o mapa brasileiro de radiação solar global horizontal, verifica-se, por exemplo, que a cidade de João Pessoa, estado da Paraíba, recebe radiação solar média anual entre 5,3 e 5,7 Kwh/m<sup>2</sup>xdia, esse indicador potencializa a transformação da energia solar fotovoltaica em energia elétrica e em energia solar térmica em vários pontos da cidade, conforme apresenta-se na Figura 2.

Figura 2: Mapa Solarimétrico do Brasil – média anual de radiação solar wh/m<sup>2</sup>xdia



Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil. UFPE (2000). Adaptado pelo autor.

Na instalação de coletores solares e painéis solares deve-se considerar os aspectos geográficos como altitude, latitude, pontos de sombreamento provocados por serras, morros, vales, árvores, edificações. Alguns componentes da atmosfera terrestre como, por exemplo, o vapor d'água, poeiras, dióxido de carbono e o ozônio influenciam no desempenho dos coletores solares.

Além de observar as condições atmosféricas é recomendável observar os aspectos meteorológicos como nebulosidade, umidade relativa do ar, chuvas, velocidade e direção dos ventos.

MAGNOLI e SCALZARETTO (1998) descreveram que o período de luminosidade do Sol, varia em algumas regiões e períodos do ano, de zero hora (Sol abaixo da linha do horizonte o dia todo) às 24 horas (Sol acima da linha do horizonte o dia todo), os autores explicam que as variações são mais intensas nas regiões polares e nos períodos de solstício. E que, o inverso ocorre próximo à linha do Equador durante os equinócios.

De acordo com PINHO *et al.* (2014, p.70), a declinação solar pode ser calculada diariamente a partir da latitude, positiva ao Norte do Equador e negativa ao Sul do Equador. A diferença entre a declinação – em relação à linha do Equador – e, a latitude – onde está instalado o coletor solar ou painel solar – determina a trajetória do Sol para um determinado dia em uma dada localidade da Terra.

A declinação solar diária – em graus – pode ser calculada com a equação:

$$\text{sen}(\delta) = 23,45 \times \text{sen} \left[ \left( \frac{360}{365,25} \right) (NDA - 80) \right] \quad (02)$$

Onde: NDA representa o nº do dia do ano, no calendário Juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1 de janeiro (Ex.: 01/jan → NDA=1; 02/jan → NDA=2;...; 31/dez → NDA=365)

Figura 3: Incidência dos raios solares na Terra durante solstícios e equinócios.

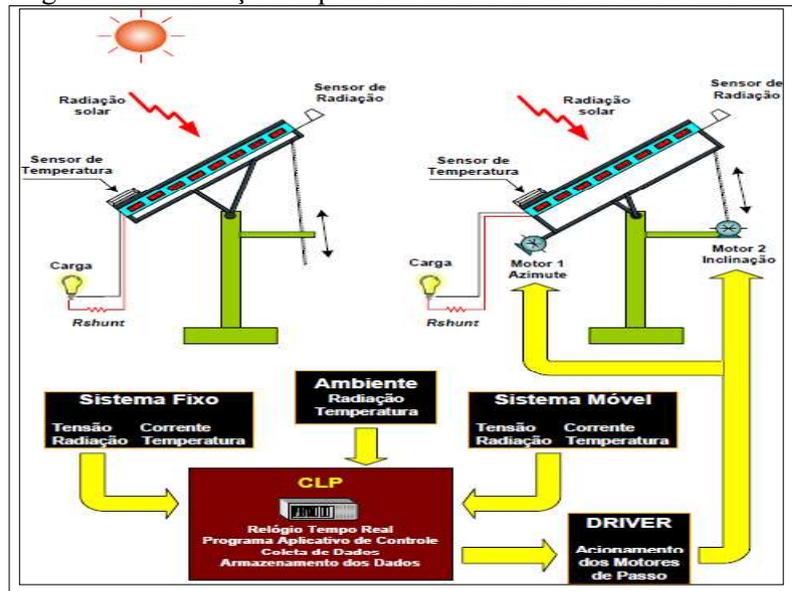


Fonte: Fraternidade Rosacruz (2022)

Segundo ALVES (2008), tendo em vista as variações na posição geográfica da Terra durante o movimento de translação em torno do Sol, foram desenvolvidas técnicas de eixo para o melhor aproveitamento da luz do sol nos painéis fotovoltaicos, que podem ser aplicadas também nos coletores solares, classificando-as nos seguintes sistemas: fixo, semi-fixo e móvel (ou rotatório).

Na instalação de coletores solares ou painéis solares com qualquer uma das técnicas apresentadas na Figura 5, recomenda-se a consulta de dados de georreferenciamento da posição exata onde eles serão instalados.

Figura 4: Diagrama de instalação de painéis-coletores em sistema fixo-semifixo e móvel.



Fonte: ALVES, 2008, p.87.

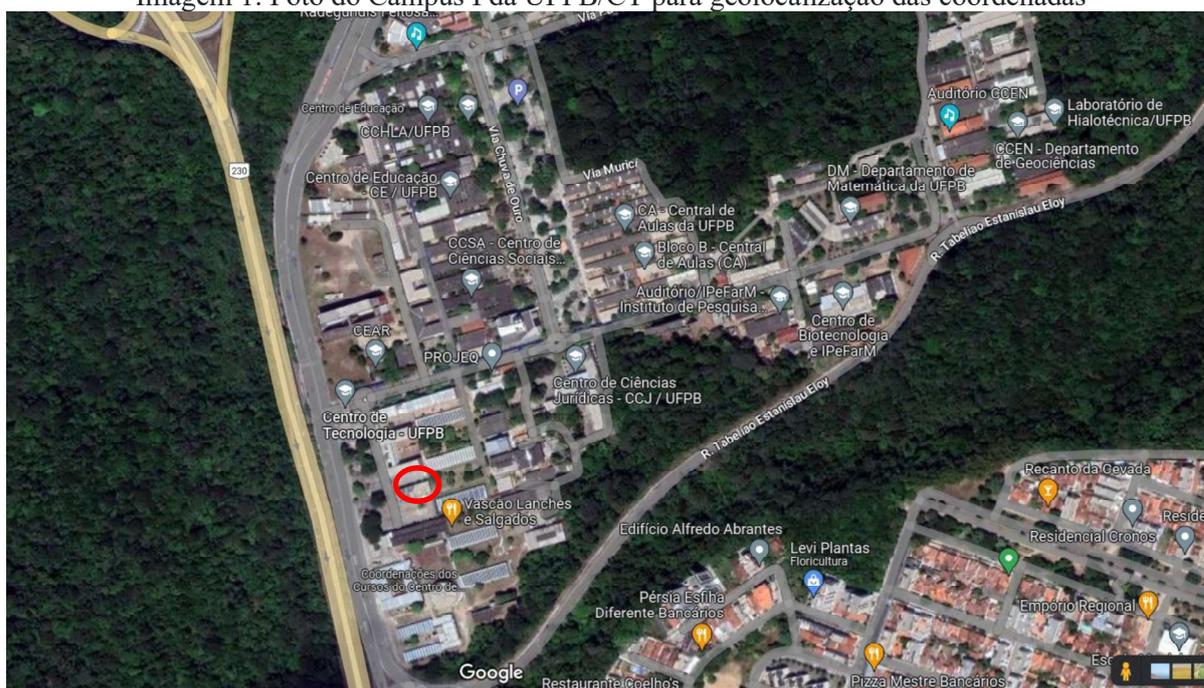
No Brasil, recomenda-se buscar dados do Satélite *SunData*, mantido pelo Governo brasileiro, através do CRESESB – Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito, o qual dispõe de Base de Dados de radiação solar incidente (irradiação solar) que pode ser consultada gratuitamente a partir das coordenadas geográficas de Latitude e Longitude do local onde serão instalados os painéis ou coletores solares. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>

Para exemplificar o procedimento de coleta de informações da irradiação solar, ( $\text{KWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ ), obtida no *Google Maps* a imagem parcial do Campus I da UFPB – Centro de Tecnologia – CT – na cidade de João Pessoa, Paraíba, com a localização por georreferenciamento, através de GPS, obtendo as coordenadas 7.142597 S e 34.850505 O, com graus em decimais, as quais foram digitadas no aplicativo do satélite do CRESESB/CEPEL, no site disponibilizado no parágrafo anterior.

Após busca no site do CRESESB/CEPEL, em 16 de março de 2023, com as coordenadas da localização, foi obtida a tabela com os valores mensais e média anual da irradiação solar diária média ( $\text{KWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ ).

O local no mapa foi editado com círculo vermelho, conforme apresentado na Imagem 1.

Imagem 1: Foto do Campus I da UFPB/CT para geolocalização das coordenadas

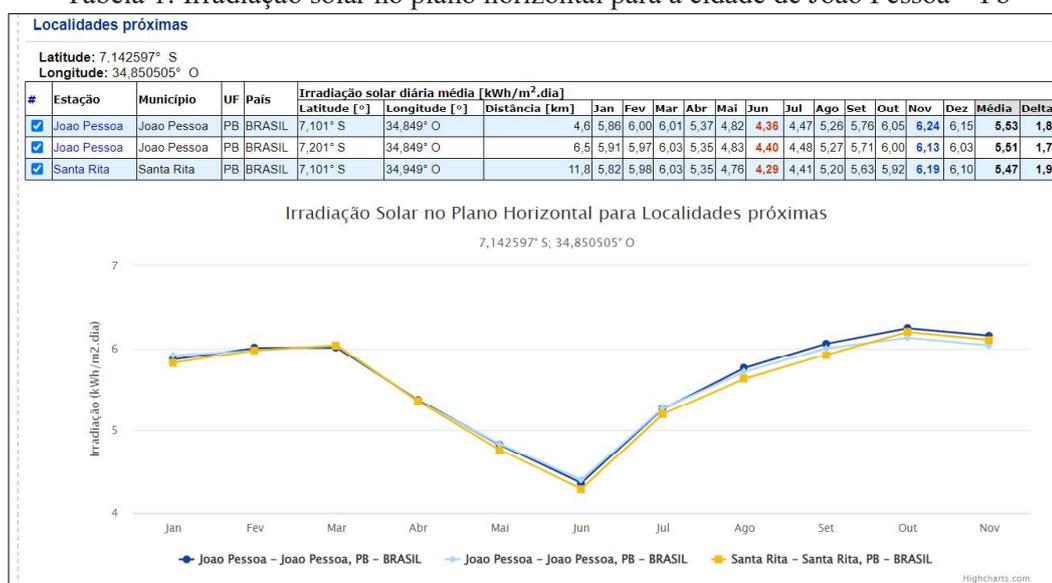


Fonte: *Google Maps*, acesso em 1/02/2023. Editado pelo autor.

Há regiões na Terra em que a insolação pode chegar a 12 h/dia, mas de acordo com Tiba *et al.* (2000, p.89) a média anual de insolação no litoral da Paraíba é de 8 h/dia. Então na equação ( $\text{KWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ ), a variável dia corresponde a 8 horas, em média, sendo que das 8 horas de insolação há variações em função da posição da Terra em relação ao Sol, por causa dos seguintes fatores: ângulo solar, hora solar, condições atmosféricas (nebulosidade, chuvas, cinzas volantes etc.), localização dos painéis ou coletores solares e sombras. Considerando essas variações e para aprimorar o dimensionamento dos projetos tanto para energia solar térmica, quanto para energia solar fotovoltaica, em determinados horários do dia, pode-se adotar a terminologia ( $\text{KWp/m}^2 \cdot \text{hora}$ ), que significa Kilowatts pico, por metro quadrado, multiplicado pela quantidade de horas de sol pleno.

Na Tabela 1 constam os valores referentes a leitura no ponto tecnicamente viável para a instalação de coletor solar conforme exemplificado no círculo vermelho da Imagem 1 e a distância até a(s) estação(ões) meteorológicas, localizadas na cidade de João Pessoa – Pb e localidades próximas e o gráfico gerado para irradiação solar no plano horizontal.

Tabela 1: Irradiação solar no plano horizontal para a cidade de João Pessoa – Pb



Fonte: obtida pelo autor, via satélite. <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>

Conhecendo os valores médios de irradiação anual, para o plano horizontal, sabendo que  $5,53 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$  é igual a  $5.530 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$ , por exemplo, é possível calcular a quantidade de HSP – Horas de Sol Pleno por dia, considerando a irradiação padronizada de  $1000 \text{ W/m}^2$ , aplicando a seguinte equação:

$$HSP = \left( \text{média} \times \frac{[Wh]}{[m^2] \times [dia]} \right) / \left( 1000 \times \frac{[W]}{[m^2]} \right) \quad (03)$$

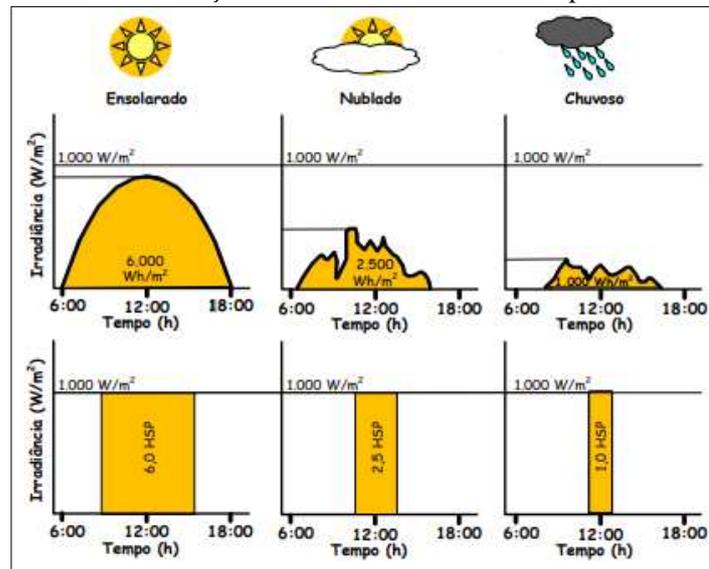
$$\left( \text{média} \times \frac{[Wh]}{[m^2] \times [dia]} \right) / 1000 \frac{[W]}{[m^2]} = \left( 5530 \times \frac{[Wh]}{[m^2] \times [dia]} \times \frac{[m^2]}{[W]} \right) / 1000 = 5,53 \text{ [h]/[dia]} = 5,53 \text{ HSP/dia}$$

Observa-se que o resultado obtido é idêntico à média contida na primeira linha da tabela 1, então pode-se concluir que o valor médio, em  $(\text{KWh/m}^2 \cdot \text{dia})$ , dividido por  $1000 \text{ (W/m}^2)$ , corresponde ao total de Horas de Sol Pleno – HSP / dia.

De acordo com HUDSON; MARKELL (1985), em dias nublados toda radiação disponível é difusa, no entanto nos dias ensolarados, apenas 10% da radiação que atinge a superfície terrestre é difusa.

A variação diária da irradiação solar pode oscilar em função de dia ensolarado, dia nublado e dia chuvoso. A Figura 5 facilita a compreensão da grandeza Horas de Sol Pleno – HSP.

Figura 5: Perfis de radiação solar diária com valores equivalentes em HSP.



Fonte: PINHO *et al.*, (2014, p.301).

Conhecendo os procedimentos para efetuar os cálculos de horas de sol pleno e as informações sobre irradiância o projetista poderá fazer ajustes e correções na inclinação e orientação de coletores solares e painéis solares para melhorar o desempenho energético, caso estes sejam instalados em telhados, coberturas de edifícios e em terrenos com acentuado declive.

Os ajustes e correções da declividade poderão ser calculados com a utilização de softwares específicos. Por exemplos: PV Syst, Solergo e RadiaSol.

## 2.2 Superfícies seletivas

Superfícies seletivas são aquelas que apresentam parâmetros de absorção e emissão adequados. “A superfície seletiva é geralmente composta por um filme fino aplicado sobre um substrato condutor térmico, podendo ser precedido por uma camada antioxidante e sucedido por uma camada antirreflexiva, em contato direto com o ambiente.” DUTRA (2022, p.25).

Abed *et al.* (2020), apud ARAÚJO<sup>(a)</sup> (2020) utilizaram nanomateriais (CuO: NiO), dopados com carbono para produzir superfície seletiva com um revestimento de baixo custo e com alta eficiência de absorção. De acordo com os autores as propriedades ópticas foram investigadas por espectroscopia de UV e por testes de refletividade, na faixa de 250 a 1300nm, em temperatura ambiente. A análise ótica mostrou que os filmes finos de nanocompósitos possuem boa morfologia da superfície cristalina.

De acordo com MEDEIROS (2016, p.7), superfícies seletivas são “revestimentos

depositados sobre placas absorvedoras de radiação solar, que permitem um máximo de absorptância no espectro solar enquanto mantêm um mínimo de emitância no infravermelho.”

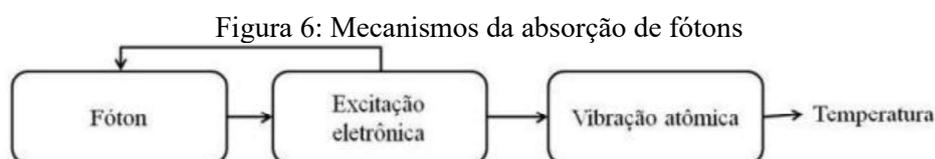
Segundo KREITH *et al* (2014, p.4-5) ao mencionarem os mecanismos de transferência de calor enfocam que a literatura referente à transferência de calor geralmente reconhece três modalidades distintas de transmissão de calor: condução, radiação e convecção. No entanto, apenas condução e radiação devem 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 porque sua operação também depende do transporte mecânico em massa. Entretanto, considerando que a convecção também realiza transmissão de calor de regiões de maior temperatura para regiões de menor temperatura, o termo “transferência de calor por convecção” torna-se geralmente aceito.

No Brasil, a norma técnica NBR 15.220/2005, define absorptância como o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície, pela taxa de radiação solar incidente sobre essa mesma superfície. Por outro lado, a emitância é a quantidade de energia, na forma de radiação eletromagnética, emitida pela superfície de um corpo, por segundo e por unidade de área.

“A exigência principal de um revestimento para absorção solar é a seletividade espectral, característica de uma superfície cujas propriedades de absorptância, emitância e refletância variam nas regiões da radiação solar e da radiação infravermelha térmica.” Gomes (2001), apud RODRIGUES (2014, p.15-16).

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.

Schmidt *et al* (2004), apud ARAÚJO<sup>(c)</sup>, ao explicarem a Lei de Kirchoff dissertam que “quando um fóton que incide num átomo que tem elétrons com energia correspondente para um possível salto naquela matéria, ocorre a excitação eletrônica.” Conforme se apresenta na Figura 6.



Fonte: Adaptado de Miranda *et al.* (2004), apud ARAÚJO<sup>(c)</sup>, (2014, p.30)

Outro aspecto relevante é conhecer o valor da emissividade dos materiais, sabendo que os valores variam de  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  e que é a medida de quanto uma superfície de um corpo comum se aproxima de um corpo negro à mesma temperatura e comprimento de onda.

Por exemplo, a emissividade do óxido de cobre (preto) é  $\sim 0,88$  e da areia (sílica) é  $\sim 0,90$ . À temperatura de 300K ou 27°C.

“A seletividade ( $s$ ) de uma superfície seletiva é caracterizada pela razão entre a absorvidade na faixa espectro visível ( $\alpha$ ) e a emissividade na faixa do espectro infravermelho ( $\varepsilon$ ), conforme equação.” (RODRIGUES (2014, p.15-16).

$$s = \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (05)$$

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

De modo geral pode-se dizer que uma superfície seletiva ideal é aquela cuja absorbância é máxima na região do espectro visível e mínima na região do infravermelho. Conforme se apresenta na Figura 7.

Figura 7: Perfil de absorbância de superfície seletiva ideal



Fonte: Adaptado de (KENNEDY, 2002; PETITJEAN; VANDER POORTEN, 1980; PRANESH; VELRAJ; CHRISTOPHER; KUMARESAN, 2019). Apud SILVA (2020, p.7).

“Em aplicações práticas na geração de energia solar térmica, para utilização de uma superfície seletiva, é necessário o conhecimento das propriedades radiativas do material a ser aplicado, a fim de conduzir a placa absorvedora à absorver bem a radiação no espectro solar (ultravioleta e visível) e, ao mesmo tempo, tenha uma baixa emissividade no infravermelho.” (SOUZA et al., 2020, p.117).

Na deposição dos compósitos no substrato são utilizados vários métodos, por exemplos, *sputtering deposition*, *screen printing*, pintura industrial, *dip coating*, *spin coating* etc. Alguns desses métodos entregam uma superfície bruta que em alguns casos necessitam de tratamento superficial para um melhor acabamento ou até mesmo para a uniformização e redução da

espessura do filme.

Como exemplo de materiais compósitos citam-se os cermets que segundo MARTINS, (2010, p.15), “são compósitos formados por material metálico e material cerâmico, podendo qualquer um dos dois constituir a matriz do compósito.”

Figura 8: Desenho esquemático dos tipos de tratamentos para superfícies seletivas solares



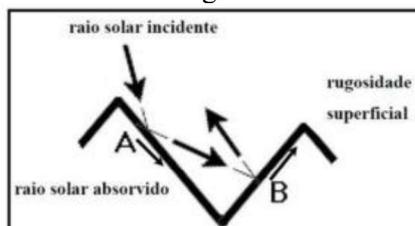
Fonte: Adaptado de KENNEDY, 2002, p.5. Apud GONÇALVES (2021, p.25)

A deposição do compósito na superfície seletiva vai resultar num filme fino com superfície densa, no entanto por maior que seja a densidade, imagens de microscopia ótica e de microscopia eletrônica, com amplitudes de 2000x a 5000x, mostram que haverá sempre um certo grau de rugosidade.

A NBR ISO 4287:2002, define que “historicamente, o perfil de rugosidade e seus parâmetros têm sido as únicas partes da caracterização da rugosidade superficial que estão bem definidos.” Portanto, são apresentados neste tópico, alguns conceitos acerca da rugosidade nas superfícies seletivas com informações acerca dos parâmetros e amplitude de picos e vale. De acordo com Sade (2011), apud GONÇALVES (2021, p.29) um aumento na rugosidade pode gerar um aumento na absorção de calor.

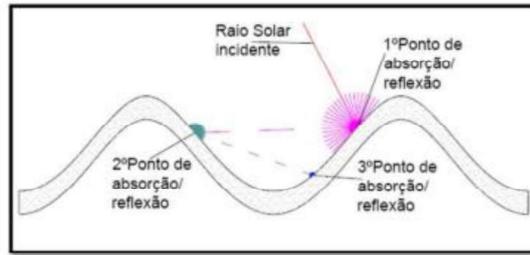
Segundo Roriz *et al.* (2007), apud ARAÚJO<sup>(c)</sup>, a absorptância aumenta conforme aumenta a rugosidade. Os autores também afirmam que as ondulações também são imperfeições que provocam reflexões do feixe de radiação incidente sobre a superfície, aumentando os índices de absorptância. A Figura 9 a seguir mostram graficamente os efeitos da rugosidade e ondulações na absorptância.

Figura 9: Efeito da rugosidade na absorptância



Fonte: Roriz *et al.* (2007), apud ARAÚJO<sup>(c)</sup> (2014, p.29)

Figura 10: Representação das reflexões provocadas pelas ondulações na superfície

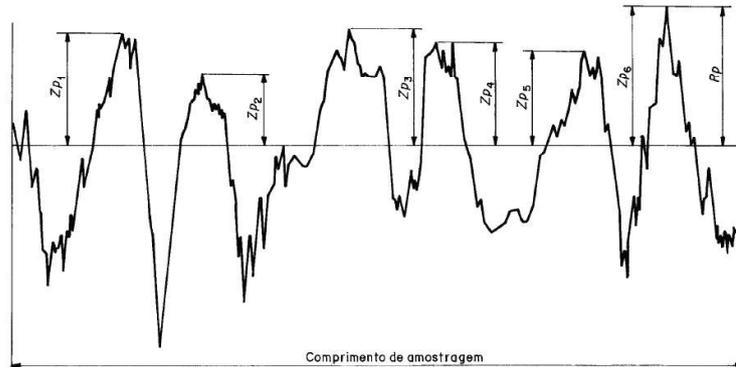


Fonte: Roriz *et al.* (2007), apud ARAÚJO<sup>(c)</sup> (2014, p.29)

É importante conhecer algumas abreviaturas e seus respectivos significados: Ra: desvio médio aritmético do perfil de aspereza (rugosidade); Rp: altura máxima de pico da rugosidade; Rv: altura máxima de vale(poço); Sa: altura média aritmética; Sp: altura máxima de pico; Sv: altura máxima de vale (poço). A seguir são apresentados alguns parâmetros da norma acima para interpretação.

- Altura máxima de picos (Rp): Maior altura dos picos do perfil Zp no comprimento de amostragem. (NBR ISO 4287:2002)

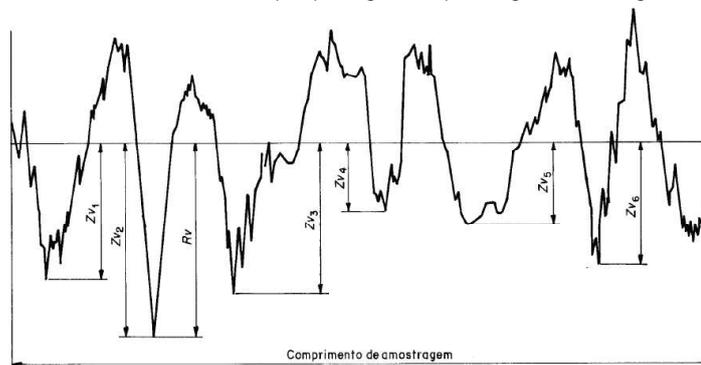
Figura 11: Altura máxima dos picos (Rp) do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)



Fonte: NBR ISO 4287:2002, p.7

- Profundidade máxima do vale do perfil (Rv): Maior profundidade do vale do perfil no comprimento de amostragem. (NBR ISO 4287:2002)

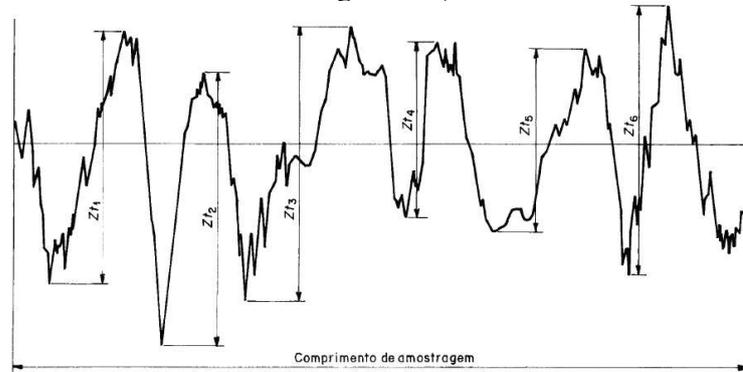
Figura 12: Altura máxima dos vales (Rv) do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)



Fonte: NBR ISO 4287:2002, p.8

- Desvio aritmético médio do perfil avaliado (Ra): Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas Z(x) no comprimento de amostragem. (NBR ISO 4287:2002)

Figura 13: Desvio aritmético médio do perfil avaliado (Ra): do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)



Fonte: NBR ISO 4287:2002, p.8

O valor de Ra poder ser calculado pela seguinte equação:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(X)| dx \quad (04)$$

De acordo com GONÇALVES (2021, p.31), o valor de Sa representa a altura média aritmética da rugosidade e é calculado pela seguinte equação:

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy \quad (05)$$

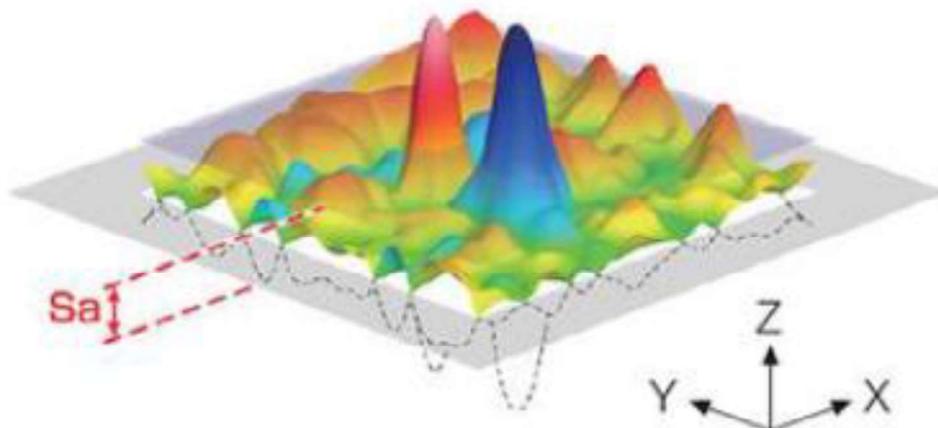
Onde:

A – área da superfície analisada

$Z(x,y)$  | - função que define a altura absoluta de cada ponto da superfície

O parâmetro de Sa é demonstrado na Figura 15, tridimensional:

Figura 14: Representação gráfica do parâmetro rugosidade Sa



Fonte: Adaptado de OLYMPUS (2020). Apud GONÇALVES (2021, p. 31).

### 2.3 Coletor solar

Segundo KALOGIROU (2016) os sistemas solares de aquecimento de água são classificados em sistemas ativos e sistemas passivos capazes de armazenar calor para aquecimento de ar e água. Os sistemas ativos proporcionam a circulação direta ou indireta de água quente, atuados através de bombas que regulam fluxo e vazão, enquanto nos sistemas passivos o desempenho é regulado por termossifão, circulação reversa de água quente rastreada por termossifão.

O termossifão é um aparelho que realiza a convecção da água, no qual as partículas quentes tendem a subir, uma vez que se tornam menos densas, enquanto as partículas frias, mais densas, tendem a descer, ou seja, a água fria no interior da tubulação que passa dentro do coletor solar, é aquecida transformando-se em vapor que sobe, por pressão, para o reservatório instalado logo acima do coletor solar, também conhecido como *boiler*.

O calor pode ser sensível ou latente, na física diz-se que o calor é sensível quando, ao ser fornecido a um corpo, gera apenas variação da temperatura dele. Por outro lado, quando o calor fornecido a um determinado material provocar mudança do seu estado físico, diz-se que é um calor latente.

DAS *et al.* (2021), dissertaram que o sistema de calor sensível (SHS) é o processo de armazenamento de energia que transforma a radiação solar em energia térmica, podendo armazená-la em meio sólido ou líquido, capaz de provocar a excitação de moléculas ou átomos, ou ambos, na forma de energia cinética. Portanto, nenhuma mudança de fase ocorre no sistema SHS, sendo assim, a capacidade térmica volumétrica, as diferenças de temperatura e a massa do meio de armazenamento assumem as funções principais e são caracterizadas quantitativamente pela capacidade de armazenamento de energia ou densidade de energia.

De acordo com PINHO *et al.* (2014, p.48), coletores solares são aquecedores de fluidos – líquidos ou gasosos – são opções alternativas para a redução do consumo de energia elétrica, gás e combustíveis fósseis. São classificados em dois tipos: (a) coletores concentradores; (b) coletores planos.

- a) Coletores concentradores: são aqueles projetados e dimensionados para atender demandas de temperatura entre 100°C até 400°C. Estão associados às aplicações em indústrias e em acionamento de turbinas a vapor para geração de energia elétrica;
- b) Coletores planos: são aqueles projetados e dimensionados para atender demandas de

baixa temperatura, entre 35°C a 60°C, com pico de até 100°C. Geralmente são usados para aplicações residenciais e comerciais, para produzir água quente e ar quente.

Após aquecido, o fluido pode ser armazenado em reservatórios térmicos (*boiler*) para uso em rede de água quente ou em rede de ar quente. Neste trabalho de pesquisa foram estudados os coletores solares de placa plana.

O vidro transparente instalado como tampa do coletor plano tem grande importância na obtenção do efeito estufa no interior dele, melhorando a eficiência desse equipamento, porque permitirá passar a radiação solar e recupera o máximo possível a radiação infravermelha emitida pela superfície absorvedora. BENTIVENHA (2005, p.37), disserta que “a maioria dos vidros transparentes têm um fator de transparência igual a 0,87, ou seja, somente 87% da radiação o atravessa”.

A superfície seletiva consiste na deposição de uma fina camada do compósito ou de tinta preta denominada, corpo negro, com espessura micrométrica variável – quanto mais fina, melhor – aplicada diretamente num substrato metálico, geralmente de alumínio ou de cobre, no entanto nossa pesquisa propôs sua aplicação no substrato de aço inoxidável AISI 304, como alternativa aos substratos de alumínio e cobre aplicados nos coletores solares comerciais.

A superfície seletiva tem as propriedades de um corpo negro, com alta taxa de absorção e com alto coeficiente de emissão para todos os comprimentos de onda.

De acordo com BENTIVENHA (2005, p.34-38), no interior do coletor solar, a radiação emitida pelo absorvedor (superfície seletiva + substrato) é bloqueada pelo vidro, que é relativamente transparente para a radiação solar no espectro do visível, mas não o é para a radiação no espectro do infravermelho, gerada pelo absorvedor, impedindo a passagem de parte dessa emissão, provocando aumento no gradiente de temperatura no interior do coletor solar.

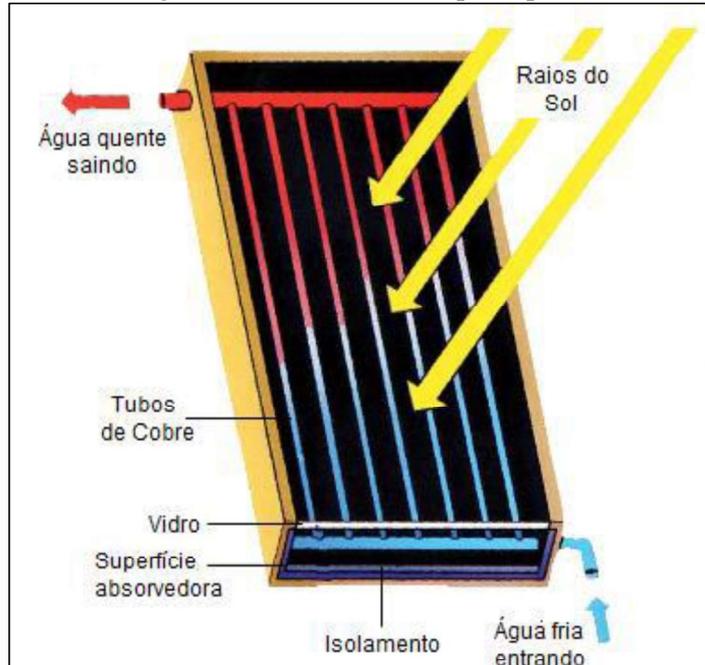
De acordo com BARBOSA<sup>(a)</sup> (2020), a energia solar térmica consiste na transformação da irradiação solar em energia térmica, conhecida como *Concentrating Solar Power (CSP)*. Segundo o autor os coletores solares podem ser concentradores ou coletor plano, este último, por ser mais simples, é mais usado no aquecimento de água para residências, hotéis, academias etc.

Todas as peças de um coletor solar são montadas numa caixa ou carcaça fechada projetada para oferecer o maior rendimento térmico possível.

A Figura 15 representa o modelo do coletor solar de placa plana, com informações

técnicas onde se pode observar os principais detalhes de montagem e materiais utilizados: vidro transparente; superfície absorvedora; tubos absorvedores paralelos; isolante térmico; moldura de vidro e carcaça ou caixa do coletor.

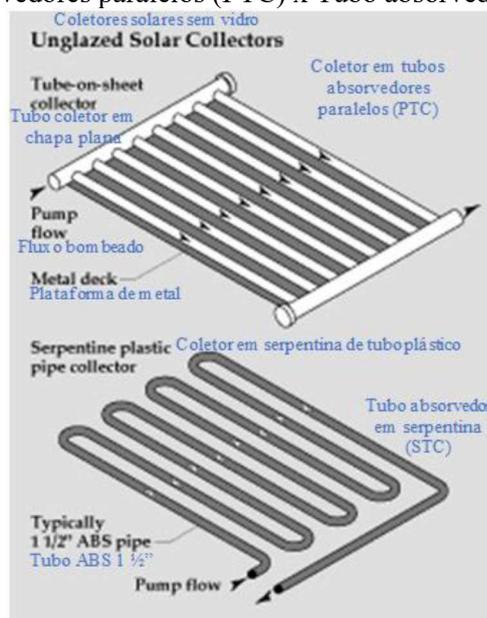
Figura 15: Coletor solar de placa plana



Fonte: Pipe (2016, p.11), apud GONÇALVES (2021, p.22).

Na Figura 16 apresenta-se um diagrama esquemático dos modos de montagem dos tubos absorvedores, que podem ser formatados em tubos absorvedores paralelos (PTC) e tubo absorvedor em serpentina da sigla em inglês (STC).

Figura 16: Tubos absorvedores paralelos (PTC) x Tubo absorvedor em serpentina (STC).



Fonte: US Dept. of Energy (2009). (Adaptado).

Disponível em: [https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento\\_solar](https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento_solar)

Imagem 2: Vista em corte de um coletor solar de placa plana



Fonte: RIEKE (2011). (Adaptado).

Disponível em: [https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento\\_solar](https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento_solar)

Segundo GOEL *et al.* (2021, p.112-147) os coletores solares permitem diversas aplicações, por exemplo, aproveitamento da radiação solar para aplicações térmicas em aquecedor de ar para coleta de ar quente. Os autores apresentam uma revisão bibliográfica com os avanços dos estudos na área de aquecimento solar, tipos de materiais, desempenho e configurações ideais.

Ao relatarem as várias possibilidades dos coletores solares, LINGAYAT *et al.* (2020), descreveram acerca da necessidade de conservação dos produtos agrícolas pós-colheita, pois técnicas de conservação inadequadas e armazenagem deficientes provocam a deterioração da qualidade dos produtos agrícolas, então têm se recorrido às várias técnicas para conservação de tais produtos. De acordo com os autores a secagem solar é uma delas, utilizada para a conservação de produtos alimentícios. A secagem por energia solar térmica é uma técnica antiga de conservação de alimento (por desidratação) e muito utilizada em agroindústrias. Destacam que o secador solar tipo indireto (ITSD – *Indirect Type Solar Dryer*) é um dos tipos mais utilizados para secar produtos alimentícios, na revisão bibliográfica sobre o ITSD relatam achados importantes como os parâmetros mais comuns que afetam a taxa de secagem: temperatura, velocidade do ar, radiação solar, tipo de produto, umidade inicial e massa total do produto. Como resultado destacaram que a taxa de secagem dos alimentos pré-tratados foi alta e a qualidade do produto permaneceu intacta após a secagem.

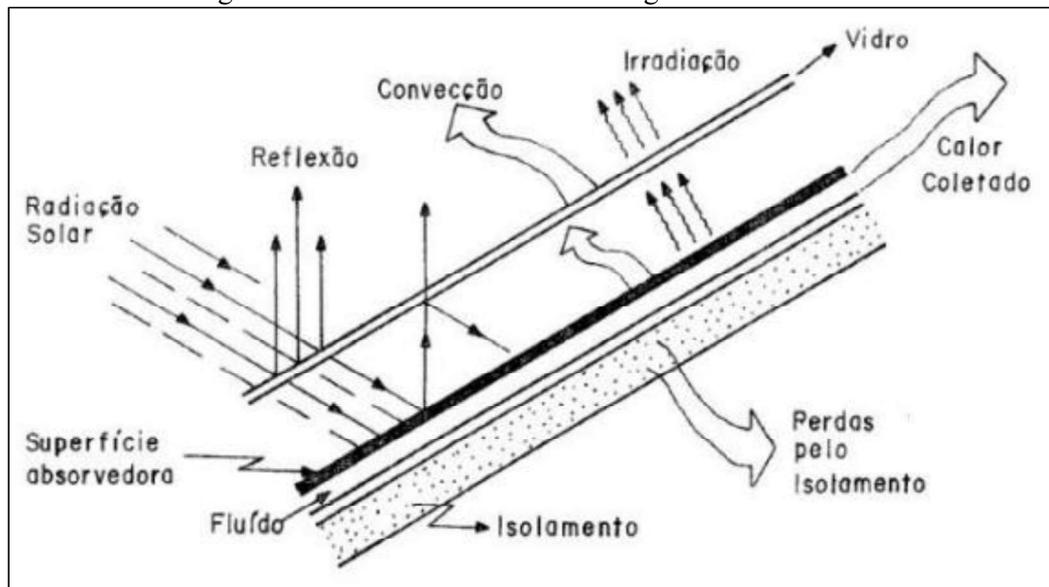
De acordo com RUFUSS *et al.* (2016, p.464-496), a demanda pela produção de água doce cresce dia a dia com o aumento da população mundial e com o crescimento industrial. Para atender essa demanda tem-se observado o crescente uso da tecnologia de dessalinização da água, os autores destacam que no processo de dessalinização com destiladores solares a produtividade é baixa, no entanto requerem baixa manutenção e são facilmente acessíveis. Apresentam uma revisão detalhada da literatura sobre os vários tipos de destiladores solares,

abrangendo projetos ativos e passivos, tipos de coletores, armazenamento de calor, aletas, condensadores e mecanismos para melhorar a transferência de calor e massa. Dissertaram também sobre os avanços nos materiais, mudança de fase, nanocompósitos e melhorias no desempenho.

### 2.3.1 Modelagem física

Conhecendo os conceitos sobre coletores solares apresenta-se na Figura 17, o modelo físico com desenho de coletor solar onde são identificadas as trocas de energia térmica.

Figura 17: Desenho das trocas de energia no coletor solar

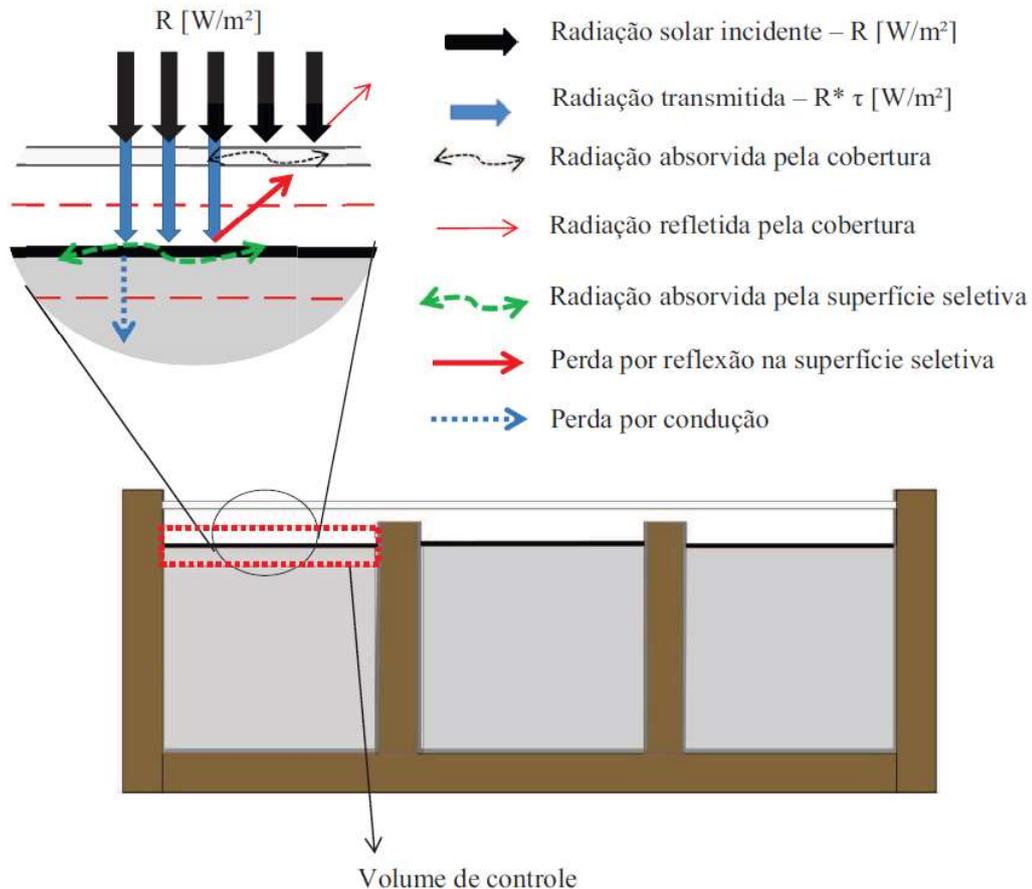


Fonte: Zilles (1987), apud FREITAS (2017, p.33)

De acordo com GELIN *et al.* (2004), apud SILVA (2017, p.6). Das interações apresentadas na Figura 17, na superfície dos coletores, a reflexão refere-se a perda de parte da radiação solar incidente na superfície absorvedora que ocorre de forma indesejada. Sendo assim, os coletores solares precisam possuir boa absorbância do espectro solar e baixa emissividade garantindo maior eficiência na conversão de energia. Por outro lado, no interior do coletor, conforme KENNEDY (2002), há uma rerradiação do infravermelho, na qual a radiação absorvida é emitida, na forma de calor, da superfície para o vidro e parte dessa emissão retorna para a superfície em ato contínuo.

RODRIGUES, (2014, p.31), dissertou sobre um projeto experimental no qual apresentou um modelo físico de coletor solar com as interações bem definidas acerca de radiação solar e perdas de calor, conforme se apresenta na Figura 18.

Figura 18: Modelagem física de um coletor experimental



Fonte: RODRIGUES (2014, p.31)

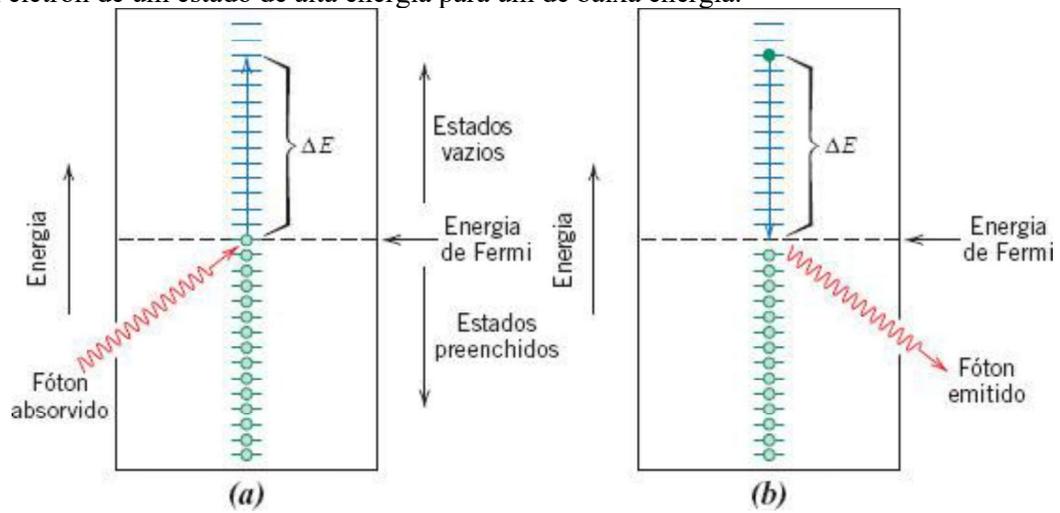
## 2.4 Metais aplicados nos substratos

Nesta pesquisa doutoral o objeto de estudo é a aplicação de superfície seletiva desenvolvida com compósito de RRO + CuO + SiC, misturado com adesivo para deposição no substrato de aço inoxidável AISI 304, no entanto verificou-se a necessidade de estudar outros metais geralmente aplicados como substrato na produção de coletores energia solar térmica, com a finalidade de estabelecer parâmetros acerca das propriedades físicas e desempenho térmico entre ambos, portanto além do aço inoxidável 304, foram estudados o alumínio e o cobre como substratos aplicados na maioria dos coletores solares comerciais.

### 2.4.1 Propriedades óticas dos metais

Os metais são opacos, isto ocorre “porque as radiações incidentes com frequências na faixa do espectro visível excitam os elétrons para estados de energia não ocupados acima da energia de Fermi” CALLISTER *et al* (2024, p.670). Conforme se apresenta na Figura 19.

Figura 19: (a) Representação esquemática do mecanismo de absorção de um fóton para os materiais metálicos, nos quais um elétron é excitado para um estado não ocupado de maior energia. A variação na energia do elétron  $\Delta E$  é igual à energia do fóton. (b) A reemissão de um fóton de luz pela transição direta de um elétron de um estado de alta energia para um de baixa energia.

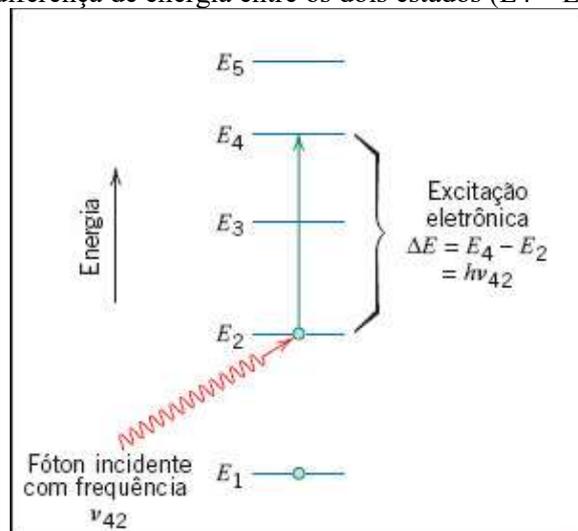


Fonte: CALLISTER *et al* (2024, p.670)

De acordo com CALLISTER *et al* (2024), no interior dos materiais sólidos, como os metais, por exemplo, ocorrem fenômenos óticos que promovem interações entre a radiação eletromagnética e os átomos, íons e/ou elétrons provocando transições eletrônicas (troca de energia entre elétrons).

“A absorção e a emissão de radiação eletromagnética podem envolver transições eletrônicas de um estado de energia para outro.” CALLISTER *et al* (2024, p.669). Conforme se apresenta na Figura 20.

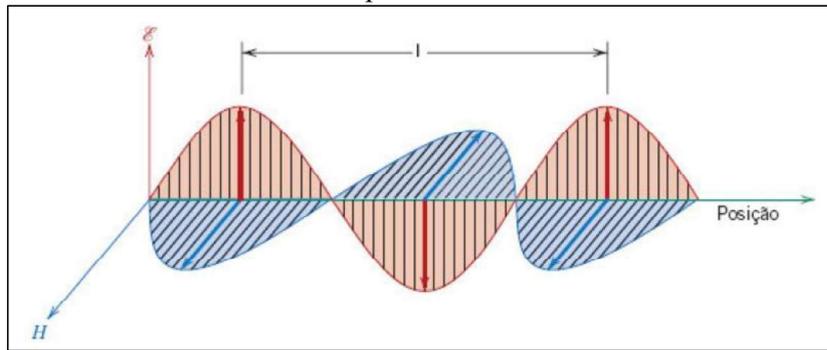
Figura 20: Ilustração esquemática para um átomo isolado da absorção de um fóton pela excitação de um elétron de um estado de energia para outro. A energia do fóton ( $h\nu_{42}$ ) deve ser exatamente igual à diferença de energia entre os dois estados ( $E_4 - E_2$ ).



Fonte: CALLISTER *et al* (2024, p.670).

De acordo com CALLISTER *et al* (2024), “a radiação magnética é considerada de natureza ondulatória, consistindo em componentes de campo elétrico e de campo magnético que são perpendiculares entre si e à direção da propagação.” Conforme se apresenta na Figura 21.

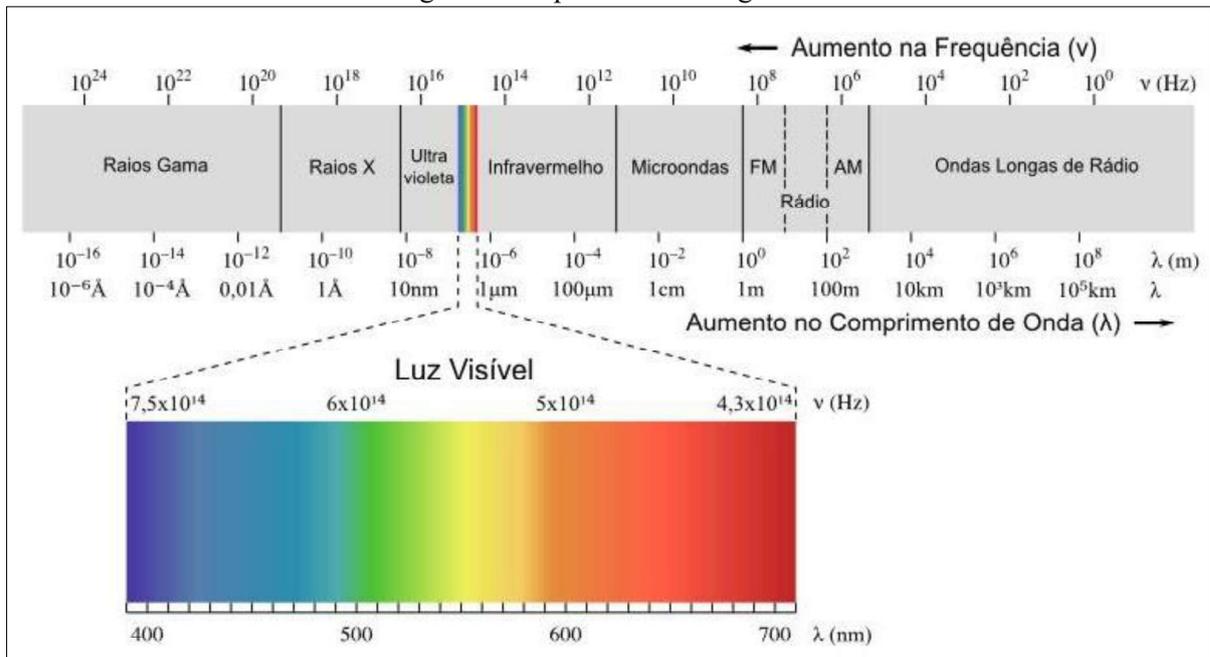
Figura 21: Onda eletromagnética mostrando os componentes do campo elétrico  $\epsilon$ , do campo magnético  $H$  e o comprimento de onda  $\lambda$



Fonte: CALLISTER *et al* (2024, p.667)

Os métodos espectroscópicos são classificados de acordo com a região a que pertence no espectro eletromagnético, em função do comprimento de onda e da frequência que variam na seguinte ordem: raio gama, raio X, radiação ultravioleta (UV), radiação infravermelha (IV), micro-ondas e ondas de rádio. Conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22: Espectro eletromagnético



Fonte: DAMANSCENO (2021)

CALLISTER *et al* (2024), explica que o calor (ou energia radiante), o radar, as ondas de rádio e os raios X são todas formas de radiação eletromagnética. Cujas características são evidenciadas por determinada faixa de comprimento de onda. Dependendo da forma como a onda é gerada, o espectro eletromagnético abrange ampla faixa que vai desde os raios  $\gamma$  ( $10^{-14}$ ) – emitidos por materiais radiativos – passando pelo espectro de ondas visíveis ao olho nu ( $0,4\mu\text{m}$  a  $0,7\mu\text{m}$ ), até as ondas de rádio e TV ( $10^4$ ).

Os metais são abundantemente aplicados na produção de coletores solares principalmente, por apresentarem boa condutividade térmica, no entanto outros fatores devem ser levados em consideração como por exemplo: densidade (peso específico), ductilidade, custos, abundância entre outros.

Enfatizando que quanto maior for a condutividade térmica de um material, mais rápida será a condução de calor, no entanto com a ausência da fonte de calor, mais rápida será a perda de calor.

Por outro lado, quanto menor for a condutividade térmica de um material, mais lenta será a condução de calor, conseqüentemente, com a ausência da fonte de calor, mais lenta será a perda de calor, ou seja, maior será a conservação de calor.

Tabela 2: Propriedades físicas alumínio, aço e cobre

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coefficiente de dilatação térmica ( $\text{L}/^{\circ}\text{C}$ );	$23 \cdot 10^{-6}$	$11,7 \cdot 10^{-6}$	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Condutibilidade térmica a $25^{\circ}\text{C}$ ( $\text{W}/\text{m.K}$ )*	226	20	397
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

Fonte: Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2023). \*Adaptado

#### 2.4.2 Substrato de Alumínio

O substrato de alumínio é o metal mais comumente aplicado nos coletores solares existentes no mercado, este metal possui alta resistência à corrosão, pois tem uma fina camada de óxido que o protege de oxidações posteriores.

O alumínio é um metal com estrutura cristalina (CFC) e raio atômico de  $0,1431\text{nm}$  ou ( $10^{-9}\text{m}$ ). Obtido a partir do minério da bauxita, contendo pelo menos 30% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Possui eletronegatividade de 1,61.

Na imagem 3, CALLISTER *et al.* (2024), apresentam três amostras elaboradas com

óxido de alumínio onde se observa que as estruturas das três amostras são diferentes em termos dos contornos dos cristais e da presença de poros, o que afeta as propriedades de transmitância ótica, então, segundo o autor, “se a transmitância ótica for um parâmetro importante para aplicação final do material, o desempenho apresentado para cada uma é diferente.”

Imagem 3: Três amostras de discos delgados, sobre uma página impressa para mostrar as diferenças em termos de características de transmitância de luz, o disco a esquerda é transparente, o disco do centro é translúcido e o disco da direita é opaco. Todos feitos com a mesma matéria-prima (óxido de alumínio), porém, com estruturas e processamentos diferentes.



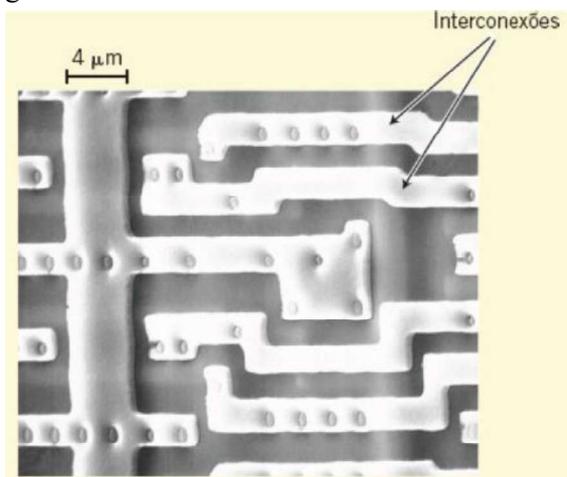
Fonte: CALLISTER *et al.* (2024, p.4).

De acordo com a ABAL (2023), o alumínio possui ponto de fusão de 660°C, o que é relativamente baixo quando comparado ao aço, que é da ordem de 1570°C. No entanto, a leveza é uma das principais características do alumínio, peso específico de 2,70g/cm<sup>3</sup>, apresenta elevada condutividade térmica, na ordem de 220 a 240 W/m.K.

Além das características supracitadas o alumínio é um metal que possui boa ductilidade o que facilita sua manufatura tornando-se assim o material mais utilizado na produção de coletores solares, em seus substratos e estruturas de montagem.

CALLISTER *et al.* (2024) apresentam a Imagem 4, obtida por microscópio ótico eletrônico que mostra a aplicação do alumínio em chip.

Imagem 4: Micrografia eletrônica (2000x) do chip de circuito integrado onde podem ser observadas as regiões das interconexões de alumínio



Fonte: *National Semiconductor Corporation, apud CALLISTER et al. (2024, p.122)*

### 2.4.3 Substrato de aço inoxidável 304

De acordo com COSTA E SILVA; MEI (2021, p.339), “adições de cromo aumentam a resistência à oxidação e à corrosão do aço. Aços com teores de cromo superiores a 12% têm grande resistência à oxidação e são comumente designados como aços inoxidáveis.”

Aços inoxidáveis são ligas de ferro e cromo cuja principal característica é a elevada resistência ao ataque químico e à corrosão. Além dos elementos químicos anteriormente citados os aços inoxidáveis também podem conter níquel, molibdênio e outros elementos.

No entanto, os autores afirmam que nenhum material é completamente inoxidável, no sentido da palavra, portanto recomenda-se à correta seleção do material para aplicação em meios corrosivos. Isto porque o cromo presente na liga oxida-se em contato com o ar – passivação – formando uma película, muito fina e estável, de óxido de cromo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , na superfície exposta ao meio agressivo. Esta película tem espessura de que pode variar de 30 a 50Å ( $1\text{Å} = 10^{-1}\text{nm}$ ), a película é auto-regenerável quando entra em contato com o oxigênio e é responsável pelo brilho característico do aço inoxidável AISI 304.

As principais composições de ligas à base de Fe + Cr estão associadas ao fenômeno de passivação – formação de camada de óxidos mistos (ferro, cromo e outros elementos da liga) e dissolução desta camada no meio corrosivo.

COSTA E SILVA; MEI (2021, p.339), explicam que as principais composições dos aços inoxidáveis (Ex.: 12%Cr; 18%Cr + 8%Ni, etc), foram desenvolvidas na década de 1920, os cientistas franceses Bain e Griffiths apresentaram, em 1927, seus resultados a respeito do sistema Fe-Cr-Ni e mencionaram a existência de dois campos de fases: austenita e ferrita. Os

autores explicam que “A partir dessas composições, foram estudados os diversos elementos de ligas residuais, como C, N, Mo etc. Desde então, novas composições vêm sendo desenvolvidas.”

Os efeitos dos diversos elementos de liga na estrutura dos aços inoxidáveis de acordo com COSTA E SILVA; MEI (2021, p.339-340), podem ser verificados a partir dos diagramas de equilíbrio de fases. No entanto, para fins de classificação e discussão das propriedades, de acordo com a AISI *American Iron and Steel Institute* (EUA) – (Instituto Americano de Ferro e Aço), os aços inoxidáveis são agrupados em cinco classes: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação.

De acordo com PINEDO (2021, p. 53-70), os aços inoxidáveis constituem uma das famílias mais importantes de aços de alta liga, são utilizadas por segmentos industriais em decorrência de sua elevada resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis possuem diversos balanceamentos de composição química, adição de elementos de liga, e por isso são divididos em famílias específicas. As famílias dos aços inoxidáveis e suas principais características são:

**“Aços inoxidáveis austeníticos:** sua composição possui uma combinação de cromo e níquel em teor elevado. O teor de cromo pode variar de 16% a 26% e o de níquel em até 35%, podendo ter adição de molibdênio(...);

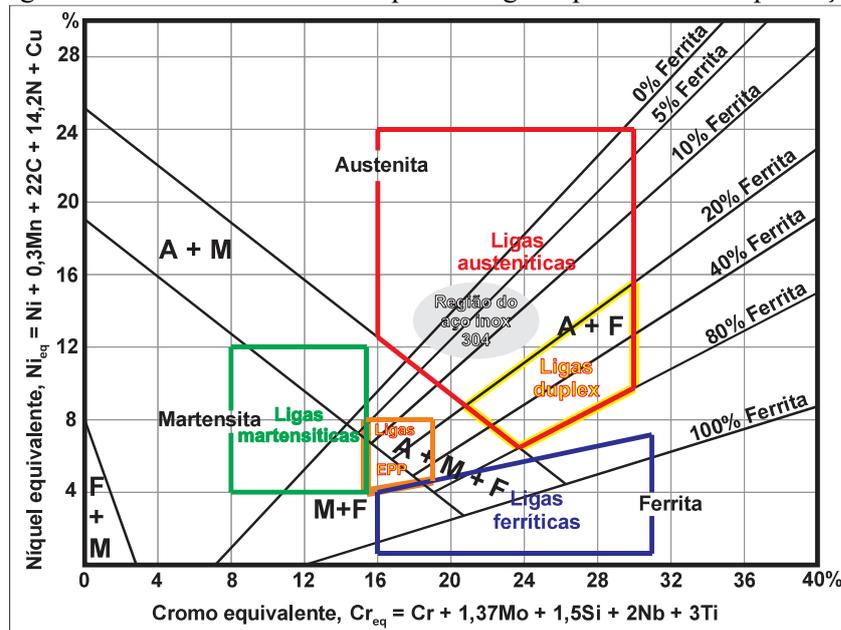
**Aços inoxidáveis ferríticos:** constituem uma família com composição química mais simples, ligada basicamente ao cromo, com teores entre 10,5% e 30%. Possuem uma matriz constituída de ferrita (CCC). (...);

**Aços inoxidáveis martensíticos:** esta família é ligada basicamente ao cromo, em teores que variam de 10,5% a 18,0%. (...);

**Aços inoxidáveis duplex:** são aços ligados ao cromo e níquel, basicamente. O teor de cromo varia entre 21% e 23% e o de níquel, entre 4,5% e 6,5%, com adição de molibdênio entre 2,5 e 3,5%. (...);

**Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação:** esta família de aços possui elevada resistência mecânica, comparada à dos aços inoxidáveis martensíticos, mas não endurecem por têmpera e revenimento, e sim por solubilização e envelhecimento. (...)” (PINEDO, 2021, p. 53).

Figura 23: Diagrama de Schaeffler com destaque das regiões predominantes para aços inoxidáveis



Fonte: ASM Speciality Handbook: Stainless Steels (1994, p.349). Adaptado e editado pelo autor (2023).

Por causa da sua resistência à oxidação, corrosão e tenacidade (dos inoxidáveis austeníticos). Os aços inoxidáveis são de grande interesse da engenharia.

Quanto ao tipo de acabamento é possível encontrar no mercado vários tipos de aços inoxidáveis 304: acabamento polido, acabamento alto brilho, acabamento escovado, acabamento acetinado, acabamento fosco e acabamento espelhado.

Tabela 3: Propriedades físico-químicas do aço inoxidável AISI 304

Composição química		Propriedades físicas		Propriedades mecânicas	
Carbono	0,07 – 0,08%	Limite de escoamento	210 – 234 MPa	Densidade	8000 Kg/m <sup>3</sup>
Cromo	16 – 30%	Prova de estresse	210 MPa	Ponto de fusão	1450 °C
Manganês	2%	Resistência à tração	520 – 720 MPa	Módulo de elasticidade	193 Gpa
Silício	1%	Alongamento	40%	Condutividade térmica	16 – 23 W/m.K
Fósforo	0,045%				
Enxofre	0,015%				
Níquel	8 – 24%				
Nitrogênio	0,1%				
Ferro	restante				

Fontes: AISI, ASTM, valores médios encontrados na literatura. Adaptado pelo autor (2023)

O aço inoxidável AISI 304 possui boa resistência à corrosão quando em contato com diferentes meios corrosivos, no entanto pode apresentar corrosão por fendas em ambientes que contenham cloretos, bem como quando submetido à tensão e em temperaturas acima de 60°C.

O aço inoxidável AISI 304 possui boa resistência à oxidação quando submetido ao calor, em temperatura intermitente até 870°C e em temperatura de serviço contínuo a 925°C. No

entanto, o uso contínuo entre 425 a 860°C não é recomendado, tendo em vista que a precipitação de carbonetos ocorre entre 400 e 900°C.

O aço inoxidável AISI 304 é manufaturado em diversas aplicações: fabricação de máquinas para indústrias de alimentos e bebidas, fabricação de panelas, pias e torneiras, peças sanitárias, calhas, instrumentos médico-hospitalar, indústria naval, tubulações etc.

Este material foi escolhido como substrato, considerando que além das suas características físicas relatadas neste tópico, proporcionam resistência e durabilidade, como proposta alternativa em substituição aos substratos de alumínio e cobre.

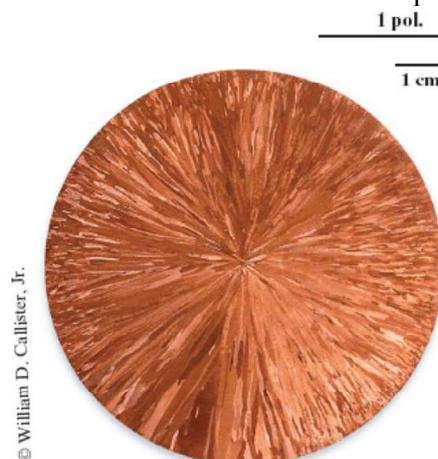
#### 2.4.4 Substrato de cobre

O cobre é extraído dos minerais calcopirita, bornita e calcocita, em grãos médios a grandes, policristalinos, escuros ou avermelhados cujo processamento até a manufatura é transformado em vários produtos como fios e cabos elétricos, chapas planas, tubos e conexões, utensílios domésticos etc.

O cobre é um metal com estrutura cristalina (CFC) e raio atômico de 0,1278nm ou ( $10^{-9}$ m). Possui massa específica de 8,96g/cm<sup>3</sup> e eletronegatividade 1,90 Pauling.

Segundo CALLISTER *et al.* (2024), após análise de micrografia realizada com microscópio ótico, verificou-se que o cobre apresenta grãos relativamente grandes, com diferentes texturas, visíveis na superfície de um lingote de cobre conforme se apresenta na figura 24.

Figura 24: Seção transversal de lingote de cobre. Pequenos grãos em forma de agulha podem ser observados e estendem-se radialmente do centro para extremidades.



Fonte: CALLISTER *et al.* (2024, p.96).

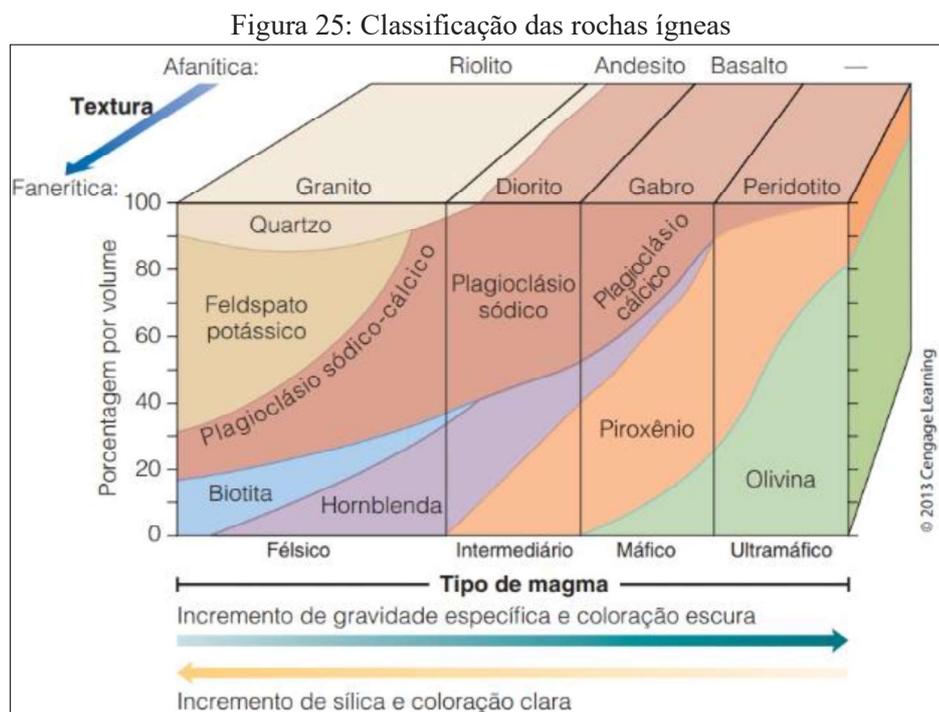
O cobre possui boa condutividade térmica na ordem de 380 a 400 W/m.K, é um metal dúctil de fácil manipulação, no entanto possui alto custo financeiro para aplicação em superfícies seletivas de coletores solares. No entanto, devido à sua elevada condutividade térmica é um metal muito utilizado na fabricação de tubos coletores de calor nos coletores solares.

## 2.5 Estudos sobre o granito

O granito é uma rocha ígnea intrusiva que de acordo com REED e MONROE (2017, p. 86-90), cristaliza-se a partir de magma félsico (com mais de 65% de sílica). Composto, principalmente, por quartzo, feldspato, plagioclásio sódico-cálcico e mica(biotita), cuja classificação é apresentada na Figura 25.

O granito é comumente aplicado na construção civil como agregado graúdo, paralelepípedo para pavimentação e como rochas ornamentais.

Segundo ALENCAR (2013, p. 24), “para o setor de rochas ornamentais e de revestimento, as jazidas de granito correspondem a um amplo conjunto de rochas silicáticas, cuja associação mineralógica mais comum apresenta uma composição de quartzo, feldspatos e micas.”



Fonte: REED e MONROE, 2017, p.88

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, na NBR 15.012/2003, item 2.2, define rocha ornamental como: “material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética.” A rocha para revestimento corresponde à rocha natural que, submetida a processos diversos de beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas.

Segundo FRASCÁ (2011), apud ALENCAR (2013, p.50) as propriedades do granito são estabelecidas por norma nacional, ABNT, NBR 15.844/2015 e norma internacional ASTM C615, onde são apresentadas as especificações para o granito.

Tabela 4: Especificações para granito ABNT-ASTM

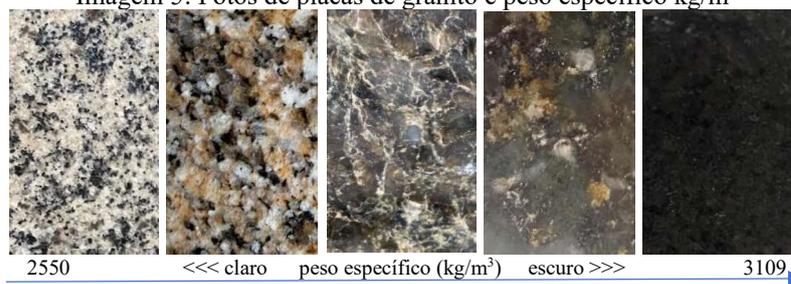
Propriedades	Norma	
	ABNT NBR 15.844	ASTM C 615
Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	>2.550	≥2.560
Porosidade aparente (%)	1,0	n.e.
Absorção d' água (%)	<0,4	≤0,4
Compressão uniaxial (Mpa)	>100	≥131
Flexão (módulo de ruptura em três pontos (Mpa)	>10,0	≥10,34
Flexão (módulo de ruptura em quatro pontos (Mpa)	>8,0	≥8,37
Coefficiente de dilatação térmica linear [(10 <sup>-3</sup> mm/m x °C)]	<8,0	n.e.
Impacto de corpo duro (m)	>0,3	n.e.
Desgaste Amsler (mm/1000m)	<1,0	n.e.

Nota: n.e. = não especificado

Fonte: Frascá (2011). Apud ALENCAR (2013, p.50). Adaptado pelo autor.

O peso específico do granito pela norma ASTM a densidade é  $\geq 2.550 \text{ kg/m}^3$ , entretanto dependendo da tonalidade – mais claro ou mais escuro – conforme se apresenta na Imagem 5, pode atingir até  $3.109 \text{ kg/m}^3$ , conforme ALENCAR (2013, p.79-205).

Imagem 5: Fotos de placas de granito e peso específico kg/m<sup>3</sup>



Fonte: acervo do autor (2022).

RODIGUES (2014), dissertou sobre a produção de superfície seletiva a partir do resíduo de granito, considerando, segundo o autor que “as superfícies seletivas consistem em uma fina camada de óxido metálico. Os mais comuns são os óxidos de cromo e de titânio. Essas misturas químicas, geralmente são feitas a partir de materiais tóxicos e de alto custo.” RODIGUES (2014, p.13).

NAIK *et al.* (2021), publicaram estudo comparativo entre o coletor solar térmico com

absorvedor de pedras (rochas) e o coletor solar térmico absorvedor convencional, no artigo os autores enfocaram a nova tecnologia no cenário atual, o baixo investimento (<65%), baixo custo de manutenção. Os resultados, segundo os autores, foi o melhor desempenho com o aumento da temperatura em até 8°C em relação aos coletores convencionais.

ABUSKA *et al.* (2019), em estudo comparativo entre coletores energético e exergético – capacidade de transformar energia em trabalho, no entanto é apenas uma fração da energia – de coletores solares de ar de convecção forçada como grãos de pós de pedras, cujo objetivo, foi projetar novos coletores solares de ar que continuem 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 por do Sol e apresentaram eficiência exérgica de até 7% no horário de Sol pleno.

“Os materiais, de maneira geral, podem ser divididos em quatro grandes categorias: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos. Dentre essas categorias, a que mais cresce é a dos materiais compósitos.” (ARAÚJO<sup>(a)</sup>, 2020, p.16).

De acordo com PAULA (2011), apud ARAÚJO<sup>(a)</sup> (2020), os materiais compósitos são divididos em três categorias: compósitos carregados com partículas, compósitos carregados com fibras descontínuas e compósitos carregados com fibras contínuas.

## 2.6 Potência e calor

A potência fornecida por uma fonte de calor (chama ou resistência aquecida) por causa do efeito Joule é dada pelo cálculo da quantidade de calor dissipado por essas fontes em função do tempo, em segundos. Através da seguinte equação:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (06)$$

Antes de calcular a potência é necessário determinar se o calor é sensível ou latente:

$Q = m.c.\Delta t \rightarrow$  calor tipo sensível (gera apenas variação de temperatura)

ou  $Q = m.L \rightarrow$  calor tipo latente (gera mudança de fase ou de estado físico)

Onde:

$Q$  – calor (Joule)

$m$  – massa

$c$  – calor específico

$\Delta t$  – intervalo de tempo (segundos)

$L$  – calor Latente

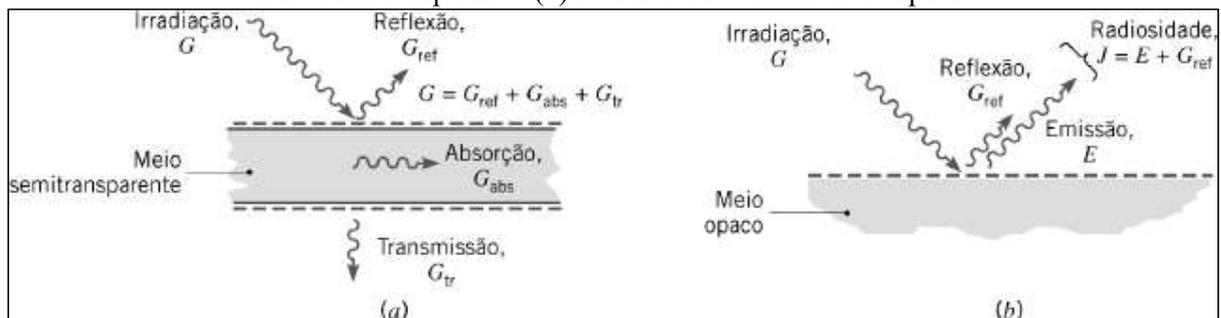
O resultado da medida de potência obtido da equação anterior é dado em Joule / segundo (J/s), no entanto a unidade de potência adotada pelo SI é o watt (W), então em alguns casos será necessário converter (J/s) para (W). Para isso basta entender que 1 J/s é equivalente a 1 W.

Os calores sensível e latente estão presentes, exclusivamente, nas mudanças de temperatura e nas mudanças de estado físico.

## 2.7 Propriedades da Radiação

Quando a energia radiante incide na superfície de um material, parte da radiação térmica será refletida, parte será absorvida e outra parte será transmitida, de acordo com o diagrama apresentado na Figura 26.

Figura 26: Radiação em uma superfície. (a) Reflexão, absorção e transmissão da irradiação em um meio semitransparente. (b) A radiosidade de um meio opaco.



Fonte: BERGMAN; LAVINE, (2019, p.460).

“A refletividade  $\rho$  como a fração da irradiação refletida, a absortividade  $\alpha$  como a fração da irradiação absorvida e a transmissividade  $\tau$  como a fração da irradiação transmitida.” BERGMAN; LAVINE (2019, p.460).

Como toda a irradiação tem que ser refletida, absorvida ou transmitida, tem-se que Um meio no qual não há transmissão ( $\tau = 0$ ) é opaco, neste caso, são definidas as seguintes propriedades da superfície:

$\alpha$  – absortividade ou fração de energia radiante que é absorvida pela superfície;

$\rho$  – refletividade ou fração de energia radiante que é refletida da superfície;

$\tau$  – transmissividade ou fração de energia radiante que é transmitida através da superfície.

Matematicamente a soma das três propriedades acima deve ser igual a 1, conforme equação a seguir:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (07)$$

Essas propriedades também podem ser monocromáticas ou espectrais, caracteriza quantitativamente a emissão de radiação por um corpo em equilíbrio térmico à temperatura T. Conforme equação a seguir:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (08)$$

$\alpha_\lambda$  – é a absorptividade solar

$\rho_\lambda$  – é a refletividade solar

$\tau_\lambda$  – é a transmissividade solar  $\rightarrow$  se for um material opaco,  $\tau_\lambda = 0$

### 2.7.1 Cálculo da eficiência do coletor solar

A eficiência do coletor solar pode ser calculada matematicamente. No Brasil, deve-se observar a norma NBR 15747-2/2022, item 6.1.8, que regulamenta os sistemas solares térmicos e seus componentes. Esta norma apresenta várias formulações matemáticas para ensaios e cálculo da eficiência do coletor solar expressas a seguir:

#### • Cálculo da potência útil instantânea ( $Q'$ )

$$Q' = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad (09)$$

Onde:

$\dot{m}$  – vazão máxima do fluido de trabalho [ $\text{kg s}^{-1}$ ]

$c_p$  – coeficiente de perda de calor para  $(T_m - T_1) = 0$  [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]

$\Delta T$  – diferença de temperatura do fluido entre entrada e saída ( $t_e - t_{in}$ )

$T_e$  – temperatura de saída do coletor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{in}$  – temperatura de entrada do coletor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_m$  – temperatura média do fluido de trabalho [°C]

• **Cálculo da energia solar interceptada pelo coletor ( $Q^*$ ):**

$$Q^* = AG \times \eta \quad (10)$$

Onde:

$AG$  – área total do coletor ( $A_A + A_a$ ) [ $m^2$ ]

$A_A$  – área do absorvedor do coletor [ $m^2$ ]

$A_a$  – área de abertura do coletor [ $m^2$ ]

$\eta$  – eficiência térmica do coletor em relação a  $T_m^* = (t_m - t_e/G^*)$  [adimensional]

$G^*$  – radiação solar hemisférica global [ $Wm^{-2}$ ]

• **Cálculo da eficiência instantânea baseada na área do absorvedor/área de abertura ( $\eta$ ):**

$$\eta = \eta_0 - a_1 \times \left(\frac{t_m - t_a}{G}\right) - a_2 \times G \times \left(\frac{t_m - t_a}{G}\right)^2 \quad (11)$$

Onde:

$\eta_0$  – eficiência térmica do coletor para ( $\eta$  a  $T_m^* = 0$ ), em relação a  $T_m^*$  [adimensional]

$a_1$  – coeficiente de perdas de calor ( $T_m - T_a = 0$ ) [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]

$a_2$  – temperatura de dependência do coeficiente de perdas de calor [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]

$t_a$  – temperatura ambiente [°C]

$t_m$  – temperatura média do fluido de trabalho [°C]

$G$  – radiação solar hemisférica [ $Wm^{-2}$ ]

• **Cálculo da produção de energia instantânea pelo coletor ( $Q^*$ ):**

Usando as equações 10 e 11, o coletor de saída por módulo pode ser escrito como:

$$Q^* = AG \times \left( \eta_0 - a_1 \times \frac{t_m - t_a}{G} \right) - a_2 \times G \times \left( \frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \quad (12)$$

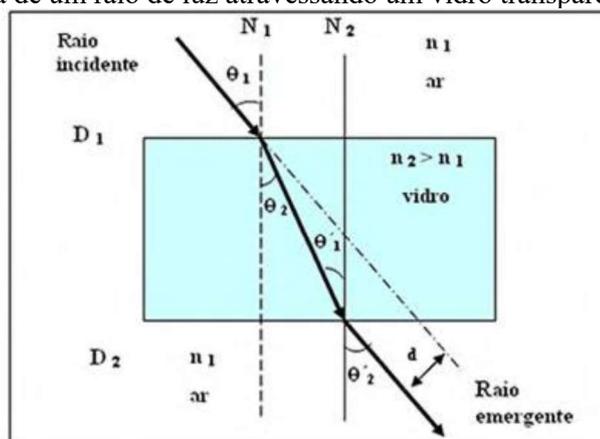
## 2.7.2 Refração da Luz – Lei de Snell

Refração é a propriedade ótica que corresponde “à luz transmitida para o interior de materiais transparentes provocando uma diminuição de sua velocidade e, como resultado disso,

é desviada na interface” CALLISTER *et al.* (2024). Índices de refração de alguns materiais cerâmicos: vidro de sílica 1,46; quartzo (SiO<sub>2</sub>) 1,55; Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 1,76.

Na Figura 27 é apresentado o vidro transparente como uma lâmina de faces paralelas constituída de dois dioptros (D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>) planos e paralelos entre sí, usada para deslocar o raio de luz de determinada posição para uma nova posição, provocando um desvio lateral (d), sem mudar a direção do raio de luz.

Figura 27: Trajetória de um raio de luz atravessando um vidro transparente de faces paralelas



Fonte: BENTIVENHA (2005, p.26)

BENTIVENHA (2005, p.27-28), explica que a lâmina da Figura 27 é constituída por dois dioptros ar/vidro e vidro/ar. Vê-se que o raio de luz que emerge no segundo dióptro, sofre um desvio lateral (d) com relação ao raio incidente no primeiro dióptro. Matematicamente mostra-se então que numa lâmina de faces paralelas o raio emergente é paralelo ao raio incidente.

Ou seja:  $\theta_1 = \theta'_2$

Aplicando a Lei de Snell para o dióptro ar/vidro, tem-se:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (13)$$

Aplicando a Lei de Snell para o dióptro vidro/ar, tem-se:

$$\frac{\text{sen } \theta'_1}{\text{sen } \theta'_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{sen } \theta'_2}{\text{sen } \theta'_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (14)$$

Igualando as equações 13 e 14 tem-se:

$$\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = \text{sen } \theta'_2 / \text{sen } \theta'_1 \quad (15)$$

Considerando  $\theta_2 = \theta'_1$  e os ângulos alternos e internos não adjacentes, ou seja, são congruentes, para o primeiro quadrante tem-se:

$\text{sen } \theta_2 = \text{sen } \theta'_1$  Substituindo em 15 tem-se, para o primeiro quadrante:

$$\text{sen } \theta_1 = \text{sen } \theta'_2 \quad (16)$$

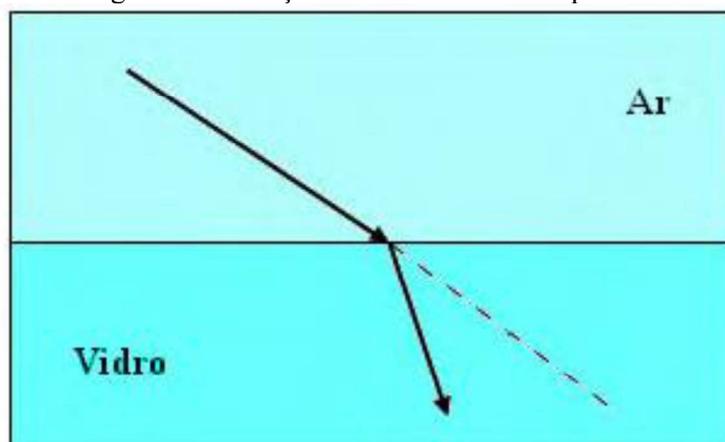
E em relação aos ângulos alternos externos, para o primeiro quadrante tem-se:

$$\theta_1 = \theta'_2 \quad (17)$$

### 2.7.3 Cálculo do índice de refração ( $n$ )

BENTIVENHA (2005, p.29-30), disserta que no interior de um vidro transparente a velocidade da luz reduz para 200.000km/s. O referido autor explica que é essa mudança de velocidade que faz o feixe de luz se desviar ao passar do ar para o vidro. Esse desvio é denominado de refração.

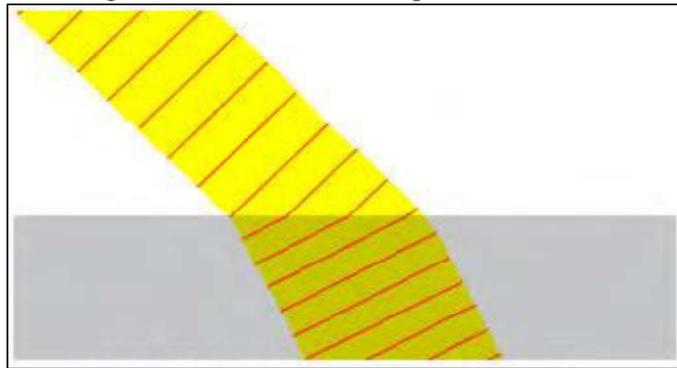
Figura 28: Refração da luz no vidro transparente



Fonte: BENTIVENHA (2005, p.29-30)

O diagrama apresentado na Figura 29, elaborado pelo astrônomo John Herschell, apud BENTIVENHA (2005, p.30), “comparando a onda de luz a uma formação de soldados que passa de um chão rijo(asfalto) para outro mais frouxo (areia). Na areia a velocidade das fileiras de soldados diminuiria.” O autor concluiu que ao ficar menor a distância entre as fileiras e a direção é desviada ao passar do ar para o vidro, por exemplo, onde sua velocidade se reduz, a onda de luz e a distância entre os cristais (comprimento de onda) fica menor.

Figura 29: Desvio da luz ao penetrar no vidro



Fonte: John Herschell, apud BENTIVENHA (2005, p.30)

O eixo da separação de uma superfície em duas partes é denominado de “normal”. A Figura 30, mostra que existe uma relação simples entre o ângulo “A” que o feixe de luz faz com a normal no ar, e, o ângulo “B”, que faz com a normal no vidro.

De acordo com BENTIVENHA (2005, p.31), nessa relação dos ângulos A e B é possível calcular o índice de refração (chamado de Lei de Snell) com a seguinte equação:

$$n = \frac{\text{sen } A}{\text{sen } B} = \frac{\text{velocidade luz no ar}}{\text{velocidade luz no vidro}} \quad (18)$$

$$\text{Ou: } n = \frac{c}{v}$$

Onde:

$c$  – velocidade da luz no vácuo (constante = 300.000km/s)

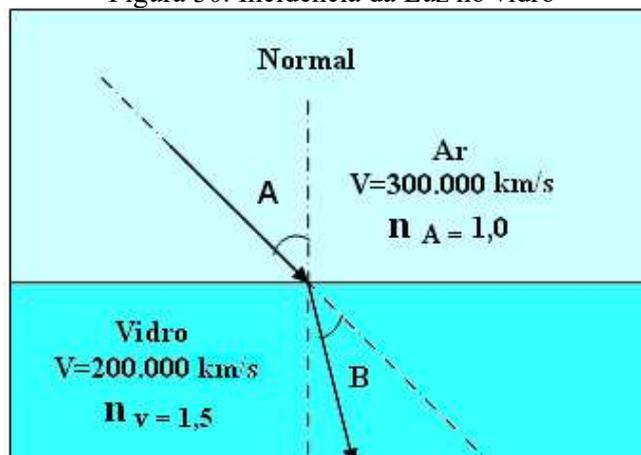
$v$  – velocidade da luz no meio escolhido (vidro transparente)

$n$  – índice de refração no meio escolhido.

Aplicando a fórmula numa superfície de vidro transparente tem-se que:

$$nv = \frac{300.000}{200.000} = 1,5 = \frac{\text{sen } A}{\text{sen } B} = 1,5 \quad (19)$$

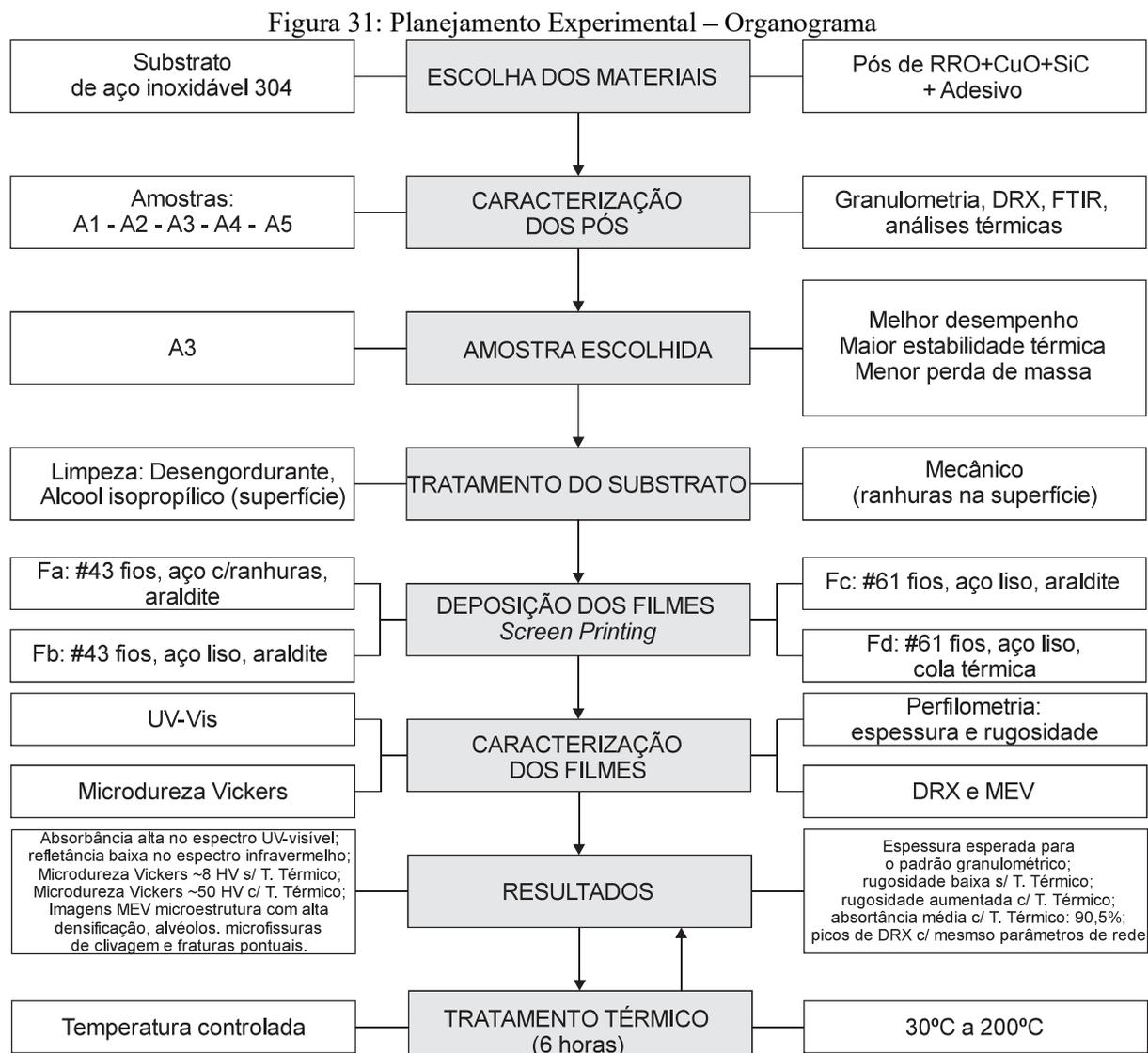
Figura 30: Incidência da Luz no vidro



Fonte: BENTIVENHA (2005, p.31)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi elaborado a partir do planejamento experimental com uma sequência de atividades distribuídas em várias etapas, compreendendo a escolha dos materiais, preparação das amostras, tratamento dos substratos, deposição dos filmes, caracterização dos pós e dos filmes, cujas etapas são apresentadas no organograma da Figura 31.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 3.1 Materiais

O resíduo de rochas ornamentais graníticas foi coletado de empresa beneficiadora de rochas ornamentais localizada na cidade de Cabedelo – Pb, a partir da lama da serragem e corte de rochas ornamentais: granito, quartzito e mármore, com maior incidência de granito cuja origem é do município de Cachoeiro do Itapemirim, no estado do Espírito Santo (ES), Brasil.

Foram adicionados ao resíduo de rochas ornamentais outros compostos químicos adquiridos de fornecedores de suprimentos industriais, localizada na cidade de São Paulo, Brasil: óxido de cobre (CuO), carbetto de silício (SiC), nitrato de cálcio tetra-hidratado ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ ) e cola térmica. Foram adquiridos em lojas comerciais da cidade de João Pessoa, Paraíba, os demais produtos necessários para utilização nos experimentos – cimento *portland* (CP II 32-F) e adesivos araldite profissional.

A escolha dos materiais se deu considerando os vários estudos pesquisados, publicados e apresentados no referencial teórico, item 2.5, com resíduo de granito e outros tipos de rochas para aplicação em superfícies seletivas e coletores de aquecimento solar.

Além das possibilidades técnicas de utilização do resíduo de rochas ornamentais – RRO, foram consideradas a contribuição ao meio ambiente, tendo em vista que o resíduo sólido oriundo dessa atividade é de difícil descarte pelas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais.

### **3.2 Preparação das amostras**

O resíduo coletado foi encaminhado ao Laboratório de Material Cerâmico – LMC do PPECM/UFPB, para processamento nos equipamentos adequados, sendo desumidificado em estufa, com temperatura de 100°C, por 72 horas, após o resfriamento foi macerado e triturado no moinho de bolas.

Após estequiometria os compostos foram misturados e divididos em amostras com diversas proporções que formaram novos compósitos, totalizando 5 amostras, as quais foram codificadas e relacionadas com os códigos: A1, A2, A3, A4 e A5.

A amostra A1 é composta por 100% de resíduo de rochas ornamentais – RRO predominantemente granítica, contendo também resíduo de mármore e quartzito. A amostra A2, composta por 50% de RRO e 50% de óxido de cobre (CuO) o qual, na zona oxidada, está associado aos minerais de sulfeto de cobre, presente no mineral bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), adicionado na configuração desta e das demais amostras; a amostra A3, composta por 40% de RRO, 50% de óxido de cobre (CuO), 10% de carbetto de silício (SiC), como aditivo endurecedor; a amostra A4, composta por 40% de RRO, 50% de óxido de cobre (CuO), 6% de carbetto de silício (SiC), como aditivo endurecedor e 4% de nitrato de cálcio tetrahidratado  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$  como plastificante e endurecedor; a amostra A5, composta por 25% de RRO, 50% de óxido de cobre,

21% de cimento Portland CP II 32-F, usado como aglomerante e e 4% de nitrato de cálcio tetrahidratado  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$  como plastificante e endurecedor.

Para a deposição dos filmes, detalhada no item 3.4, foi adicionado ao compósito de cada amostra o adesivo araldite e/ou cola térmica como aglomerante/endurecedor na proporção 1:1 (compósito : adesivo). Conforme proporções apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Amostras e percentuais dos materiais

AMOSTRA	MATERIAL (%)					TOTAL (%)	ADESIVO (1:1) (aglomerante endurecedor)
	RRO	CuO	SiC	Cimento Portland	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$		
A1	100	0	0	0	0	100	1
A2	50	50	0	0	0	100	1
A3	40	50	10	0	0	100	1
A4	40	50	6	0	4	100	1
A5	25	50	0	21	4	100	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Todos os compósitos resultantes das cinco amostras foram encaminhados para os laboratórios da UFPB: LACOM, LabFilm, LSR e outros para análises que permitiram a identificação do material com melhor desempenho para aplicação em superfície seletiva para condutividade térmica.

Considerando que o compósito A3, escolhido para aplicação no substrato de aço inoxidável, foi realizado o ensaio para verificar se o mesmo é ácido ou básico. Como por exemplos, o  $\text{pH} > 6,8$  previne a corrosão dos equipamentos e acessórios, muitos deles fabricados com aço inoxidável; por outro lado, a alcalinidade quando baixa  $< 80$  ppm, o produto a ser aplicado no substrato tende a ser corrosivo.

No âmbito da química, para provar as características ácido-básico de um composto pode-se submetê-lo à dissolução em água. Neste experimento foi preparada uma solução com água destilada, na proporção 1:20 (Compósito : água).

Os testes químicos realizados, em três leituras, mostraram que a solução aquosa feita com a amostra A3 apresentou média de  $\text{pH} = 7,8$  (parâmetros:  $< 7$  ácida; 7 neutra;  $> 7$  básica) e média de Alcalinidade = 240 ppm (parâmetros: 0-20 muito baixo; 40 baixo; 80-120 ideal; 180 alto; 240 muito alto), para o tipo de uso – filme aplicado no substrato de aço inoxidável, quanto maior, melhor. Portanto, estes valores mostram que o compósito A3 não é ácido e a alcalinidade elevada é adequada para o tipo de uso, portanto é apropriado para deposição no substrato aço inoxidável AISI 304, pois apresenta baixo risco de corrosão.

Outro aspecto verificado foi a existência ou não de reação hidráulica entre os elementos dos compósitos com mistura na proporção 1:0,5 (compósito : água), após exclusão do teor de umidade e visualização da superfície das amostras. Ao mexer com a espátula todas voltaram às características iniciais, em forma de pó, ou seja, não houve o endurecimento por reação hidráulica entre os compostos, nem mesmo na amostra A5 que recebeu um percentual de cimento Portland CP II 32-F.

### 3.3 Preparação do Substrato

O tratamento do substrato, com dimensões (30mm x 30mm), realizado no Laboratório de Secagem Rápida – LSR/UFPB, onde foi feita a limpeza com desengordurante e posteriormente com álcool isopropílico.

O tratamento mecânico foi feito com instrumento cortante, em algumas chapas de aço, com a finalidade de provocar a rugosidade (ranhuras) da superfície para aumentar a aderência dos filmes aplicados.

MEI *et al.* (2021, p.350), expressam que o aço inoxidável AISI 304 é indicado para aplicação em trocadores de calor; é uma liga metálica de Ferro-Níquel-Cromo, um aço austenítico, é fabricado em lâminas a frio e a quente, os laminados a quente possuem espessura entre 2,60 mm a 8,00 mm; os laminados a frio possuem espessura de 0,40mm a 6,00mm. Nesta pesquisa foi utilizado o aço inoxidável AISI 304, laminado a frio; segundo BERTENE (2024), possui condutividade térmica de 16,62 a 21,5 W/m.K.

Imagem 6: Placa de aço inoxidável AISI 304 (30 mm x 30 mm x 0,55 mm).

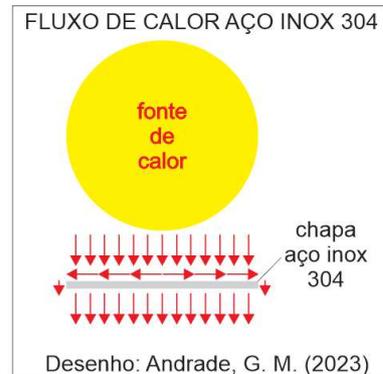


Fonte: Acervo do autor (2022).

A baixa condutividade térmica das ligas austeníticas, como é o caso do aço inoxidável AISI 304, resulta na maior concentração de calor nas arestas de corte, ou seja, nas extremidades da chapa de aço. Neste aspecto é importante compreender que, de acordo com os teoremas de Fourier sobre termologia, quanto menor for a condutividade térmica, mais lento será o gradiente de absorção de calor (ponto fraco) para aplicação em coletores térmicos que necessitem de aquecimento rápido, por outro lado, mais lenta será a perda de calor (ponto forte) para aplicação

em coletores que necessitem de conservação de calor.

Figura 32: Fluxo de temperatura do aço inox 304



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.4 Deposição dos Filmes

Após as análises laboratoriais foi selecionada a amostra A3, adicionado o adesivo araldite cuja mistura formou uma pasta com consistência cremosa para a deposição do filme no substrato, realizando-se a deposição macroscópica, através de pintura impressa com espátula e tela utilizando o método *screen printing*, sendo testada a aplicação com telas *silk screen* de 43 fios / cm, com abertura de 149  $\mu\text{m}$ , suficiente para deposição de até 53,0  $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ; e tela *silk screen* de 61 fios / cm, com abertura de 90  $\mu\text{m}$ , suficiente para a deposição do volume de até 30,4  $\text{cm}^3/\text{m}^2$  do compósito preparado em tinta com consistência pastosa composta por RRO(40%) + CuO(50%) + SiC(10%), com as seguintes granulometrias: RRO ( $\leq 45 \mu\text{m}$ ), CuO ( $\leq 38 \mu\text{m}$ ) e SiC ( $\leq 45 \mu\text{m}$ ). Nesta tela o diâmetro do fio é 64  $\mu\text{m}$  e a espessura do filme aplicado tende a ser  $\leq 101 \mu\text{m}$ .

Considerando que os diâmetros das partículas variam de  $\leq 38 \mu\text{m}$  a  $\leq 45 \mu\text{m}$ , a probabilidade máxima das partículas do compósito transpassar as quadrículas da tela com abertura de 90  $\mu\text{m}$  é menor do que a soma de todos os componentes, proporcionando menor deposição de uma camada de filme fino (superfície seletiva) no substrato.

Por outro lado, a tela de 43 fios, com abertura maior, permite a transpassar até 149  $\mu\text{m}$  por quadrícula, ou seja, é maior que a soma de todos os componentes do compósito 45  $\mu\text{m}$  + 38  $\mu\text{m}$  + 45  $\mu\text{m}$  = 128  $\mu\text{m}$ . Proporcionando maior deposição dos componentes do compósito. Conforme características técnicas apresentadas na tabela 6, nesta tela, o diâmetro do fio é 80  $\mu\text{m}$  e a espessura do filme aplicado tende a ser  $\leq 130 \mu\text{m}$ .

A tabela 6 mostra a lineatura (quantidade de fios) das telas utilizadas no experimento, com 43 fios e 61 fios com os respectivos diâmetros de cada fio, a abertura da quadrícula

(distância entre os fios), a espessura máxima do filme aplicado (deposição do material), porcentagem da área aberta e o volume teórico ( $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ) depositado no substrato.

Tabela 6: Telas para *screen printing* 43 e 61 fios/cm e características técnicas

Lineatura (fios/cm)	Diâmetro do Fio ( $\mu\text{m}$ )	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Espessura ( $\mu\text{m}$ )	% área aberta	Volume teórico ( $\text{cm}^3/\text{m}^2$ )
43	80	149	130	40,8	53,0
61	64	90	101	30,1	30,4

Fonte: Elaborada pelo autor com informações dos fabricantes.

Na tabela 7 são apresentadas as características fornecidas nas fichas técnicas dos respectivos fabricantes dos dois adesivos Araldite Profissional e *Heatsink*, testados na deposição do compósito correspondente à amostra A3.

Tabela 7: Características dos adesivos testados como aglomerantes

MARCA (tipo)	CÓDIGO	Condutividade Térmica W/m.k	Tempo de Secagem (25°C)	Tempo de Cura (25°C)	Temperatura de operação
Araldite (cola epóxi)	AW 106 HV 953 U	0,22	20min.	Até 5 dias	20° a 180°C
<i>Heatsink</i> (cola térmica)	ST922	0,671	15min.	Até 2 dias	-20° a 250°C

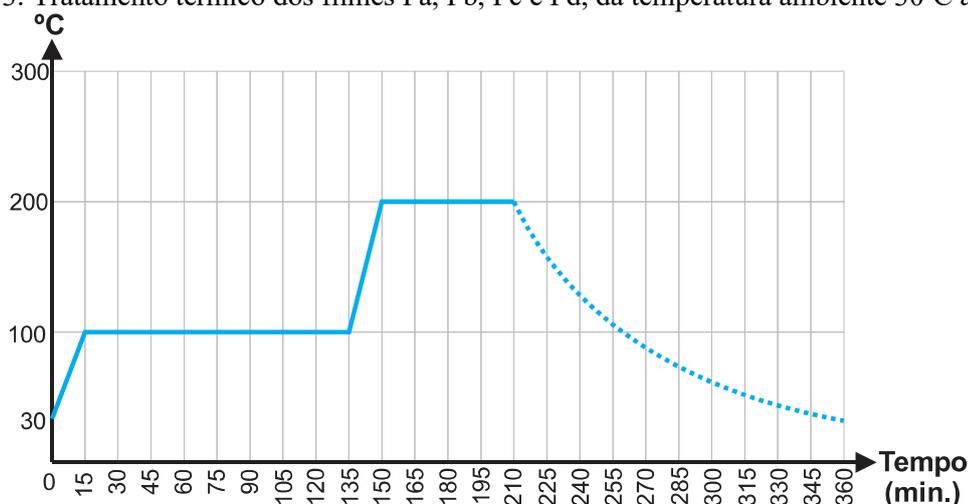
Fonte: Elaborada pelo autor a partir das fichas técnicas dos fabricantes (2023)

### 3.5 Tratamento Térmico

O tratamento térmico é um processo no qual as amostras, cristalinas ou não, são submetidas a temperaturas elevadas, cujo objetivo é o aumento da resistência mecânica, adesão entre partículas adjacentes e consequente uniformização da superfície. Com a finalidade de obter uma peça sólida, uniforme e regular.

Considerando que o coletor solar ficará exposto ao Sol, por pelo menos 6 HSP/dia, as amostras dos filmes foram submetidas ao processo de sinterização durante 6 horas, em forno aquecido por indução, tipo forno Mufla, Marca LABOFI, Modelo SP – 1200, com temperatura controlada – em quatro níveis – a partir da temperatura ambiente 30°C a 100°C (0 a 15 min.), 100°C (15 a 135 min), 100°C a 200°C (135 a 150 min.), até a temperatura máxima de 200°C (150 a 210 min.), e resfriamento natural (210 a 360 min). Conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33: Tratamento térmico dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd, da temperatura ambiente 30°C até 200°C



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

## 3.6 Caracterização dos pós e dos filmes

### 3.6.1 Granulometria dos pós

O ensaio de granulometria do resíduo de rochas ornamentais – RRO foi realizado no Laboratório de Material Cerâmico – LMC da UFPB, baseado na norma NBR-6502/ABNT(1995), aplicada às rochas e solos. A qual classifica a granulação das rochas em três tamanhos distintos: Fina – inferior a 0,05 mm ( $\leq 50 \mu\text{m}$ ); Média – entre 0,05 mm e 1 mm; Grossa – entre 1 mm e 5 mm.

O material seco compreendendo a massa total da amostra foi de 2975 g, obtido conforme processamento explicado nos itens 3.1 e 3.2, colocado com espátula em pequenas porções na peneira por vez, no agitador de peneiras eletromagnético, marca MBL, Modelo AGMAGB, por 10 minutos para a granulometria.

O peneiramento inicial teve a finalidade de excluir as partículas grossas retidas nas peneiras #80 e #120, posteriormente as partículas médias retidas na peneira #200, obtendo-se o total de massa seca líquida de 1645 g da qual foi se extraindo as partículas finas com a peneira #325, sendo esta última utilizada nas amostras.

Os óxidos foram adquiridos, de fornecedores do Brasil, com as seguintes granulometrias e respectivos diâmetros das partículas: óxido de cobre ( $\text{CuO } \varnothing \leq 38 \mu\text{m}$ ) e Carbetto de Silício ( $\text{SiC } \varnothing \leq 45 \mu\text{m}$ ).

### 3.6.2 Difração de Raios – X (DRX)

A difração de raios – X dos pós foi realizada no Laboratório de combustíveis – LACOM/UFPB, no equipamento marca SHIMADZU, Modelo XRD 6000, com anodo de cobre e goniômetro de 275 mm. Com intervalo de varredura 2Theta de  $10^\circ$  a  $80^\circ$ .

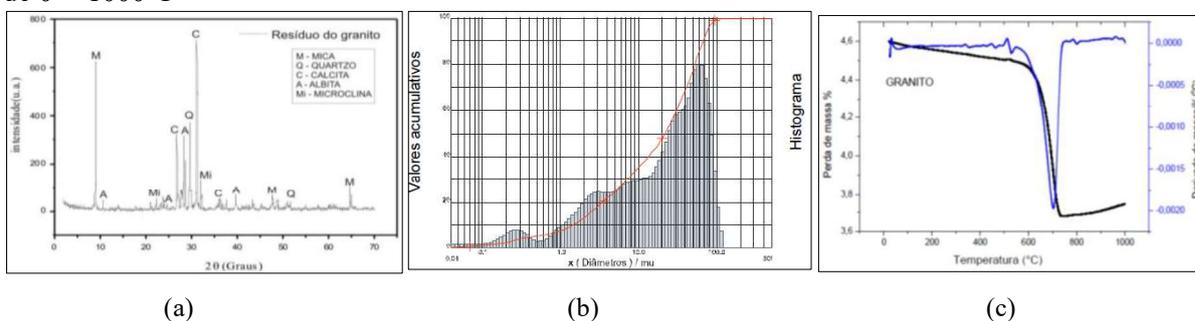
A técnica de DRX permite investigar os tipos minerais contidos nas amostras, tamanhos dos cristais, fases, quantificação do material em peso ou em percentual entre outros.

Considerando que o resíduo de rochas ornamentais – RRO utilizado nesta pesquisa é composto por pós da serragem e beneficiamento de granito, mármore e quartzito; são apresentados alguns exemplos de informações obtidas a partir da DRX.

BLATT e TRACY (1997, p.66), realizaram análises de amostras de granito e encontraram uma média da sua composição química, em porcentagem de peso, obtendo os seguintes elementos, compósitos e valores respectivamente: SiO<sub>2</sub> (72,04%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14,42%), K<sub>2</sub>O (4,12%), Na<sub>2</sub>O (3,69%), CaO (1,82%), FeO (1,68%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,22%), MgO (0,71%), TiO<sub>2</sub> (0,30%), P<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,12%) e MnO (0,05%). No entanto, deve-se considerar que esses valores variam em função do local e região da jazida onde o mineral foi extraído.

A Figura 34 apresenta a caracterização do pó de granito, com gráficos de DRX, ensaios de granulometria e análise de TG/DTG do resíduo de granito.

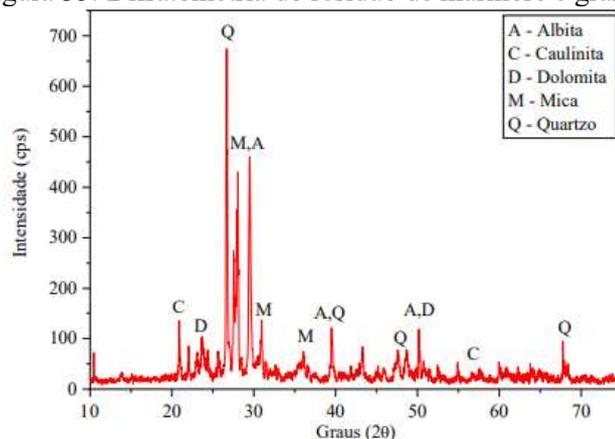
Figura 34: (a) Difratoograma DRX dos pós do granito; (b) Granulometria com distribuição das partículas do granito com diâmetro médio de 28,31 µm; (c) Curvas TG/DTG do resíduo do granito em temperatura de 0° - 1000°C



Fonte: SALES *et al.* (2011, p. 1288 – 1299).

Outro exemplo apresentado na Figura 35 onde identificam-se os principais componentes mineralógicos presentes no granito, como picos acentuados de quartzo (ICSD 89278), mica (ICSD 84263) e picos de albita (ICSD 68913), esses componentes referem-se ao granito e aos picos de dolomita (ICSD 10404) e calcita (ICSD 84263), presentes no mármore. Segundo os autores esses resultados estão em conformidade com as composições mineralógicas das literaturas pesquisadas (MELLO, 2006; AGUIAR *et al.*, 2012 e SANTOS *et al.*, 2014). Apud BARBOSA <sup>(b)</sup> *et al.* (2022).

Figura 35: Difratometria do resíduo de mármore e granito

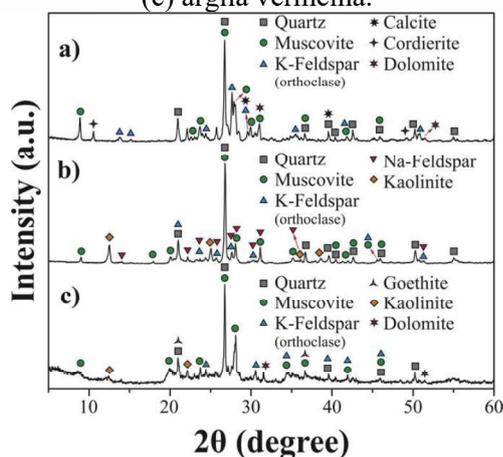


FONTE: BARBOSA <sup>(b)</sup> *et al.* (2022)

ARAÚJO <sup>(b)</sup> *et al.* (2020), publicaram estudo sobre resíduo de granito onde apresentaram aspectos sobre os efeitos da adição do resíduo de granito na produção de cerâmicas vermelhas (tijolos e telhas).

Os autores apresentaram formulações do resíduo de granito para a produção de porcelanatos e cerâmica vermelha evidenciando as propriedades físico-mecânicas, propriedades tecnológicas e concluíram que é um material promissor para utilização na indústria cerâmica.

Figura 36: Padrões de difração de raios – X de (a) resíduo de granito, (b) formulação de porcelanato e (c) argila vermelha.



FONTE: ARAÚJO <sup>(b)</sup> *et al.* (2020)

### 3.6.3 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

A espectroscopia FTIR é uma técnica que utiliza a energia modulada do infravermelho médio para pesquisar uma amostra.

Para a análise da espectroscopia de infravermelho foi encaminhado 1g de cada amostra ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos – LabFilm do Centro de energias alternativas e renováveis – CEAR/UFPA. As análises foram realizadas no equipamento Marca

SHIMADZU, Modelo IRTracer – 100. Aplicando o método Refletância Total Atenuada – ATR na faixa do Infravermelho Médio – MID.

### 3.6.4 Análise térmica TGA/DSC

As análises térmicas são amplamente utilizadas em pesquisas científicas, avaliação de desempenho de materiais, controle de qualidade dos materiais, fabricação de materiais, comparação de materiais etc.

A caracterização por análise termogravimétrica (TGA) e por calorimetria exploratória diferencial (DSC) das amostras A1 a A5 foi realizada no laboratório LABFILM do Centro de Energias Alternativas e Renováveis – CEAR, da UFPB, em equipamento marca TA Instruments – Analisador Térmico Simultâneo, modelo SDT 650.

O método de análise consistiu em enviar 1g de cada amostra, da qual foi extraída uma porção do pó, colocada no porta-amostra do analisador térmico, submetida ao aquecimento com passos de 15°C/min, partindo da temperatura ambiente, até 1000°C na atmosfera de ar sintético.

De acordo com a Associação Internacional de Análises Térmicas e Calorimetria (ICTAC, 2006), a análise térmica é “o estudo da relação entre uma propriedade física ou química da amostra e sua temperatura, enquanto a amostra é submetida ao aquecimento ou resfriamento a uma programação controlada, em um ambiente com atmosfera específica”.

Os materiais estudados nesta pesquisa doutoral são de origem mineral e de acordo com (DENARI, 2012, p.8), os métodos térmicos e aplicações dos métodos da análise térmica são úteis para a caracterização de materiais no que diz respeito a eventos relacionados com a estabilidade térmica, decomposição térmica, reatividade química, controle de qualidade – pureza, estudos termodinâmicos, efeitos de solvatação e hidratação, entre outros.

IONASHIRO (2004, p.6), descreve que “foram muitos anos de tentativas para se chegar a um conhecimento detalhado sobre as alterações que o aquecimento pode provocar na massa das substâncias, a fim de se poder estabelecer a faixa de temperatura em que se começa a decompor, bem como para seguir o andamento de reações de desidratação, oxidação, decomposição etc.”

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica fundamentada no estudo da variação de massa ( $\Delta m$ ) de uma determinada amostra por transformação física provocada por sublimação, evaporação e condensação ou por transformação química provocada por degradação, decomposição e oxidação em função do tempo ou da temperatura aplicada na

amostra sob uma atmosfera específica.

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma técnica destinada a medir mudanças nas características físicas ou químicas da amostra em função de temperatura com variação controlada. A variação física ou química da amostra, observada em função da temperatura, é obtida pelo cálculo da diferença de entalpia ( $\Delta H$ ).

Com o conhecimento dessas técnicas TGA e DSC podemos identificar várias características da(s) amostra(s) analisada(s): decomposição térmica, decomposição oxidativa, oxidação, desidratação, sublimação, evaporação, fusão, cristalização, transição vítrea etc.

### 3.6.5 Análises de UV-Vis dos filmes

A análise UV-Vis é uma técnica baseada na espectroscopia de fótons, onde é aplicada uma luz na faixa do espectro visível, do ultravioleta próximo e do infravermelho próximo. A análise foi realizada no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos – LabFilm do CEAR/UFPB, no espectrofotômetro UV-Vis, modelo UV-2600, Marca SHIMADZU, o qual é capaz de fazer medições no comprimento de onda de 220 nm até 1400 nm.

Os filmes foram aplicados com o composto da amostra A3 nos substratos de aço inoxidável AISI 304 e classificados em (Fa), (Fb), (Fc) e (Fd).

A análise consistiu na varredura dos filmes com a finalidade de obter os valores da absorvância e refletância, no intervalo de comprimento de onda entre 220 nm a 1400 nm, com passos de 1 nm.

A primeira análise foi realizada com os filmes antes do tratamento térmico. A segunda análise foi realizada com os filmes depois do tratamento térmico (sinterização).

Absorvância de um determinado material é a proporção de luz que é absorvida por esse material. Os valores da absorvância podem variar numa escala logarítmica de um valor positivo maior que 0 (100% de transmitância) até 2 (1% de transmitância), matematicamente pode ser representada pela equação:

$$A_{\lambda} = \log_{10} \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (20)$$

Onde:

A = absorvância

$I_0$  = Intensidade da luz antes de passar pela amostra

I = Intensidade da luz que passou e foi retida pela amostra.

Os valores maiores de absorvância estão relacionados com a pouca luz transpondo a amostra. Por outro lado, os valores menores estão relacionados com a maior parte da luz transpondo completamente a amostra. Conseqüentemente, pode-se deduzir que entre absorvância e transmitância há uma relação inversamente proporcional, ou seja, à medida que a absorvância de um material aumenta, a transmitância diminui, conforme se apresenta na equação:

$$\frac{\text{Luz absorvida } [\alpha]}{\text{Luz total}} + \frac{\text{Luz refletida } [\rho]}{\text{Luz total}} + \frac{\text{Luz transmitida } [\tau]}{\text{Luz total}} = \frac{\text{Luz total}}{\text{Luz total}} \quad (21)$$

### **Observações importantes:**

No caso de material opaco, a luz transmitida ( $\tau$ ) é igual a zero;

Absorvância = Luz total / luz total = 1 (em decimal) ou 100% (em porcentagem\*).

Os valores da absorvância gerados pelo espectrofotômetro UV-VIS, modelo UV-2600, do LabFilm/CEAR/UFPB, foram fornecidos em decimais, portanto são valores adimensionais.

Para converter em porcentagem\* foi utilizado o recurso matemático cuja denominação é normalização, o qual consiste em mudar os valores das colunas numéricas num conjunto de dados transformando-os numa escala comum, sem, no entanto, distorcer as diferenças nos intervalos, nem perder informações. Neste caso, foi utilizado aplicativo de planilha eletrônica e análise de dados gráficos, com uma função matemática que consistiu em dividir todos os pontos de varredura de cada filme pelo maior valor obtido e depois multiplicar por 100, passando o mesmo a ser a base 100%.

### **3.6.6 Difractometria de raios-X (DRX) dos filmes**

A difração de raios – X dos filmes foi realizada no Laboratório de Síntese de materiais em pó e bulk do GNMS/UFRN, no equipamento marca RIGAKU, Modelo MiniFlexII, com radiação de cobre e goniômetro de 150mm e tubo gerador de raios-X de 30Kv. Intervalo 2Theta com varredura de 10° a 80°.

### **3.6.7 Perfilometria dos filmes**

As análises de perfilometria foram realizadas no laboratório Integrado de Biomateriais (LABIO), PPGO/UFPB. No Perfilometro óptico marca Taylor Hobson, modelo CCI, lente 20x, com resolução de 1024 x 1024 pixel, campo de visão de 0,3mm x 0,3mm e cut of de 8  $\mu$ m.

### **3.6.8 Microdureza dos filmes**

O teste de microdureza do filme depositado na chapa de aço inoxidável 304 foi realizado

no Laboratório de Solidificação Rápida – LSR/PPCEM/UFPB, no equipamento HMV – *Micro Hardness Tester*, SHIMADZU.

O teste serviu para verificar a dureza superficial (microdureza). No ensaio foi aplicada uma força de 0,01 Kgf, equivalente à força de 98,07mN (ou massa de 10g), durante o tempo de 15s. Foram realizadas 3 leituras de cada filme.

O método Vickers, cuja abreviação é HV (*Hardness Vickers*), é normatizado pela ASTM E92 (*Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*).

O teste consistiu num ensaio em que um penetrador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada e ângulo entre as faces de 136° é comprimido contra a peça (amostra) por uma força pré-determinada e por um tempo pré-estabelecido, para obter um número de dureza ou grau de dureza do material.

Além de testar a dureza superficial dos filmes este ensaio está associado à verificação da capacidade de aderência do material aplicado no substrato do aço inoxidável AISI 304.

Os microscópios utilizados para medir as penetrações geralmente aumentam em até 500x, medindo com precisão de +0,5microns (µm), no entanto, dependendo da acurácia e experiência do operador, podem ser observadas diferenças de até +0,2 microns (µm).

A dureza realizada com a Pirâmide de Diamante de Vickers é a carga aplicada (em kgf) dividida pela área da superfície da indentação (em mm<sup>2</sup>), conforme a equação a seguir.

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \cong 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (22)$$

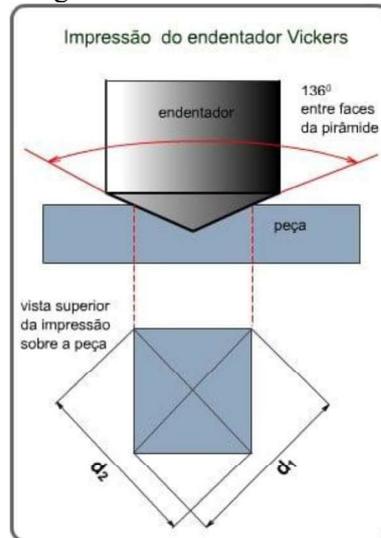
Onde:F – carga em kgf

d – média aritmética das duas diagonais

HV – Dureza de Vickers

A Figura 37, mostra o perfurador ou endentador da Pirâmide de Diamante de Vickers, onde observa-se que o mesmo tem a forma de uma pirâmide quadrada com ângulos de 136° entre as faces. O valor do cálculo de HV é encontrado a partir da média das medidas das diagonais e aplicados na equação anterior.

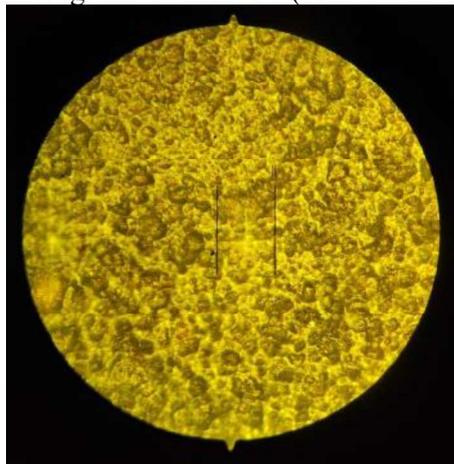
Figura 37: Diagrama básico do endentador de Vickers



Fonte: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6560-teste-da-microdureza](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza) acesso:  
novembro/2023.

Por exemplo, a seguir é apresentada uma imagem obtida no microdurômetro HMV – *Micro Hardness Tester*, SHIMADZU, do LSR/UFPB ao realizar o teste de microdureza Vickers numa região aleatória do filme Fb (com tratamento térmico). Após a endentação (perfuração) com massa de 0,1kgf, aplicada na superfície, durante 15 segundos, obteve-se uma imagem clara-dourada marcada entre duas linhas pretas no centro, semelhante a um “X” circunscrito no quadrado que consta na Figura 38.

Imagem 7: Fotomicrografia do filme Fb (com tratamento térmico) 500x



Fonte: LSR/CT/UFPB (2024)

### 3.6.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd – sem tratamento térmico e com tratamento térmico – foi realizado no Laboratório de Materiais

e Biosistemas – LAMAB/PPCEM/UFPB, em equipamento TESCAN VEGA, modelo S5123 e acelerador com voltagem de 10kV.

Considerando que, pelas características dos materiais aplicados, os filmes produzidos possuem baixa condutividade elétrica, todos os filmes tiveram as superfícies metalizadas com (Au) para aumentar a velocidade de escoamento dos elétrons. As imagens, monocromáticas, foram geradas em três tamanhos distintos de significância: 500x, 2000x (2,0kx) e 5000x (5,0kx).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Granulometria do resíduo

A Tabela 8 apresenta o resultado da análise granulométrica do resíduo de rocha ornamental utilizado neste trabalho. As informações técnicas e todos os dados foram tabulados em planilha eletrônica.

Tabela 8: Granulometria da matéria-prima seca

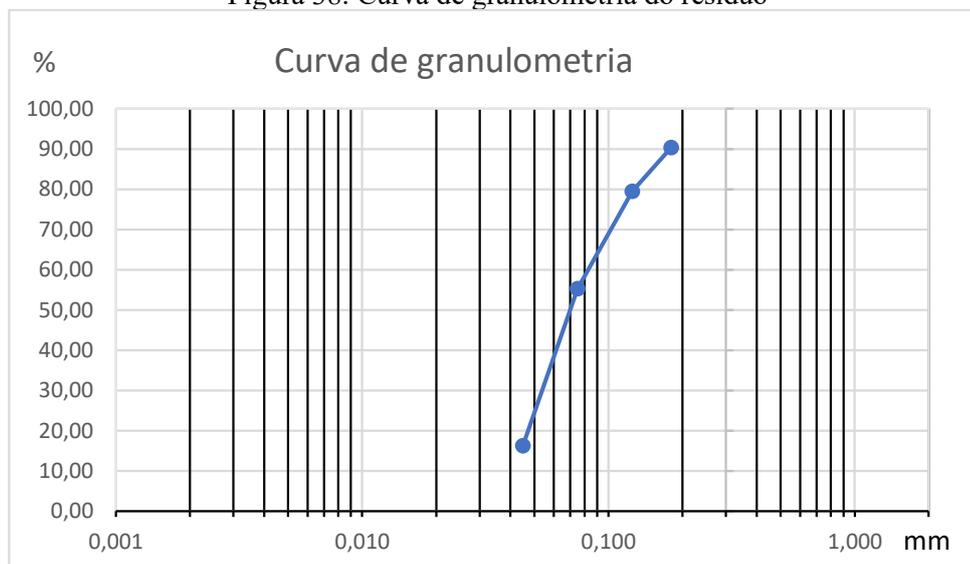
ABNT (#)	Abertura das peneiras (mm)	Massa de resíduo retido em cada peneira (g)	Porcentagem de resíduo retido em cada peneira ou fundo (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Porcentagem de resíduo que passa na peneira (%)
80	0,180	287	9,65	9,65	90,35
120	0,125	324	10,89	20,54	79,46
200	0,075	719	24,17	44,71	55,29
325	0,045	1161	39,03	83,73	16,27
Fundo		484	16,27	100,00	0,00
<b>Massa seca bruta</b>		<b>2975</b>			

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Considerando os valores observados na Tabela 8, verifica-se no ensaio de granulometria, que não houve a presença de partículas grossas (1-5 mm); a maior parte é constituída por partículas médias (0,05-1 mm) e a menor parte por partículas finas (<0,05 mm).

Com os valores resultantes da granulometria apresentados na tabela 8 foi elaborado o gráfico da curva de granulometria. Tendo em vista a proximidade milimétrica entre as aberturas das peneiras, o gráfico é apresentado em escala logarítmica.

Figura 38: Curva de granulometria do resíduo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

## 4.2 FTIR dos pós

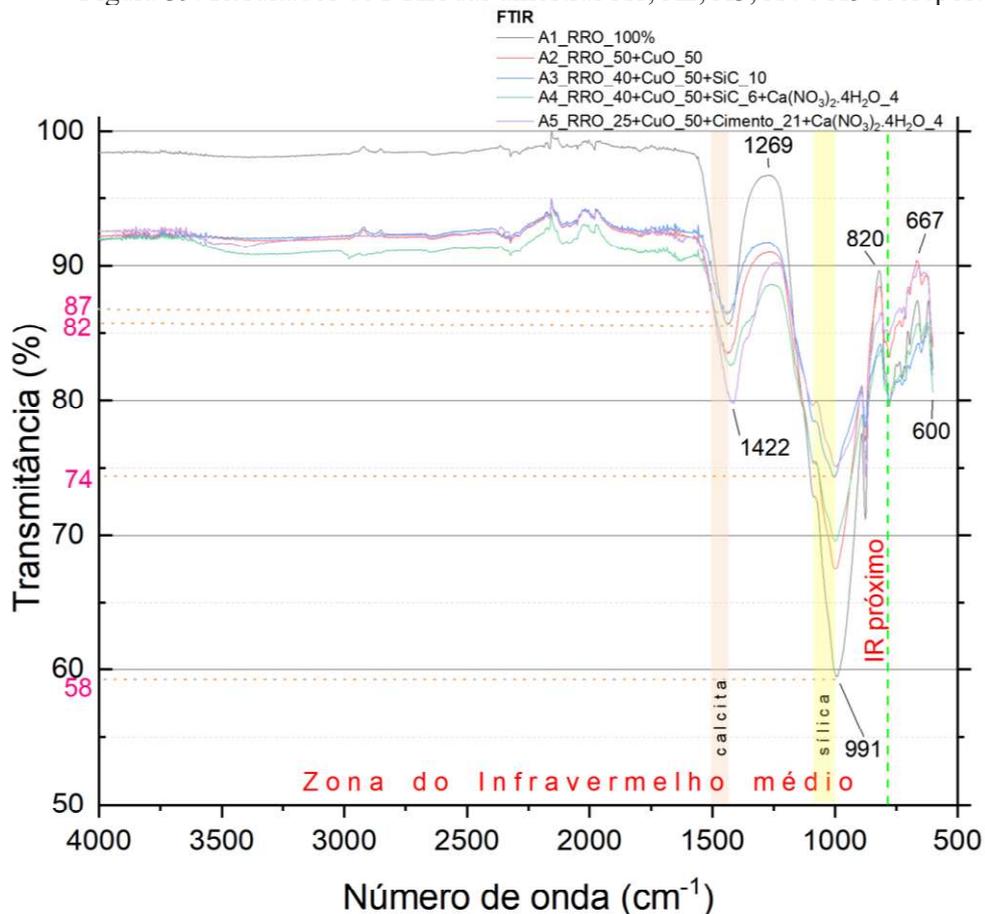
Os resultados de FTIR foram obtidos a partir da posição inicial ( $600\text{ cm}^{-1}$ ) até a posição final ( $4000\text{ cm}^{-1}$ ), utilizando a técnica de Reflexão Total Atenuada – ATR. Na qual à medida que foi aumentando a carga da radiação infravermelha houve mudanças de posição (deslocamentos) para números de onda maiores. Surgiram picos nos seguintes comprimentos de onda: ( $667\text{ cm}^{-1}$ ), ( $820\text{ cm}^{-1}$ ) e ( $1269\text{ cm}^{-1}$ ).

Em termos quantitativos constatou-se, em torno do número de onda ( $1000\text{ cm}^{-1}$ ), o aumento de 28% da transmitância da amostra A1 para a amostra A3, no infravermelho médio.

A Figura 39 mostra a localização dos picos que os compósitos das amostras A2, A3, A4 e A5 são fotoestáveis, considerando que é notável a pequena diferença entre ambos, especialmente entre os números de onda ( $1500\text{ a }4000\text{ cm}^{-1}$ ) caracterizado pelo alongamento do platô.

De acordo com STUART (2007), para materiais inorgânicos, na faixa do número de onda de  $1.000\text{ a }1.100\text{ cm}^{-1}$ , ocorre a maior concentração de sílica.

Figura 39: Resultados de FTIR das amostras A1, A2, A3, A4 e A5 sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

### 4.3 Análises térmicas: DSC e TGA

A análise térmica por Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC foi realizada para medir as mudanças nas características físicas e químicas de cada amostra em função da variação de temperatura controlada, na qual é 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.

Os resultados obtidos são apresentados nos gráficos a seguir, os quais foram editados para facilitar a interpretação nos pontos mais importantes.

#### 4.3.1 Análise DSC/TGA da amostra A1:

A Figura 40 apresenta o gráfico das curvas TGA/DSC da amostra A1 cujo compósito contém resíduo de rochas ornamentais (RRO) oriundas do beneficiamento de granito, mármore e quartzito, com predominância de rochas graníticas, na proporção de 100% ou 1g por cada 1g de peso.

O método de análise consistiu em enviar 1g da amostra A1, da qual foi extraída 12,07172mg de pó, submetida ao aquecimento com passos de 15°C/min, partindo da temperatura ambiente, até 1000°C na atmosfera de ar sintético.

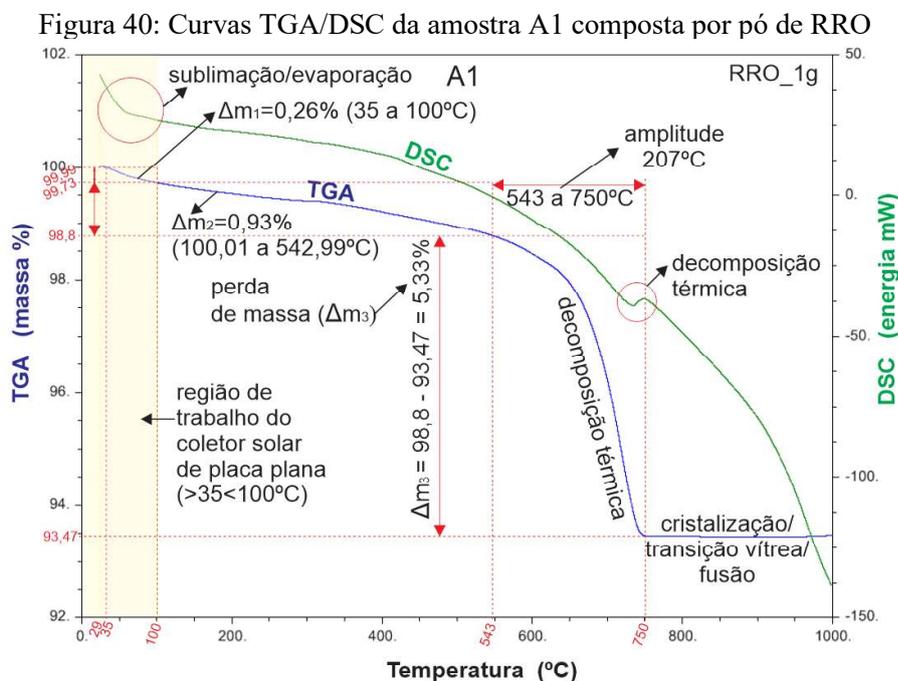
Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra A1 e utilizando dados do arquivo (.txt) com valores gerados pelo equipamento SDT650, dividindo as perdas em três estágios distintos: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana, baixa temperatura (>35°C<100°C), onde se verificou provavelmente a perda de massa úmida de 0,26%; ( $\Delta m_2$ ) região de média temperatura (100,01°C a 542,99°C), onde se verificou provavelmente perdas de massa úmida e/ou resíduos orgânicos de 0,93%; ( $\Delta m_3$ ) região de alta temperatura (543°C a 750°C) em que verificou-se perda de massa sólida 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%, caracterizando a amostra A1 como a que apresentou maior perda de massa.

A perda de massa se caracterizou provavelmente por decomposição térmica dos materiais aplicados; após o intervalo acima citado verificou-se 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 a 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 A1 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 cinco amostras, o material da amostra A1 (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 aos demais, sendo suscetível a maior expansão térmica, retração, microfissuras, fissuras e deformações.



Fonte: ANDRADE *et al.* (p.192, 2024). Adaptado.

#### 4.3.2 Análise DSC/TGA da amostra A2:

A Figura 41 apresenta o gráfico das curvas TGA/DSC da amostra A2 cujo compósito contém resíduo de rochas ornamentais (RRO) de predominância granítica, na proporção de 50%

ou 0,5 g por cada 1 g de peso; Óxido de cobre (CuO), na proporção de 50% ou 0,5 g por cada 1 g de peso.

O método de análise de 1 g de pó do compósito, do qual extraiu-se 12,00787 mg para análise, foi realizado com passos de 15°C / min, partindo da temperatura 47,4°C, até 910°C, na atmosfera de ar sintético.

Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra A2 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, dividindo as perdas de massa em três estágios: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana (>35°C<100°C), no entanto nesta amostra a temperatura inicial de leitura foi de 47,4°C, então leu-se (>47,4°C<100°C), onde se verificou perda de massa úmida de 0,05%; ( $\Delta m_2$ ) região de média temperatura (100,01°C a 572,99°C), onde se verificou perda de massa úmida e /ou resíduos orgânicos de 0,74%; ( $\Delta m_3$ ) região de alta temperatura (573°C a 749°C) em que verificou-se perda de massa sólida de 2,61%, com amplitude térmica – neste intervalo – de 176°C e razão perda de massa x amplitude térmica igual a 0,015. Ao somar  $\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3$  obtendo perda de massa total de 3,4%.

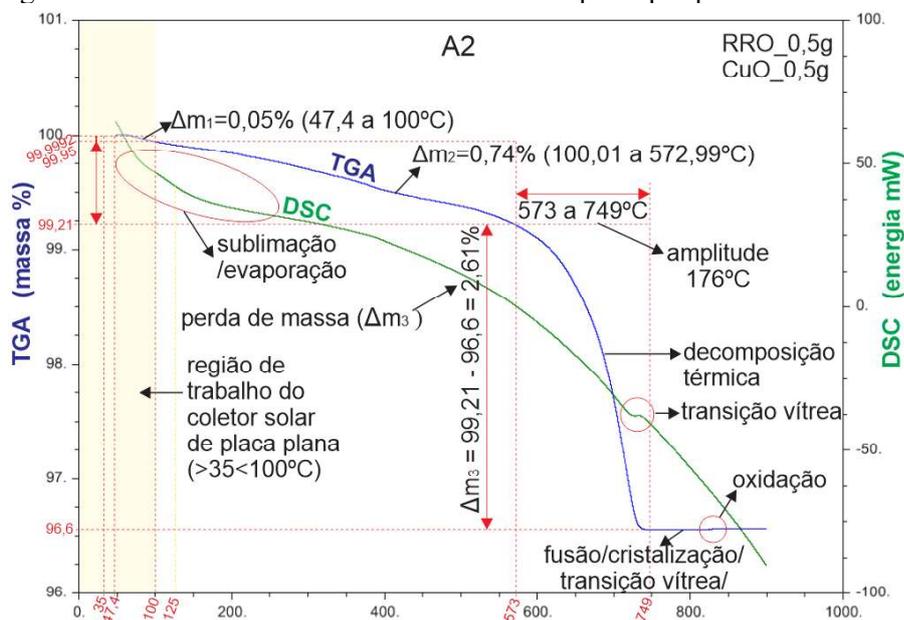
Apesar da temperatura de partida maior do que o padrão inicial (>35°C) para a região de trabalho do coletor solar de placa plana, é provável que tenha um pequeno desvio na soma da perda de massa total. Considerou-se a amostra como válida porque está dentro do parâmetro aplicável ao coletor solar de placa plana, (>35°C<100°C).

A perda de massa no estágio  $\Delta m_3$  se caracterizou provavelmente por decomposição térmica dos materiais e/ou elementos químicos aplicados; após o intervalo 573°C a 749°C, verificou-se no intervalo de >749°C a 910°C, uma linha reta característica de cristalização/transição vítrea. Apesar da linha reta – na análise de TGA – também caracterizar fusão, é pouco provável que se trate do granito, pois de acordo com a literatura publicada, seu ponto de fusão se dá entre 1215 e 1260°C, já o quartzito é em torno de 1710°C. Conforme já explicado na análise anterior, então é muito provável que seja a fusão do mármore que ocorre entre 700°C a 1000°C, ou ainda, de outras impurezas e demais elementos químicos presentes no material. Após o intervalo supra citado verificou-se no entorno de 825°C, uma curva característica de oxidação com ganho de massa pouco significativo; seguida por uma linha reta característica de transição vítrea.

Analisando a curva de DSC (linha verde) no gráfico da amostra A2 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, verificou-se no entorno da temperatura de 125°C uma curva característica de sublimação/evaporação por liberação de energia; no entorno

de 730°C observou-se uma curva característica de transição vítrea.

Figura 41: Curvas TGA/DSC da amostra A2 composta por pós de RRO + CuO



Fonte: Curvas obtidas no SDT 650, editado pelo autor (2023).

#### 4.3.3 Análise DSC/TGA da amostra A3:

A Figura 42 apresenta o gráfico das curvas TGA/DSC da amostra A3 cujo compósito contém resíduo de rochas ornamentais (RRO) de predominância granítica, na proporção de 40% ou 0,4 g por cada 1g de peso; Óxido de cobre (CuO) na proporção de 50% ou 0,5 g por cada 1 g de peso; e, Carbetto de silício (SiC) na proporção de 10% ou 0,1 g por cada 1 g de peso.

O método de análise de 1 g 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.

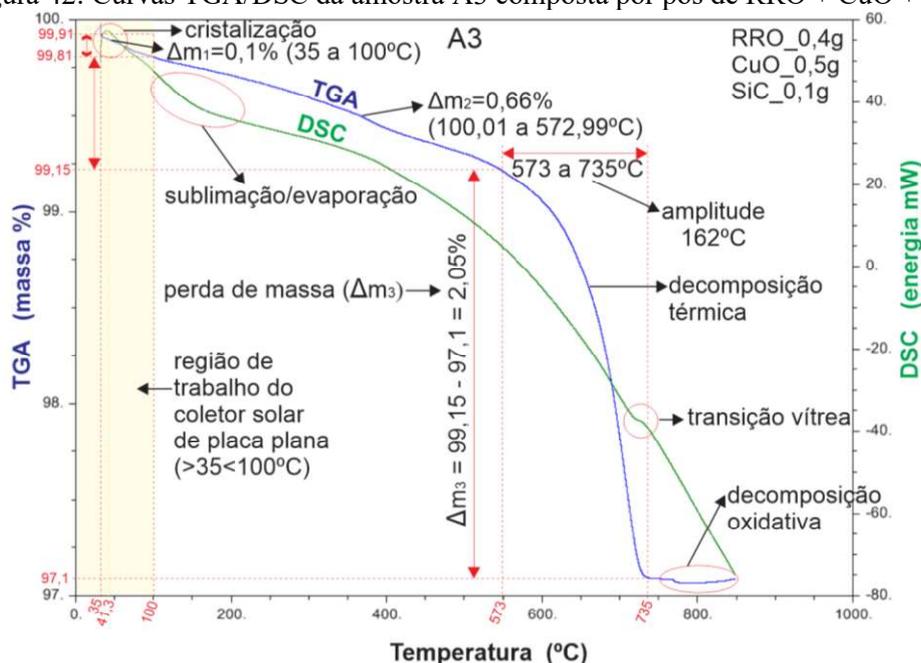
Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra A3 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, dividindo as perdas de massa em três estágios: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana (>35°C<100°C), onde se verificou perda de massa de 0,1%; ( $\Delta m_2$ ) 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 A3 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 A3 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, 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 42: Curvas TGA/DSC da amostra A3 composta por pós de RRO + CuO + SiC



Fonte: ANDRADE *et al.* (p.192, 2024). Adaptado.

#### 4.3.4 Análise DSC/TGA da amostra A4:

A Figura 43 apresenta o gráfico das curvas TGA/DSC da amostra A4 cujo compósito contém resíduo de rochas ornamentais (RRO) de predominância granítica, na proporção de 40% ou 0,4 g por cada 1 g de peso; Óxido de cobre (CuO) na proporção de 50% ou 0,5 g por cada 1 g de peso; e, Carbetto de silício (SiC) na proporção de 6% ou 0,06 g por cada 1 g de peso; e, nitrato de cálcio tetra hidratado ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ ), na proporção de 4% ou 0,04 g por 1 g de peso.

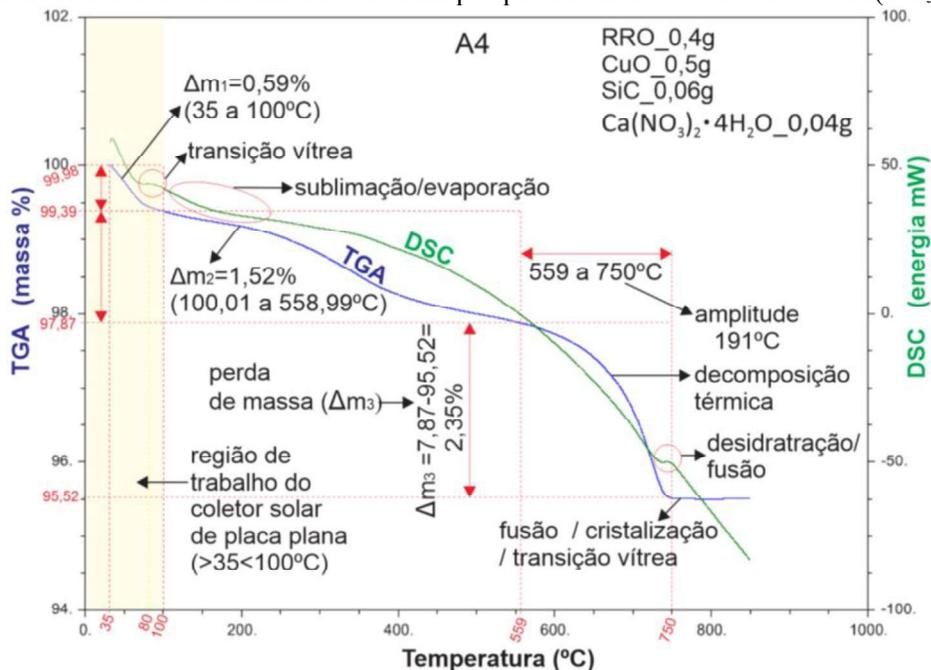
O método de análise de 1 g de pó do compósito, do qual extraiu-se 21,61079 mg para análise, foi realizado com passos de 15°C / min, partindo da temperatura ambiente, até 860°C, na atmosfera de ar sintético.

Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra A4 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, nos três estágios denominados: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana ( $>35^\circ\text{C}<100^\circ\text{C}$ ), onde se verificou perda de massa de 0,59%; ( $\Delta m_2$ ) região de média temperatura ( $100,01^\circ\text{C}$  a  $558,99^\circ\text{C}$ ), onde se verificou perda de massa de 1,52%; ( $\Delta m_3$ ) região de alta temperatura ( $560^\circ\text{C}$  a  $750^\circ\text{C}$ ) em que verificou-se perda de massa de 2,35%, com amplitude térmica – neste intervalo – de  $191^\circ\text{C}$  e razão perda de massa x amplitude térmica igual a 0,012. Somando  $\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3$  obtendo perda de massa total de 4,46%.

A perda de massa se caracterizou provavelmente por decomposição térmica dos materiais e/ou elementos químicos aplicados; após o intervalo de  $\Delta m_3$  verificou-se no entorno de  $775^\circ\text{C}$ , uma curva característica de fusão / cristalização / transição vítrea, seguida por ligeira decomposição oxidativa aos  $780^\circ\text{C}$ , e posteriormente, aos  $820^\circ\text{C}$ , observou-se oxidação com ganho de massa pouco significativo.

Analisando a curva de DSC (linha verde) no gráfico da amostra A4 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, verificou-se no entorno da temperatura de  $80^\circ\text{C}$  uma curva característica de transição vítrea; no entorno de  $190^\circ\text{C}$  verificou-se uma curva característica de sublimação/evaporação provocada provavelmente por reação endotérmica, a qual absorve energia e calor; no entorno de  $740^\circ\text{C}$ , observou-se uma curva característica de desidratação/fusão.

Figura 43: Curvas TGA/DSC da amostra A4 com por pós de  $\text{RRO} + \text{CuO} + \text{SiC} + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$



Fonte: Curvas obtidas no SDT 650, editado pelo autor (2023).

#### 4.3.5 Análise DSC/TGA da amostra A5:

A Figura 44 apresenta o gráfico das curvas TGA/DSC da amostra A5 cujo compósito contém resíduo de rochas ornamentais (RRO) de predominância granítica, na proporção de 25% ou 0,25 g por cada 1 g de peso; Óxido de cobre (CuO) na proporção de 50% ou 0,5 g por cada 1 g de peso; Cimento Portland CP32-Z na proporção de 21% ou 0,21 g por cada 1 g de peso; e, nitrato de cálcio tetra hidratado ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ ), na proporção de 4% ou 0,04 g por 1 g de peso.

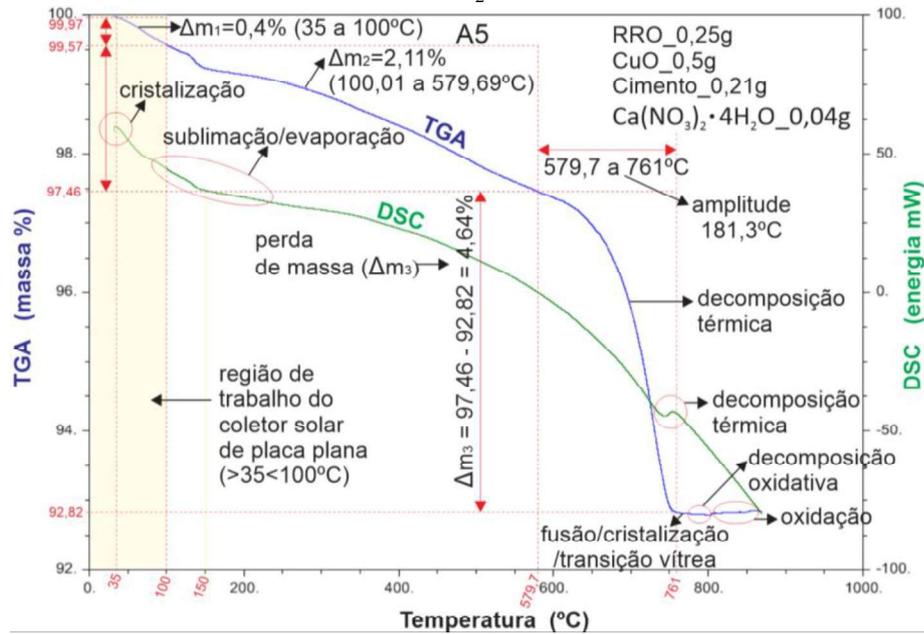
O método de análise de 1 g de pó do compósito, do qual extraiu-se 12,42009 mg para análise, foi realizado com passos de  $15^\circ\text{C} / \text{min}$ , partindo da temperatura ambiente, até  $880^\circ\text{C}$ , na atmosfera de ar sintético.

Analisando a curva de TGA (linha azul) no gráfico da amostra A5 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento SDT650, nos três estágios: ( $\Delta m_1$ ) região de trabalho do coletor solar de placa plana ( $>35^\circ\text{C} < 100^\circ\text{C}$ ), verificou-se perda de massa de 0,4%; ( $\Delta m_2$ ) região de média temperatura ( $100,01^\circ\text{C}$  a  $579,6^\circ\text{C}$ ), onde se verificou perda de massa de 2,11%; ( $\Delta m_3$ ) região de alta temperatura ( $579,7^\circ\text{C}$  a  $761^\circ\text{C}$ ) onde verificou-se perda de massa de 4,64%, com amplitude térmica – neste intervalo – de  $181,3^\circ\text{C}$  e razão perda de massa x amplitude térmica igual a 0,026. Somando  $\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3$  obtendo perda de massa total de 7,15%.

A perda de massa se caracterizou provavelmente por decomposição térmica dos materiais e/ou elementos químicos aplicados; após o intervalo acima citado verificou-se reta característica de fusão/cristalização/transição vítrea; seguida por decomposição oxidativa e após  $800^\circ\text{C}$  verificou-se ligeira oxidação com ganho de massa pouco significativo.

Analisando a curva de DSC (linha verde) no gráfico da amostra A4 e utilizando dados do arquivo (.txt) gerados pelo equipamento, verificou-se no entorno da temperatura ambiente até  $50^\circ\text{C}$  uma curva característica de cristalização; no entorno de  $190^\circ\text{C}$  verificou-se uma curva característica de sublimação/evaporação provocada provavelmente por reação endotérmica, a qual absorve energia e calor; no entorno de  $750^\circ\text{C}$ , observou-se uma curva característica de decomposição térmica.

Figura 44:  
Curvas TGA/DSC da amostra A5 composta por pós de RRO + CuO + Cimento Portland +  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$



Fonte: Curvas obtidas no SDT 650, editado pelo autor (2023).

Tabela 10: Resumo dos dados detalhados nos gráficos de análises térmicas TGA x DSC

Amostra	Perda de Massa %			Perda total %	Amplitude °C	Razão $\Delta m_3/\text{Amp.}$	Análise
	$\Delta m_1$ (úmida)	$\Delta m_2$ (úmida e orgânica)	$\Delta m_3$ (sólida)				
A1	0,26	0,93	5,33	6,52	207	0,026	Melhor desempenho
A2	0,05	0,74	2,61	3,40	176	0,015	
A3	0,10	0,66	2,05	2,81	162	0,013	
A4	0,59	1,52	2,35	4,46	191	0,012	
A5	0,40	2,11	4,64	7,15	181,3	0,026	

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos gráficos de TGA e DSC

A amostra selecionada foi a (A3), por apresentar menor perda de massa total, consequentemente possui as melhores características térmicas, pois quanto menor for a perda de massa, menor será a probabilidade de ocorrer microfissuras, fissuras, trincas, frestas e fendas.

De acordo com a ABNT / NBR 9575/2010, essas ocorrências também podem ser ocasionadas por deformações ou deslocamento do substrato, tal norma expressa também que essas deformações podem ser estática ou dinâmica – cíclica finita ou infinita.

#### 4.4 Difração de raios-x (DRX)

##### 4.4.1 DRX dos pós

Conhecendo os equipamentos, as condições de análise da difração de raios – X e parâmetros de materiais similares publicados e descritos no item 3.6.2 são apresentados os

resultados obtidos na análise dos pós das amostras, onde foram identificados os minerais presentes em cada compósito.

Na tabela 9 observa-se índices dos minerais mais comumente encontrados em rochas graníticas e a comparação com os índices encontrados na amostra A1 (RRO). Enfatizando que os resultados podem variar em função da localização da jazida onde o minério foi extraído.

Tabela 9: Índices percentuais médios dos minerais presentes no granito puro e no RRO (A1)

Nome Mineral	Alumina	Cálcio	Hematita	Ferro	Potássio	Magnésio	Manganês	Superóxido de Sódio	Fósforo	Quartzo	Titânio
Fórmula	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>MnO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>
Literatura <sup>(1)</sup>	14,42	1,82	1,22	1,68	4,12	0,71	0,05	3,69	0,12	72,04	0,30
A1 (RRO) <sup>(2)</sup>	0,01	0,67	1,61	0,27	4,80	6,86	3,88	3,22	0,00	75,57	3,11

<sup>(1)</sup>Valores médios percentuais de peso verificados na literatura para granito puro;

<sup>(2)</sup>Percentual de peso após DRX da amostra A1 (RRO);

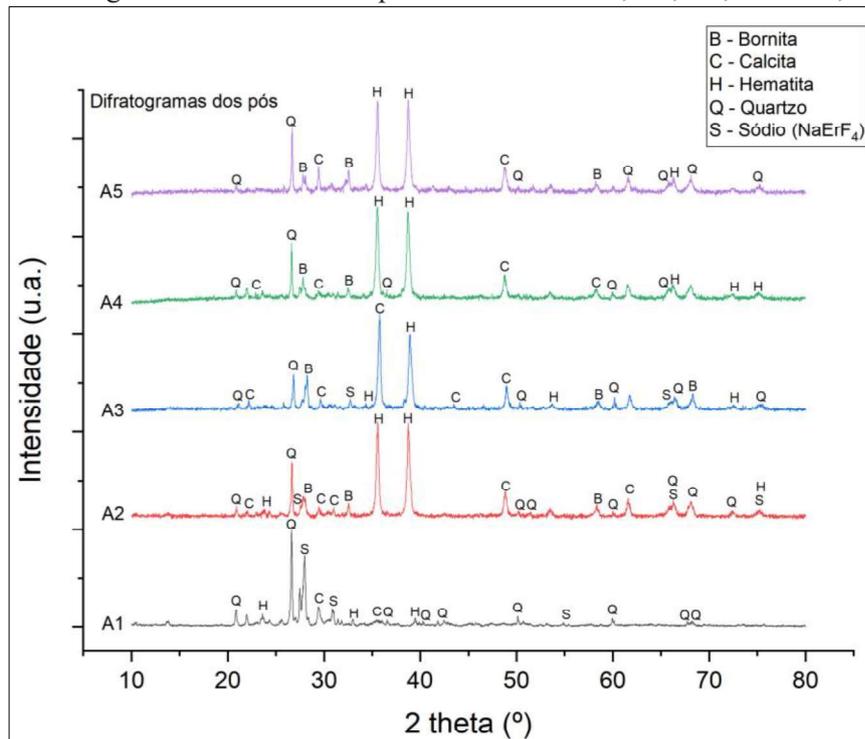
Fonte: <sup>(1)</sup> BLATT e TRACY (1997, p.66). Adaptado; <sup>(2)</sup> Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 45, são apresentados os difratogramas de DRX realizado para identificar os minerais presentes nas amostras, tendo obtido os seguintes resultados: amostra A1 contém os minerais calcita, hematita, quartzo e cloreto de sódio; A2 contém bornita (CuO adicionado ao experimento), hematita e quartzo; A3 contém bornita (CuO adicionado ao experimento) calcita, hematita, quartzo (incluído o SiC adicionado ao experimento) e sulfeto de sódio érbio); A4 contém bornita (CuO adicionado ao experimento), calcita, hematita e quartzo; A5 contém bornita (CuO adicionado ao experimento), calcita, hematita e quartzo. É importante observar que este ensaio de DRX foi realizado apenas com os pós de RRO puro e dos compostos, sem a adição da cola Araldite nem da cola térmica.

Nos difratogramas sobrepostos, verifica-se nos pós da amostra A1 (RRO puro) que os picos com maiores intensidades estão localizados entre 25° a 30°, com predominância da fase do mineral quartzo. Por outro lado, ao observar os compostos das amostras A2, A3, A4 e A5, constata-se que os picos com maiores intensidades estão entre 25° e 50°, com predominância das fases dos minerais quartzo e hematita, sendo esta última a mais estável.

Verificou-se que de modo geral houve poucas variações angulares considerando que a maioria das fases se mantiveram – nos vários difratogramas – na mesma posição ou com poucas mudanças.

Figura 45: Difratogramas de raios-X dos pós das amostras A1, A2, A3, A4 e A5, sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.4.2 DRX dos filmes sem tratamento térmico

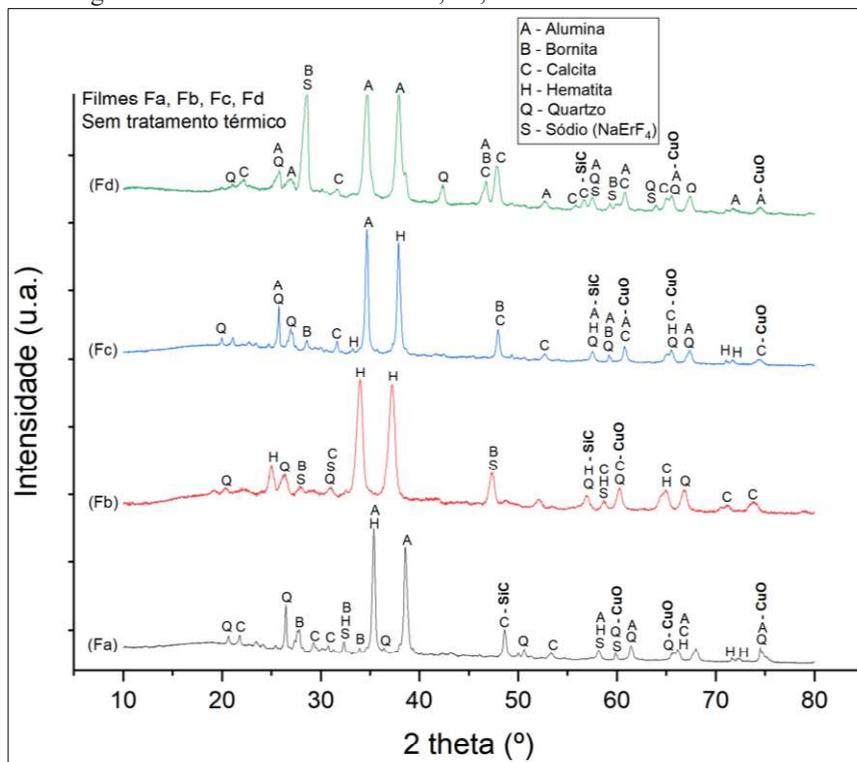
Conhecendo os equipamentos, as condições de análise da difração de raios X cujos procedimentos são elencados no item 3.6.6, foram elaborados por deposição pelo método *screen printing* os filmes denominados (Fa), (Fb), (Fc) e (Fd), sendo (Fa), (Fb) e (Fc) preparados com o compósito da amostra A3 e adesivo (cola) araldite profissional, por outro lado, ao filme (Fd) foi adicionado o compósito da amostra A3 a cola térmica.

Os filmes sem tratamento térmico, após a cura, foram encaminhados para análise de DRX, nos resultados foram identificadas as fases presentes as quais são apresentadas nos difratogramas a seguir.

Os difratogramas sobrepostos apresentados na Figura 46, 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 (ICSD 60419), Bornita (ICSD 024174), Calcita (ICSD 16710), Hematita (ICSD 64599), Quartzo

(ICSD62405), Fluoreto de Sódio Érbio (ICSD 60256), Carbeto de Silício (ICSD 19706) e Óxido de Cobre (ICSD 16025).

Figura 46: Difratogramas de raios-X dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd sem tratamento térmico e sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

#### 4.4.3 DRX dos filmes com tratamento térmico

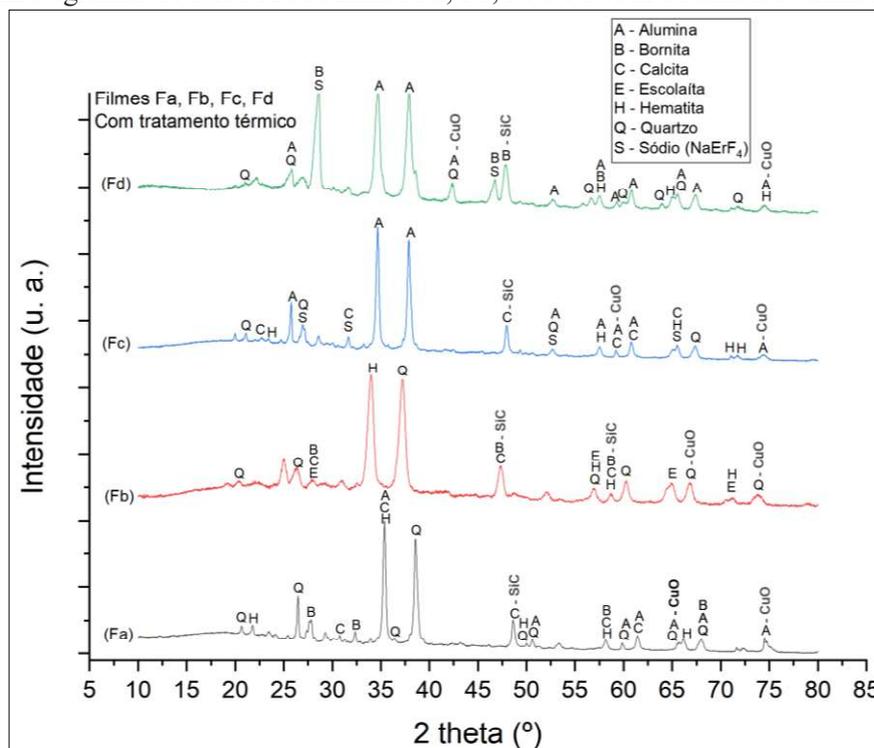
Os difratogramas sobrepostos dos filmes, apresentados na Figura 47, mostram que – após o tratamento térmico à temperatura de 200°C – os maiores picos permaneceram entre 25° e 50°, seguindo a tendência dos filmes sem tratamento térmico e da amostra do compósito A3, no entanto foram constatadas algumas 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 do mineral bornita, no entanto o mesmo mineral está presente no filme (Fc) sem tratamento térmico.

Analisando o difratograma do filme (Fd), 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 (ICSD 60419), Bornita (ICSD 024174), Calcita (ICSD 16710), e Escolaita (ICSD 202619), Hematita (ICSD 64599), Quartzo (ICSD 62405), Fluoreto de Sódio Érbio (ICSD 60256), Carbetto de Silício (ICSD 19706) e Óxido de Cobre (ICSD 16025).

Figura 47: Difratogramas de raios-X dos filmes Fa, Fb, Fc e Fd com tratamento térmico e sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

#### 4.5 Efeito da adição de óxidos na matéria-prima e sua influência na absorvidade dos filmes produzidos

A identificação dos óxidos presentes nos filmes foi realizada através da técnica de difração de raios-x, conforme equipamento e procedimentos explicados no item 3.6.2 e dos resultados apresentados no item 4.3.

A partir da DRX e analisando os resultados obtidos nos difratogramas dos compósitos. Verificou-se que a melhor composição foi a da amostra A3 (RRO+CuO+SiC), pois a mesma apresentou correlação muito forte com a amostra primária A1 (RRO), fato que pode ser observado também nos resultados do FTIR, item 4.4, por outro lado, as análises térmicas mostraram que a amostra A3 apresentou a menor perda de massa, confirmando que é o compósito com melhor estabilidade física e química.

O carbeto de silício (SiC) é um dos materiais mais utilizadas na dopagem química, é um composto de sílica e clínquer aquecido a altas temperaturas apresenta boa condutividade eletrônica. “O silício é um material semicondutor abundante com diversas aplicações optoeletrônicas.”. (VENÂNCIO, 2022, p.43),

O SiC foi adicionado ao experimento como endurecedor, junto com o adesivo araldite que atuou como plastificante e endurecedor.

O óxido de cobre (CuO), contido no mineral bornita, tem emissividade de 0,88 e apresentou bons resultados na absorvidade dos filmes, antes do tratamento térmico com absorvância média de 88,4% e após tratamento térmico com absorvância média de 90,5%.

Do ponto de vista global, a partir das evidências verificadas no conjunto das análises, pode-se inferir que a amostra A3 é o melhor compósito para deposição dos filmes.

#### **4.6 Efeito do tratamento superficial do substrato na absorvidade dos filmes produzidos**

O aço inoxidável AISI 304 é uma liga metálica de Fe-Ni-Cr, o tratamento foi feito com desengordurante e álcool isopropílico no sentido de limpar apenas os contaminantes e produtos que possam dificultar a aderência do filme, mantendo as características da camada de cromo que varia de 30 a 50Å, presente naquele metal.

Considerando que outros procedimentos, por exemplo, o eletropolimento, geralmente remove a camada externa do metal, se perdendo-se esta camada, perde-se a respectiva contribuição na condutividade térmica do cromo no conjunto Fe-Ni-Cr.

O tratamento mecânico consistiu em efetuar ranhuras no aço inoxidável AISI 304 para aumentar a aderência, foi realizado apenas no substrato de Fa, apesar do efeito esperado no aspecto da aderência ter sido bom, pois apresentou maior dureza no teste de microdureza Vickers.

#### **4.7 Efeito da deposição na absorvidade dos filmes produzidos**

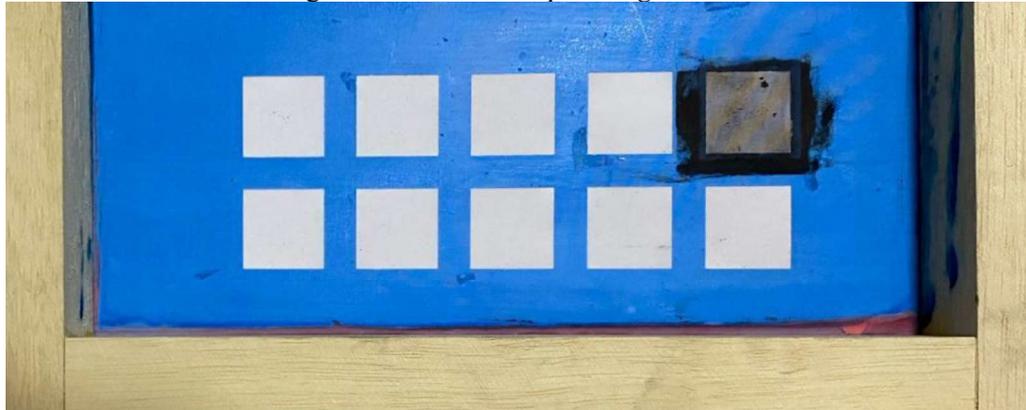
A deposição dos filmes nos substratos evidenciou boa aderência, no entanto as ranhuras no substrato do Filme (Fa) provocaram cortes na camada de cromo que poderão resultar em futura corrosão por pites – também conhecida por corrosão alveolar ou puntiforme – e, conseqüentemente, diminuir a vida útil do substrato.

Por outro lado, o segundo experimento de deposição do compósito no substrato de aço inoxidável AISI 304 liso, sem ranhuras, apresentou boa aderência e estabilidade aparente após

o procedimento de deposição aplicado no substrato.

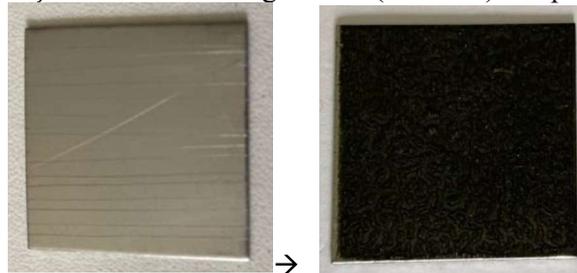
Nas imagens a seguir são apresentadas imagens das telas e amostras do substrato de aço inox 304 (30mm x 30mm) com ranhuras realizadas com objeto cortante e ao lado o mesmo substrato após a deposição do composto de RRO+CuO+SiC (amostra A3).

Imagem 8: Telas *screen printing* #43 e #61 fios/cm



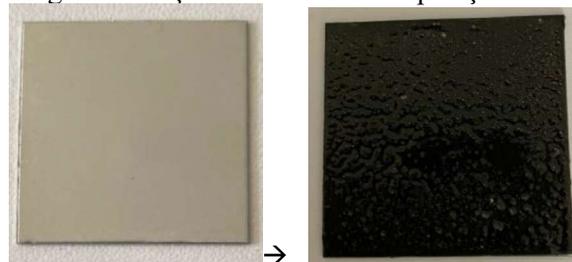
Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

Imagem 9: Aço inox 304 com rugosidade (ranhuras) e deposição de A3



Fonte: Acervo do autor (2023)

Imagem 10: Aço inox 304 liso e deposição de A3



Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

Nos ensaios em laboratório verificou-se que o resultado da deposição do composto A3 com a tela de 43 fios foi uniforme e bem distribuída.

Para aglutinar os componentes do composto foi utilizado como aglomerante o adesivo tipo epóxi, Araldite A (resina) + B (endurecedor), na proporção 1:1, conforme recomendação do fabricante. Aplicou-se, para cada 1g da amostra A3, 1g de araldite A+B, misturando todos os componentes num *becker* com uma espátula de aço inox por 3 minutos, obtendo-se uma

pasta cremosa na cor preta a qual foi aplicada com tela screen printing na superfície da chapa de aço inoxidável AISI 304.

Um segundo adesivo do tipo cola térmica, *Heatsink*, foi testado, no entanto os resultados não foram satisfatórios tendo em vista que a qualidade da deposição do composto na superfície do aço inoxidável 304 não se mostrou uniforme, apresentou muitos defeitos, provavelmente por conter silicone na sua formulação. A Imagem 11, apresenta fotos dos corpos de prova com a deposição do filme composto pela amostra A3, mais adesivo e cola térmica.

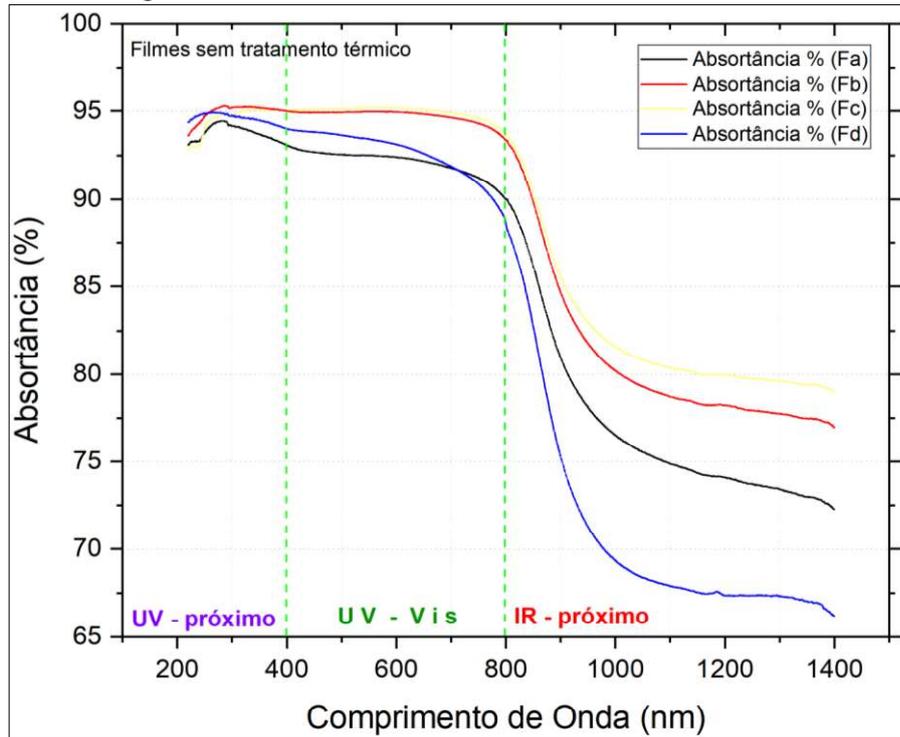
Imagem 11: Deposição de A3 com adesivo Araldite x cola térmica e com telas 43 fios x 61 fios, no aço inoxidável 304. sem tratamento térmico e com tratamento térmico.

Sem tratamento térmico	Procedimentos para aplicação dos filmes	Com tratamento térmico (200°C)
 Fa	Fa: Adesivo Araldite, chapa com ranhuras, tela <i>screen printing</i> 43 fios	Fa 
 Fb	Fb: Adesivo Araldite, chapa lisa, Tela <i>screen printing</i> 43 fios	Fb 
 Fc	Fc: Adesivo Araldite, chapa lisa, tela <i>screen printing</i> 61 fios	Fc 
 Fd	Fd: Cola térmica ( <i>Heatsink</i> ), chapa lisa, tela <i>screen printing</i> 61 fios	Fd 

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A Figura 48 mostra os resultados da análise de UV-vis dos filmes sem tratamento térmico, quanto a absorvidade, verificou-se maior absortância no filme (Fc).

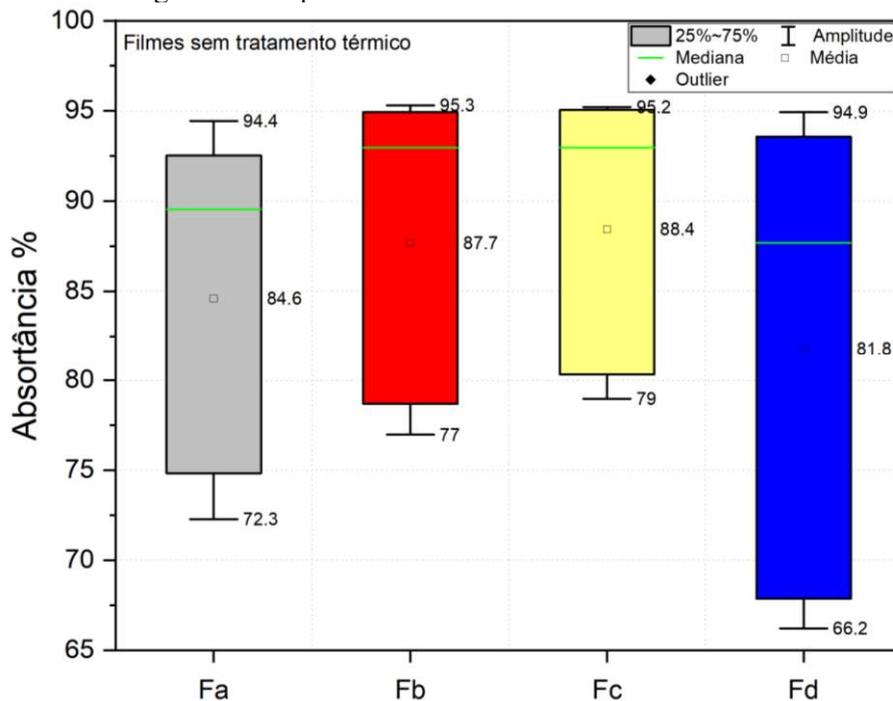
Figura 48: Absortância dos filmes sem tratamento térmico



Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

A Figura 49 mostra o gráfico de dispersão interquartis dos filmes (Fa), (Fb), (Fc) e (Fd), sem tratamento térmico, onde é possível observar que o filme (Fc) apresentou maior absorvância média com 88,4% no UV-Vis. Com 95,2 no ultravioleta próximo e 79% no infravermelho próximo. O menor desvio padrão foi observado em (Fc) com 6,9.

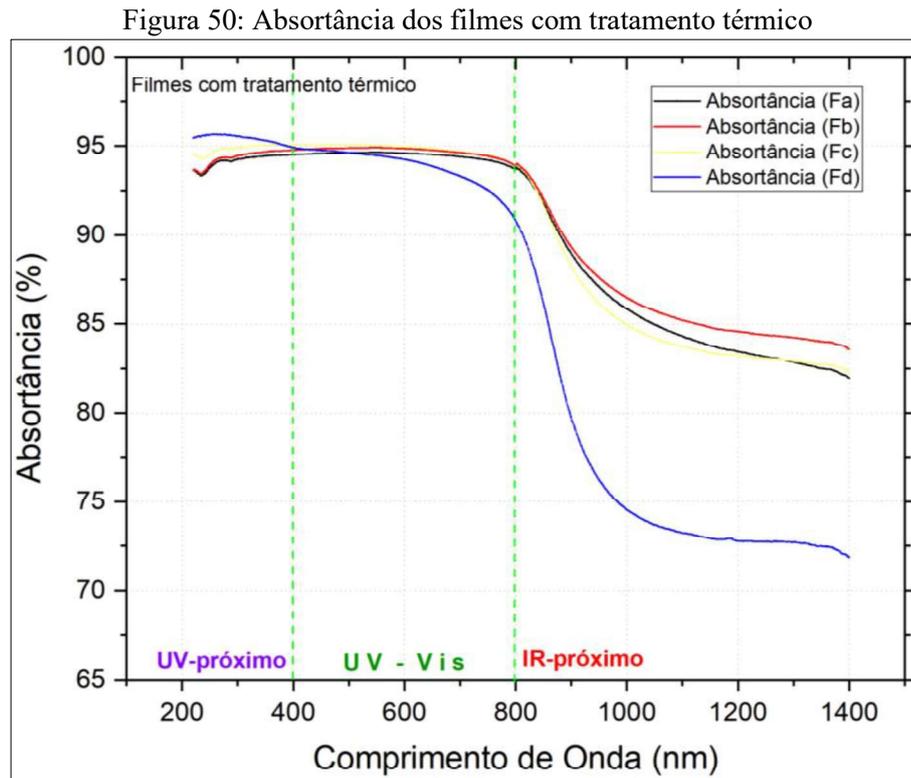
Figura 49: Dispersão dos filmes sem tratamento térmico



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do ensaio de UV-vis (2024)

#### 4.8 Efeito do tratamento térmico na absorptividade dos filmes produzidos

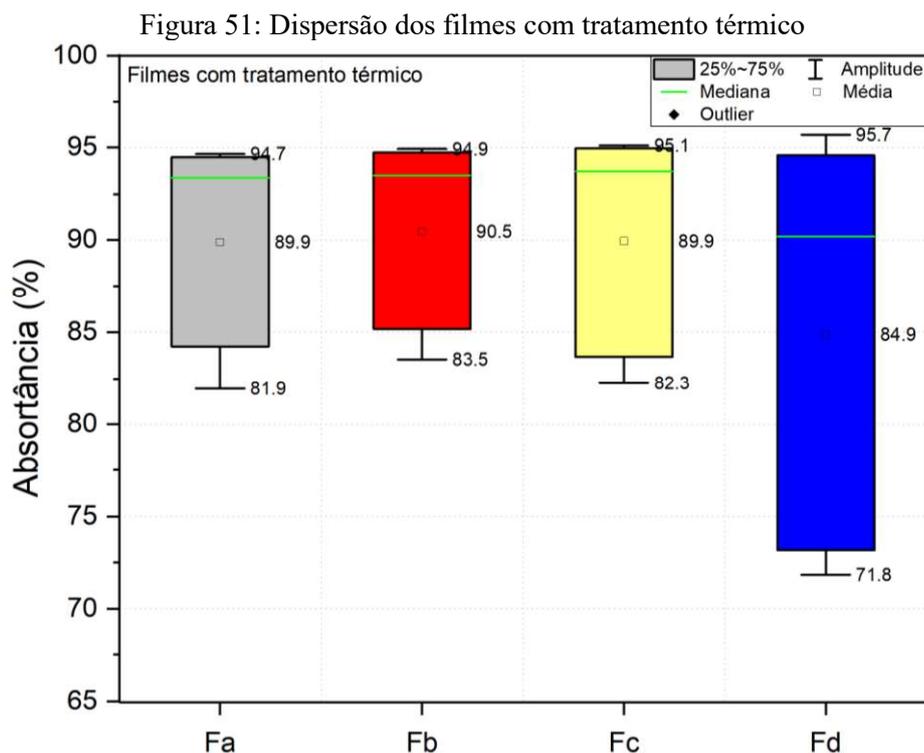
A Figura 50 mostra os resultados da análise de UV-vis após o tratamento térmico verificou-se vários efeitos como superfície fosca e uniforme, maior adesão entre as partículas, superfície sólida, baixa rugosidade, aumento da resistência mecânica, adesão entre partículas adjacentes e diminuição dos poros. Destacando-se a superfície (Fb) como melhor resultado, por outro lado, a superfície de (Fd) não apresentou bons resultados.



Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

Verificou-se um aumento na absorptância entre as análises de UV-vis antes do tratamento térmico e após o tratamento térmico a 200°C.

A Figura 51 mostra o gráfico de dispersão interquartis dos filmes, com tratamento térmico, onde é possível observar que o filme (Fb) apresentou maior absorptividade média com 90,5% no UV-Vis. Com 94,9 no ultravioleta próximo e 83,5% no infravermelho próximo. O menor desvio padrão foi observado em (Fb), com 4,6.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do ensaio de UV-vis (2024)

A Tabela 11, apresenta o comparativo entre os filmes sem tratamento térmico e com tratamento térmico, onde é possível verificar que após o tratamento térmico os valores da absorvância com maior média de no UV-Vis e tendência a alta no UV-Próximo.

Tabela 11: Comparação dos valores da absorvância sem tratamento térmico e com tratamento térmico

Tratamento	Filme	Absorvância (%)		
		UV Próximo (máximo)	UV-Vis (média)	IR Próximo (mínimo)
Sem tratamento térmico	Fa	94,4	84,6	72,3
	Fb	95,3	87,7	77,0
	Fc*	95,2	88,4	79,0
	Fd	94,9	81,8	66,2
Com tratamento térmico	Fa	94,7	89,9	81,9
	Fb*	94,9	90,5	83,5
	Fc	95,1	89,9	82,3
	Fd	95,7	84,9	71,8

\*Melhor desempenho na absorvância.

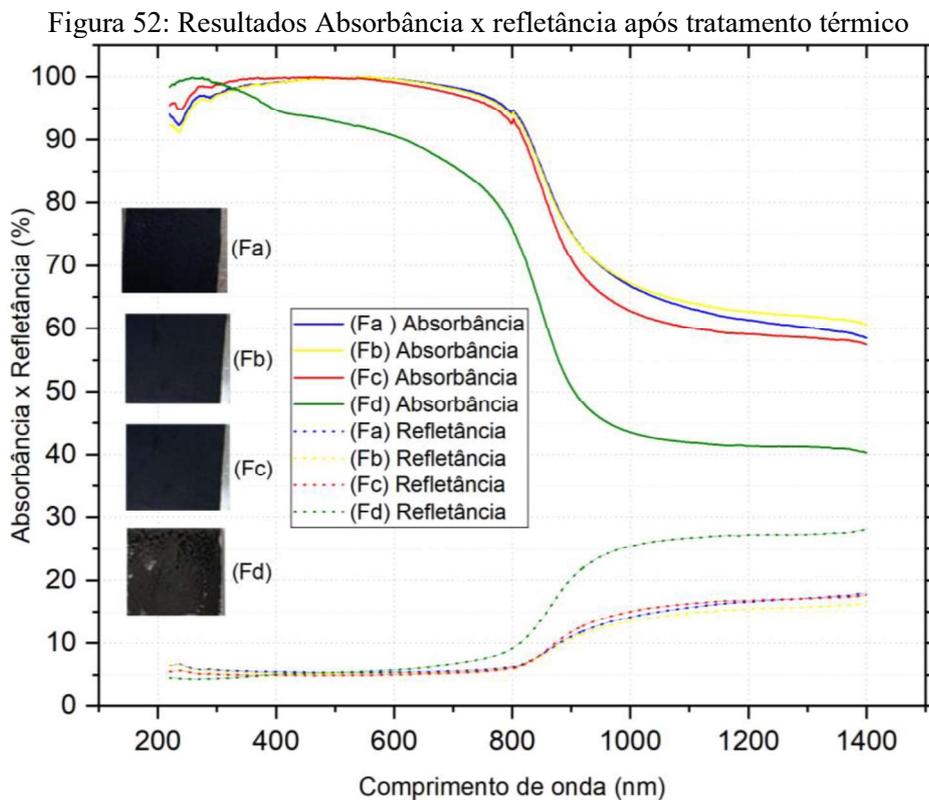
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Esta melhora na absorvância nos filmes com tratamento térmico pode ser vista na Figura 51 onde são apresentados os resultados da análise de UV-Vis dos filmes, no qual se verificou que o filme (Fb) apresentou maior absorvância e menor refletância, conseqüentemente, obteve a maior absorvância.

Sob o aspecto da absorvância, a análise mostrou que o filme (Fb) apresentou melhor desempenho, considerando que está dentro dos parâmetros consolidados na literatura para

aplicação em superfície seletiva: maior absorbância na região do espectro ultravioleta próximo e do espectro visível, por outro lado verificou-se a menor refletância na zona do espectro infravermelho próximo.

Sob os aspectos da absorbância e refletância os resultados obtidos por cada filme nos espectros do UV-Vis e do infravermelho. No intervalo de comprimento de onda de 220 nm a 1400 nm. O ideal na região do UV-Vis (400 nm a 800nm) é que tenha maior absorbância; por outro lado deverá apresentar menor refletância nesta mesma região, conforme se apresenta na Figura 52.



Fonte: Elaborado e editado pelo autor (2023)

## 4.9 Efeito do tipo do adesivo na aderência dos filmes produzidos aos substratos

### 4.9.1 Testes de microdureza

Após os testes de microdureza verificou-se que amostras apresentaram boa aderência dos filmes aplicados. Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de penetração do endentador (perfurador) em cada filme (corpo de prova), antes do tratamento térmico e os resultados depois do tratamento térmico (sinterização).

Os filmes (Fa), (Fb) e (Fc)), aplicados com a cola araldite profissional obtiveram melhores resultados, enquanto o filme (Fd) aplicado com cola térmica não apresentou bons

resultados.

No ensaio de microdureza foram realizados quatro testes por cada filme, tendo obtido o valor médio de dureza. Onde se verificou que a maior dureza foi da (Fa) e a menor dureza foi do filme (Fd).

Observou-se que no caso do filme (Fd), sem tratamento térmico, o equipamento não leu a amostra, provavelmente pelo fato do adesivo da cola térmica conter silicone em sua composição, dificultando o endurecimento do filme aplicado e, conseqüentemente, dificultando a marcação das diagonais pelo endentador, após aplicação da força 0,01 kgf(10g), durante 15 s.

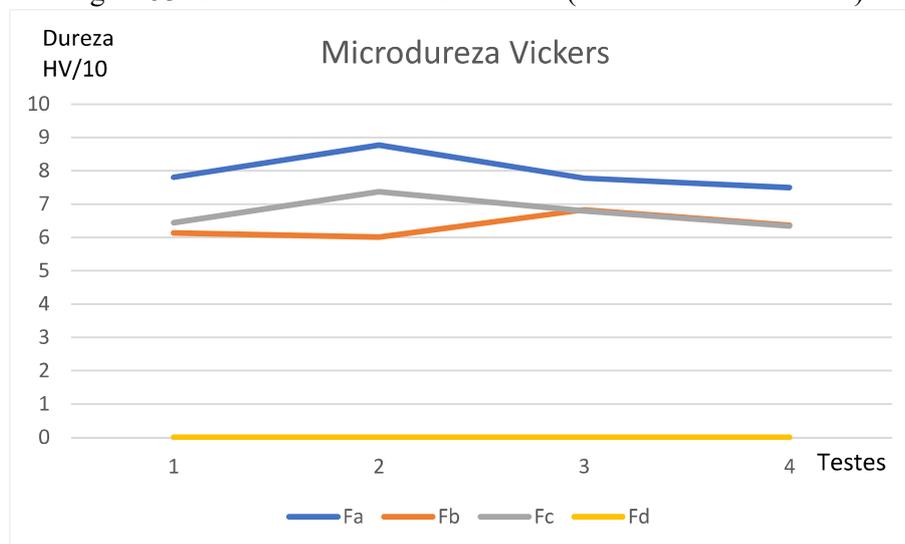
Tabela 12: Teste microdureza de Vickers – (sem tratamento térmico)

Filme	Força (Kgf)	Testes por amostra				Dureza média
		1	2	3	4	
Fa	0,01	7,81	8,77	7,78	7,5	7,97
Fb	0,01	6,13	6,01	6,83	6,37	6,34
Fc	0,01	6,44	7,37	6,79	6,34	6,74
Fd*	0,01	0	0	0	0	0

\*NA = não aplicável, equipamento não fez leitura do corpo de prova (Filme).

Fonte: elaborada pelo autor (2023)

Figura 53: Testes de microdureza Vickers (sem tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE et al. (2024)

Considerando que a dureza Vickers é medida em escala logarítmica, ao estabelecer parâmetro com a escala de dureza Mohs, temos que ~8 HV (maior dureza média dos filmes sem tratamento térmico) na escala Vickers corresponde a ~1,8 na escala Mohs, equivalente a dureza dos materiais plásticos.

Ao analisar os testes da microdureza Vickers dos filmes com tratamento térmico, após aplicação da força 0,10 kgf (100 g), durante 15 s, verifica-se que o filme (Fd) obteve média de

dureza 4,13 HV, ou seja, é um material mole. Entretanto, o filme (Fa) obteve a maior média de dureza com 49,55 HV.

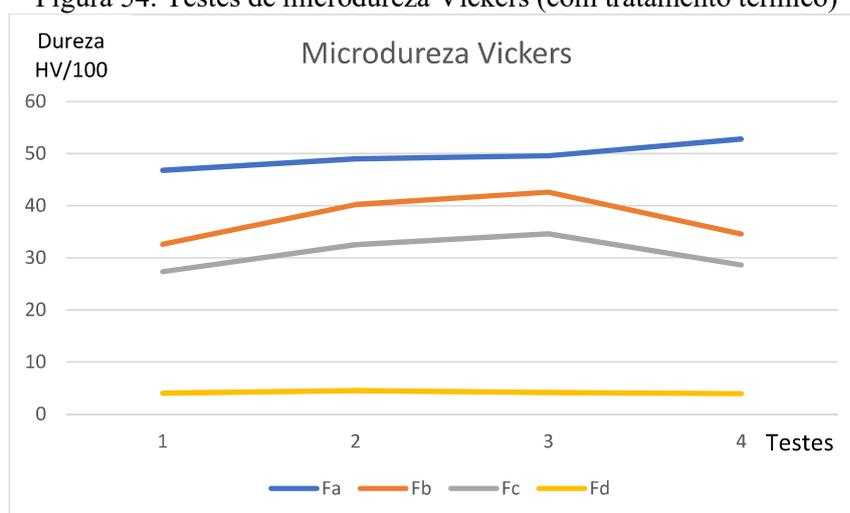
De modo geral, ao comparar os resultados de microdureza Vickers dos filmes sem tratamento térmico e com tratamento térmico verificou-se que, após o tratamento térmico, houve aumento da dureza em até 5 vezes dos filmes (Fa) e (Fb) e, 4 vezes do Filme (Fc).

Tabela 13: Testes de microdureza Vickers (com tratamento térmico)

Filme	Força (Kgf)	Testes por amostra				Dureza média
		1	2	3	4	
Fa	0,10	46,8	49	49,6	52,8	49,55
Fb	0,10	32,6	40,2	42,6	34,6	37,50
Fc	0,10	27,3	32,5	34,6	28,6	30,75
Fd	0,10	4,0	4,5	4,1	3,9	4,13

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 54: Testes de microdureza Vickers (com tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

Considerando que a dureza Vickers é medida em escala logarítmica, ao estabelecer parâmetro com a escala de dureza Mohs, tem-se que ~50HV (maior dureza média dos filmes com tratamento térmico) na escala Vickers corresponde a ~2,5 na escala Mohs, equivalente a dureza dos materiais de bronze e ligas de alumínio.

Os filmes (Fa), (Fb) e (Fc) apresentaram boa aderência no substrato de aço inoxidável AISI 304. Por outro lado, o filme (Fd) não apresentou boa aderência e sua superfície apresenta defeitos de preenchimento com vários pontos aparentes do substrato de aço.

#### 4.9.2 Perfilometria: espessura x rugosidade (sem tratamento térmico)

A perfilometria foi realizada conforme procedimentos explicados no item 3.6.7,

consistiu nos ensaios de espessura e rugosidade dos filmes.

Foram efetuadas 3 leituras de cada filme, nos modos XY e XYZ, obtendo dados da espessura, rugosidade da superfície e imagens bidirecionais e tridimensionais.

Na tabela 14, são apresentados os resultados das espessuras e das rugosidades dos filmes, antes de submetê-los ao tratamento térmico.

Tabela 14: Espessura média e rugosidade média (sem tratamento térmico)

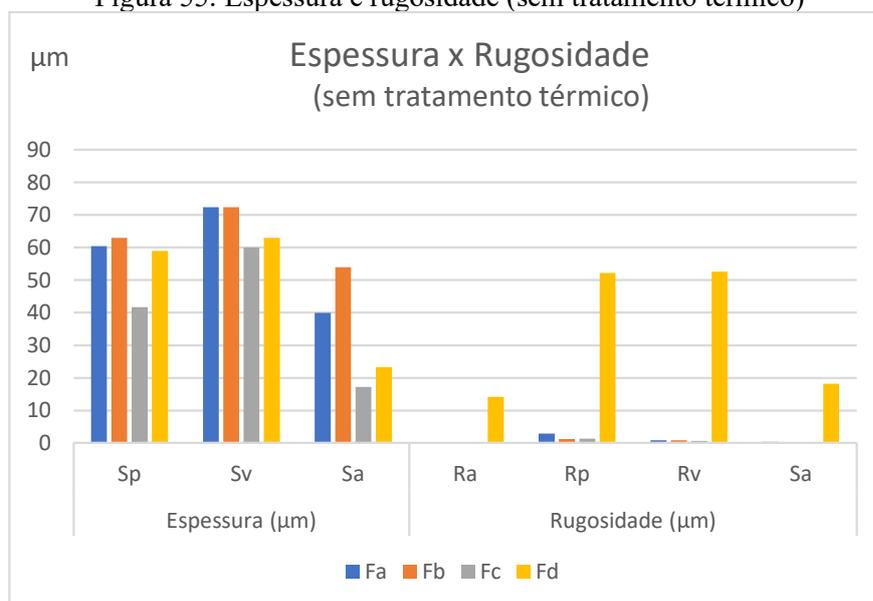
Filme	Configuração	Espessura ( $\mu\text{m}$ )			Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )			
		Sp	Sv	Sa	Ra	Rp	Rv	Sa
Fa	RRO+CuO+SiC: aço c/ranhuras; #43 fios; araldite.	60,45	72,42	39,90	0,27	2,90	0,81	0,33
Fb	RRO+CuO+SiC: aço liso; #43 fios; araldite.	63,03	72,41	54,01	0,22	1,24	0,88	0,25
Fc	RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; araldite.	41,69	60,02	17,23	0,17	1,37	0,62	0,17
Fd	RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; cola térmica.	58,96	62,97	23,30	14,15	52,19	52,58	18,16

Ra: desvio médio; Rp: altura máx. pico; Rv: altura máx. vale; Sa: altura média; Sp: altura pico; Sv: altura vale.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

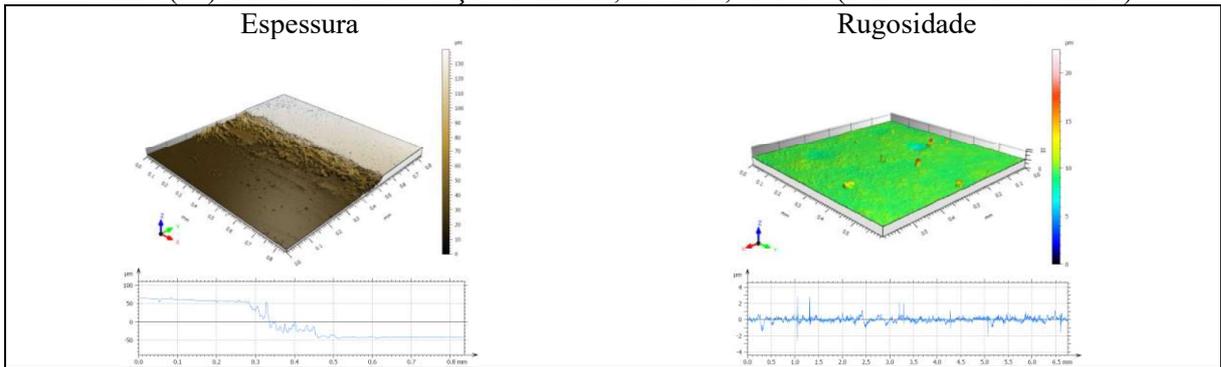
A Figura 55, mostra o gráfico gerado a partir dos resultados da tabela 14, com o diagrama dos filmes. Onde é possível visualizar os comportamentos acerca da espessura (altura) e da rugosidade (aspereza) de cada filme (individualmente) e do conjunto dos filmes. Pode-se visualizar que o filme (Fc), apresentou menor espessura média e menor rugosidade.

Figura 55: Espessura e rugosidade (sem tratamento térmico)



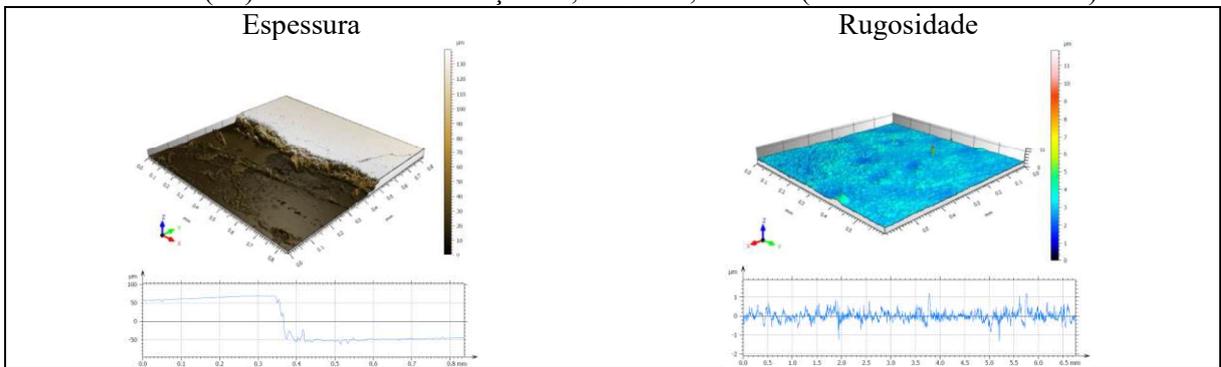
Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

Filme (Fa): RRO+CuO+SiC: aço c/ranhuras; #43 fios; araldite (sem tratamento térmico)



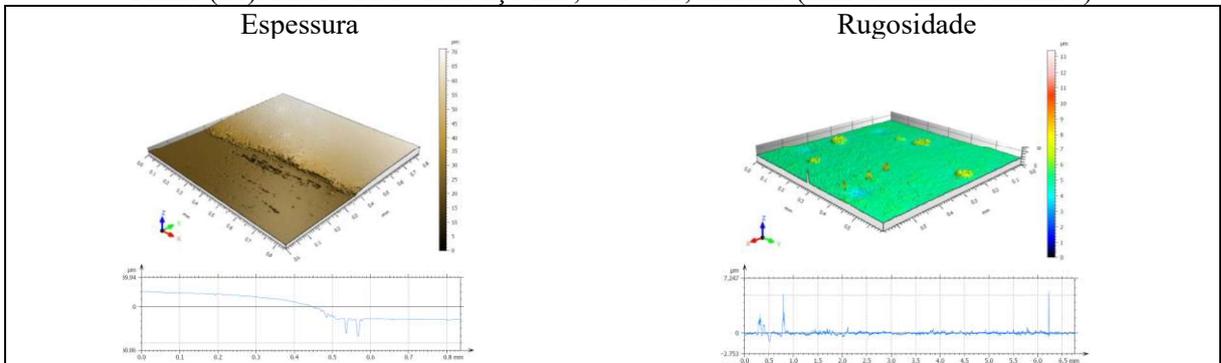
Fonte: Acervo do autor (2023)

Filme (Fb): RRO+CuO+SiC: aço liso; #43 fios; araldite (sem tratamento térmico)



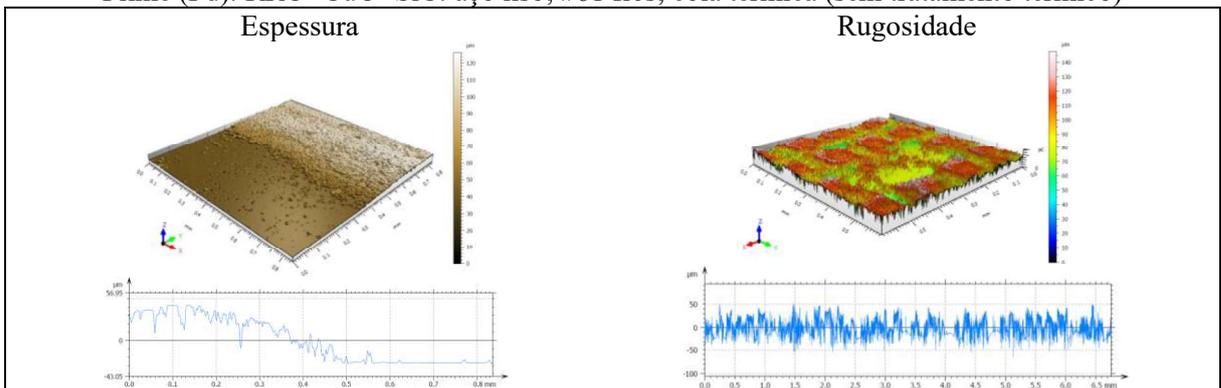
Fonte: Acervo do autor (2023)

Filme (Fc): RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; araldite (sem tratamento térmico)



Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

Filme (Fd): RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; cola térmica (sem tratamento térmico)



Fonte: Acervo do autor (2023)

### 4.9.3 Perfilometria: espessura x rugosidade (com tratamento térmico)

Na Tabela 15 são apresentados os resultados das espessuras e das rugosidades dos filmes, após o tratamento térmico à temperatura de até 200°C.

Tabela 15: Espessura média e rugosidade média (com tratamento térmico)

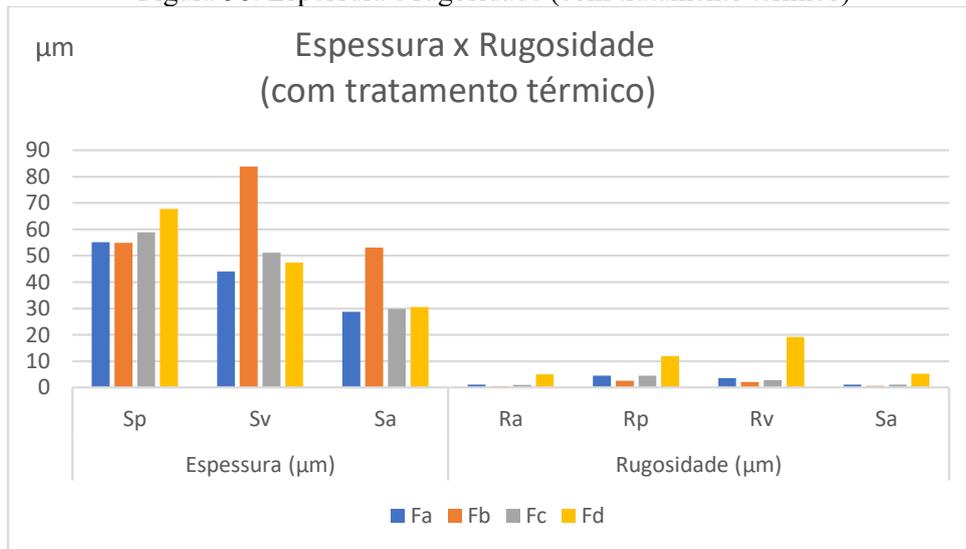
Filme	Configuração	Espessura (µm)			Rugosidade (µm)			
		Sp	Sv	Sa	Ra	Rp	Rv	Sa
<b>Fa</b>	RRO+CuO+SiC: aço c/ranhuras; #43 fios; araldite.	55,18	44,00	28,80	1,11	4,56	3,58	1,20
<b>Fb</b>	RRO+CuO+SiC: aço liso; #43 fios; araldite.	54,88	83,90	53,09	0,57	2,61	2,13	0,60
<b>Fc</b>	RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; araldite.	58,91	51,15	29,90	1,00	4,56	2,81	1,09
<b>Fd</b>	RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; cola térmica.	67,74	47,39	30,50	4,99	11,96	19,14	5,25

Ra: desvio médio; Rp: altura máx. pico; Rv: altura máx. vale; Sa: altura média; Sp: altura pico; Sv: altura vale.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

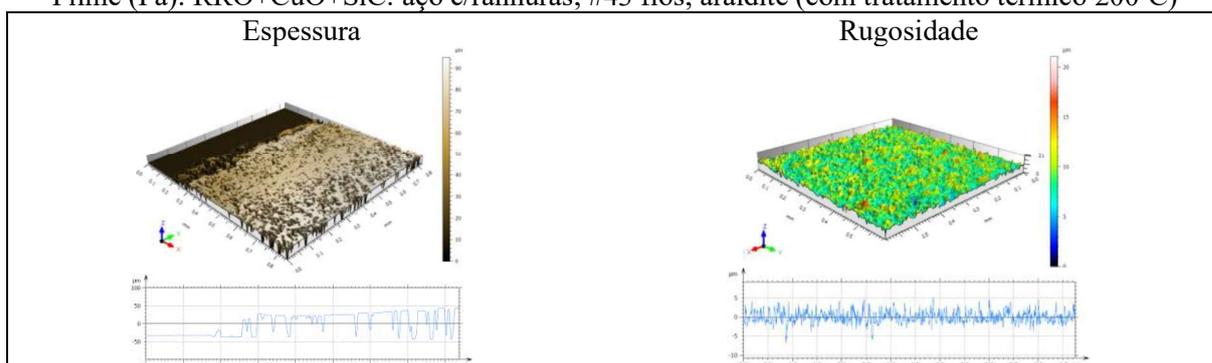
A Figura 56, mostra os resultados gerados a partir dos valores da tabela 15, mostra o diagrama dos filmes, onde é possível visualizar os comportamentos acerca da espessura (altura) e da rugosidade (aspereza) de cada filme (individualmente) e do conjunto dos filmes. Pode-se visualizar que o filme (Fa), apresentou menor espessura média e o filme (Fb) menor rugosidade média. De modo geral, após o tratamento térmico, verificou-se o aumento da espessura média e da rugosidade média, entretanto a superfície do filme ficou mais uniforme.

Figura 56: Espessura e rugosidade (com tratamento térmico)



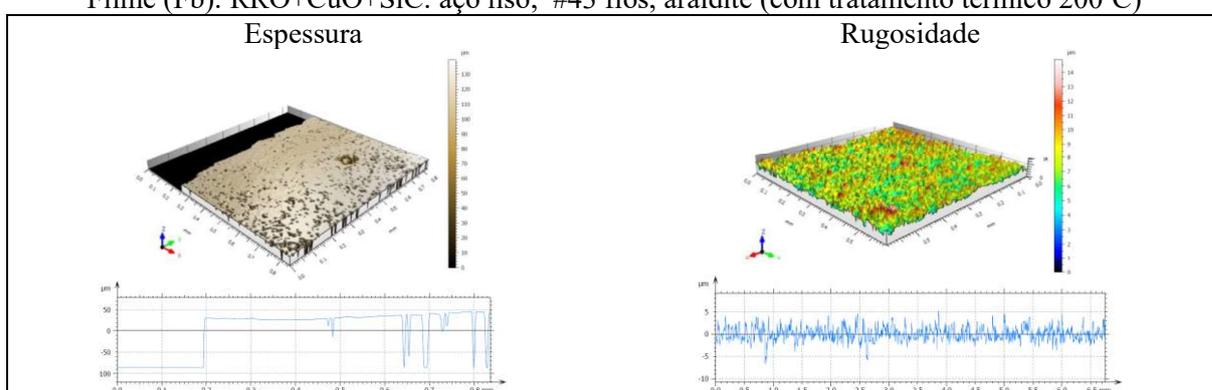
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Filme (Fa): RRO+CuO+SiC: aço c/ranhuras; #43 fios; araldite (com tratamento térmico 200°C)



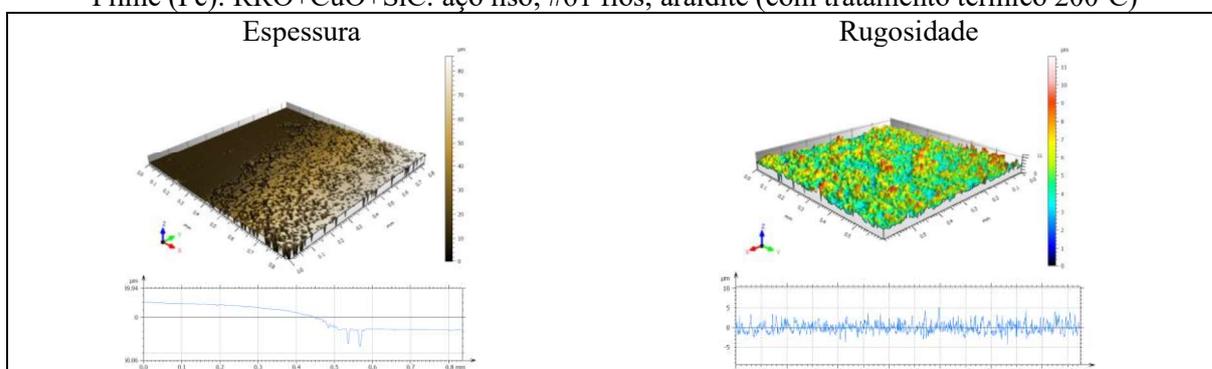
Fonte: Acervo do autor (2023).

Filme (Fb): RRO+CuO+SiC: aço liso; #43 fios; araldite (com tratamento térmico 200°C)



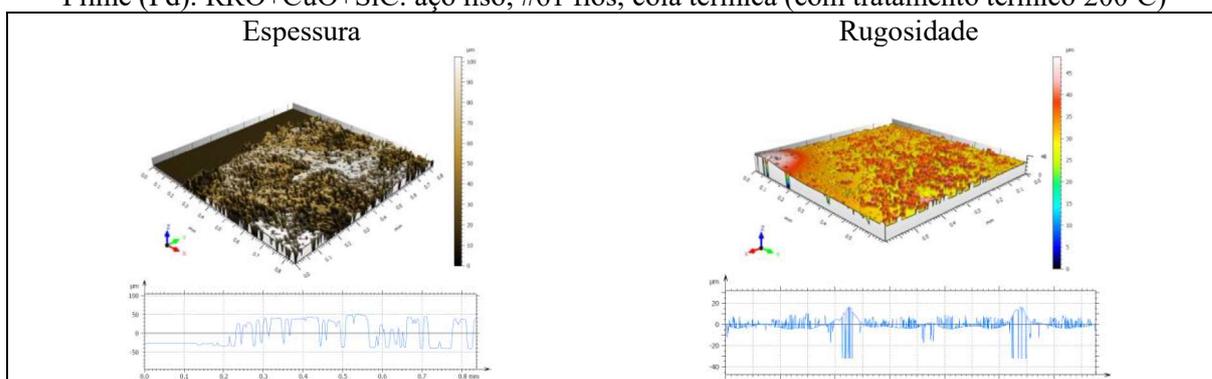
Fonte: ANDRADE *et al.* (2024).

Filme (Fc): RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; araldite (com tratamento térmico 200°C)



Fonte: Acervo do autor (2023)

Filme (Fd): RRO+CuO+SiC: aço liso; #61 fios; cola térmica (com tratamento térmico 200°C)

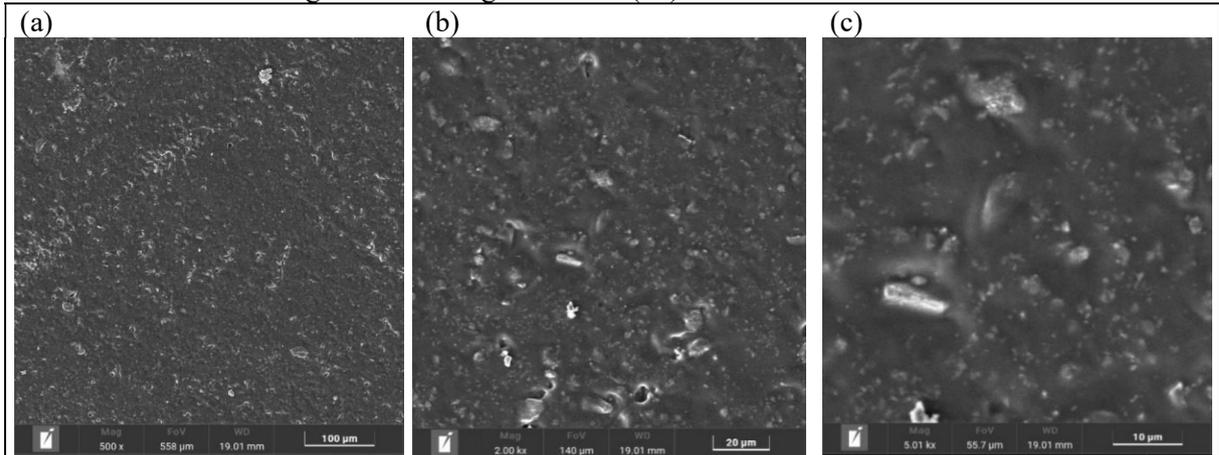


Fonte: Acervo do autor (2023).

#### 4.9.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes (sem tratamento térmico)

As imagens de microscopia de varredura – MEV foram obtidas a partir dos filmes metalizados – 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), com base na morfologia dos materiais apresentados cujos resultados e análise qualitativa da topografia das superfícies são apresentados a seguir.

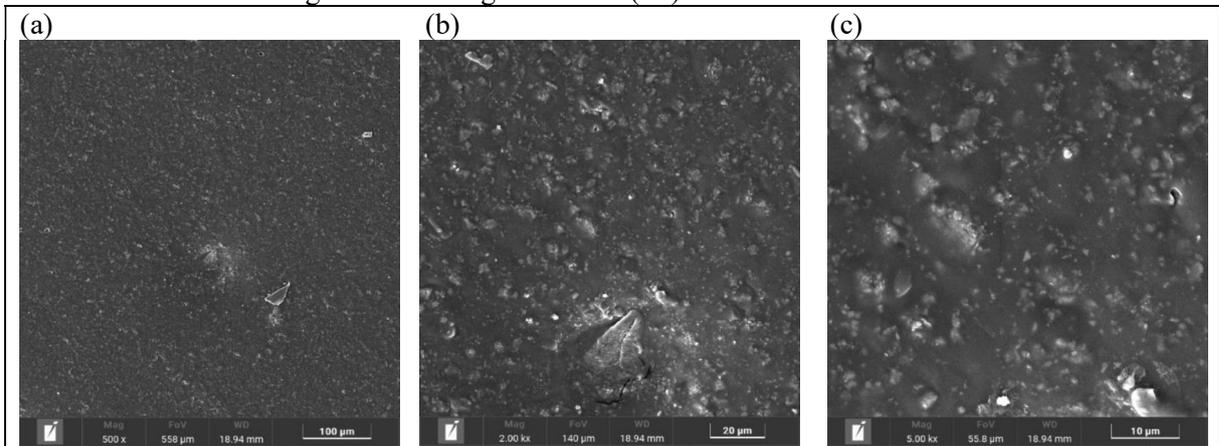
Imagem 12: Micrografia MEV (Fa) sem tratamento térmico



Fonte: Acervo do autor (2024)

(a) grãos agrupados; (b) cristais de quartzo e poros intragranular; (c) quartzo e contorno de grão.

Imagem 13: Micrografia MEV (Fb) sem tratamento térmico



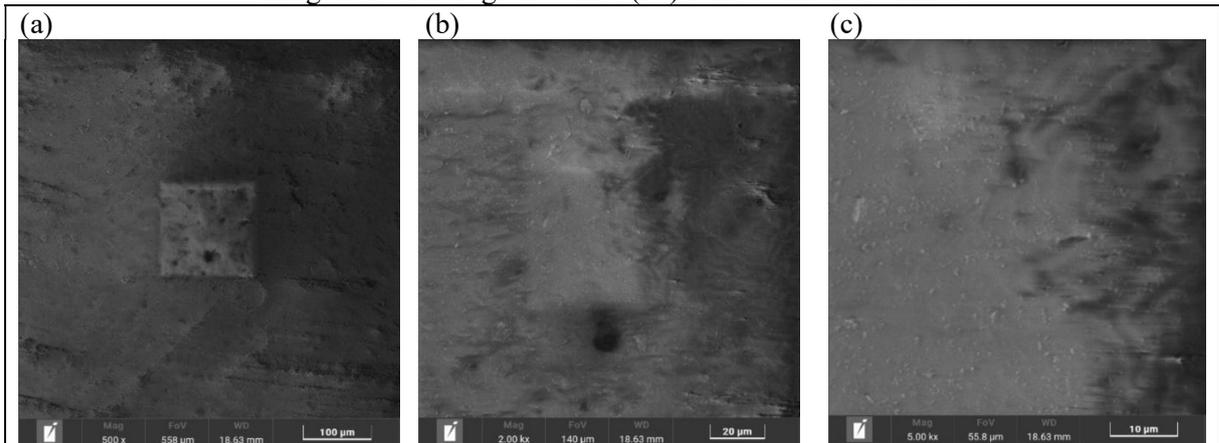
Fonte: Acervo do autor (2024)

(a) grãos agrupados; (b) cristais de quartzo e fratura superficial<sup>1</sup>; (c) quartzo e contorno de grão.

No conjunto da Imagem 14, verifica-se características de elétrons retroespalhados e superfície com baixa rugosidade. No centro das imagens (a) e (b) observa-se um prisma quadrangular de quartzo com cada lado da base medindo 130 $\mu\text{m}$ .

<sup>1</sup> CALLISTER et al. (2024, p. 186-223).

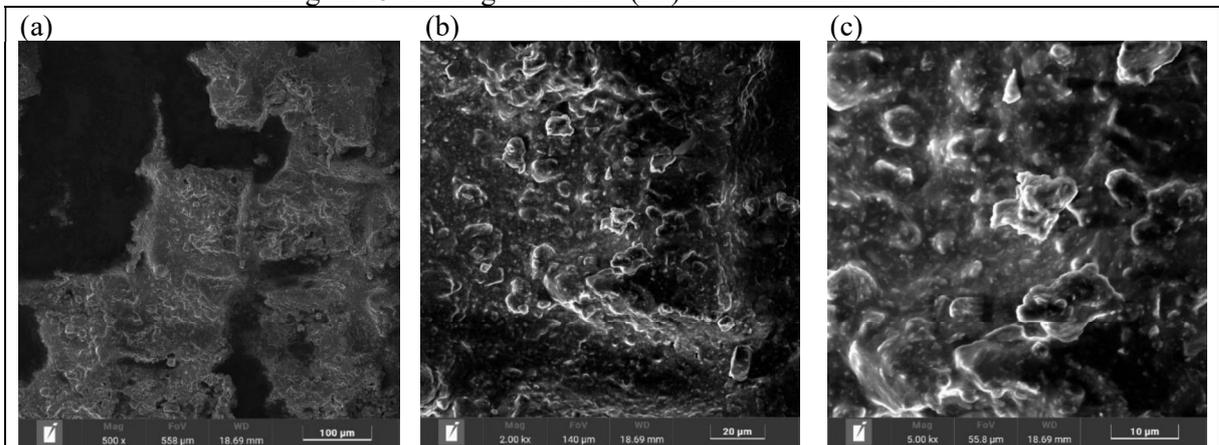
Imagem 14: Micrografia MEV (Fc) sem tratamento térmico



Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

(a) Elétrons retroespalhados; (b) e (c) superfície com baixa porosidade.

Imagem 15: Micrografia MEV (Fd) sem tratamento térmico



Fonte: Acervo do autor (2024)

(a) Elétrons retroespalhados, resíduo aparente do quartzo<sup>2</sup>; (b) quartzo e trincas de clivagem<sup>3</sup> (c) cristais de quartzo e contorno dos grãos.

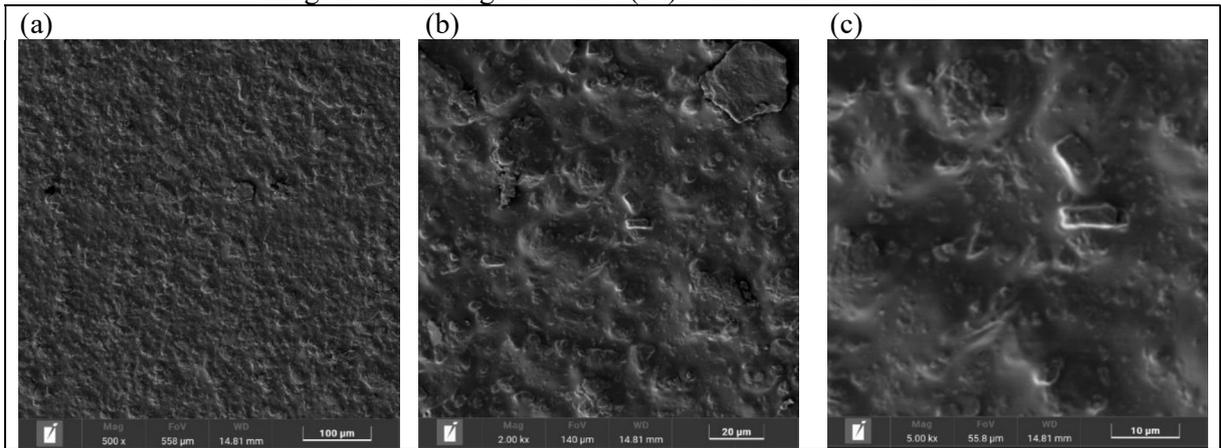
#### 4.9.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes (com tratamento térmico)

As imagens de microscopia de varredura – MEV foram obtidas a partir dos filmes metalizados, após tratamento térmico a 200°C, com campo de visão de 558 µm, 140 µm, 55,8 µm e respectivas amplitudes de 500x, 2000x (2kx) e 5000x (5kx), com base na morfologia e a dos materiais apresentados cujos resultados e análise qualitativa de topografia das superfícies são apresentados a seguir.

<sup>2</sup> FURTADO, J. G. de M. *et al.* (2010).

<sup>3</sup> CALLISTER Jr. *et al.* (2024, p. 325-334)

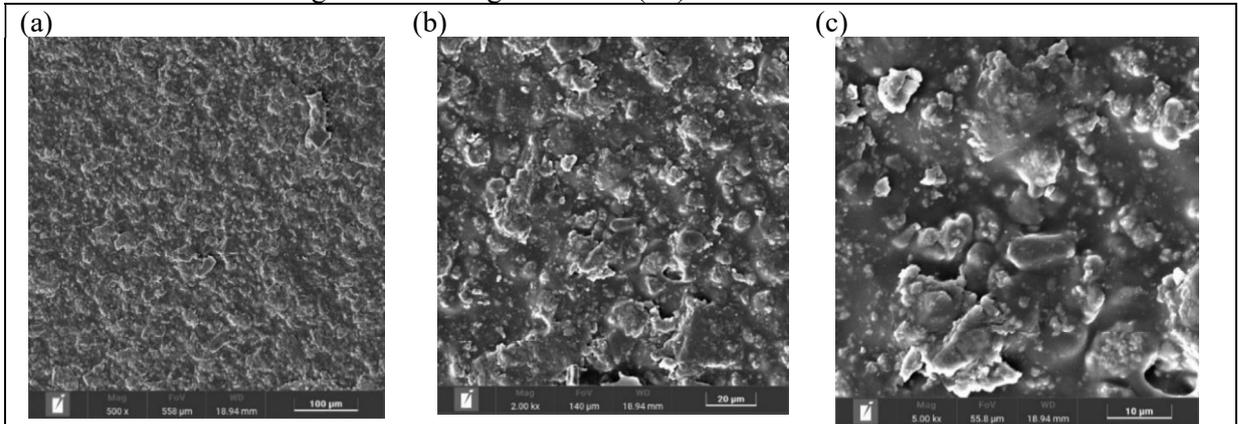
Imagem 16: Micrografia MEV (Fa) com tratamento térmico



Fonte: Acervo do autor (2024)

(a) microestrutura com alta densificação; (b) e (c) formação heterogênea e rugosidade.

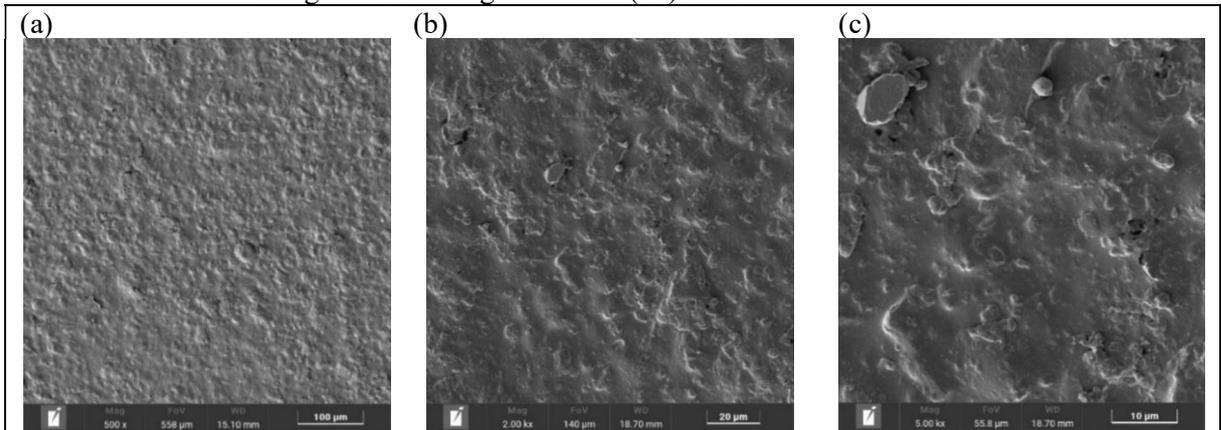
Imagem 17: Micrografia MEV (Fb) com tratamento térmico



Fonte: Acervo do autor (2024)

(a) microestrutura com alta densificação; (b) quartzo e microporos intergranulares (c) cristais de quartzo, contorno de grãos e microporos.

Imagem 18: Micrografia MEV (Fc) com tratamento térmico



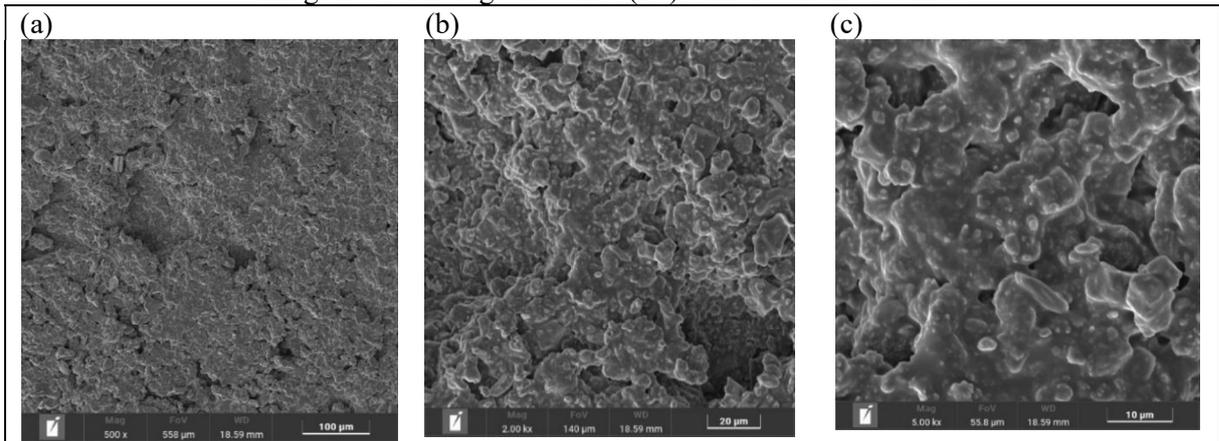
Fonte: ANDRADE *et al.* (2024)

(a) microestrutura com alta densificação; (b) e (c) formação heterogênea, irregular, rugosidade<sup>4</sup> e contorno de macla<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> FURTADO, J. G. de M. *et al.* (2010).

<sup>5</sup> CALLISTER Jr. *et al.* (2024, p. 169-188 e 289-302)

Imagem 19: Micrografia MEV (Fd) com tratamento térmico



Fonte: Acervo do autor (2024)

(a) falhas no agrupamento de grãos, resíduo de quartzito<sup>6</sup>; (b) alvéolos, microfissuras de clivagem e poros intergranulares<sup>7</sup> (c) quartzo e facetas de clivagem<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup> BABISK *et al* (2012).

<sup>7</sup> FURTADO, J. G. de M. *et al.* (2010).

<sup>8</sup> CALLISTER Jr. *et al.* (2024, p. 186-223)

## 5 CONCLUSÕES

A preocupação com a preservação do meio-ambiente e redução dos gases do efeito estufa é evidente. Uma das preocupações deste trabalho foi utilizar resíduo de rochas ornamentais – RRO descartados pelas indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais. Essa matéria-prima foi coletada, encaminhada aos laboratórios da UFPB e após processamento e análise de DRX concluiu-se que o resíduo se trata, na maior parte, de pós de rochas graníticas, com 75,57% de sílica.

Após ensaios de granulometria das partículas, concluiu-se que a maior parte é constituída por grãos médios com diâmetros entre 0,05 mm a 1mm e cerca de 16% de grãos finos <0,05 mm ou ( $\leq 50 \mu\text{m}$ ).

Entre os elementos adicionados aos RRO, nas amostras elaboradas, após as análises da FTIR, análises térmicas DSC e TGA, a amostra A3, cujo compósito contém óxido de cobre e carbetto de silício, misturados com espátula e dissolvidos com adesivo araldite A + B, foi a que apresentou – no conjunto das análises – o melhor desempenho em termos de transmitância, estabilidade térmica, aderência e microdureza, respectivamente, sendo escolhida para a deposição no substrato de aço inoxidável AISI 304.

O carbetto de silício (SiC) é um material utilizado na engenharia como aditivo endurecedor, a araldite (A + B), um adesivo epóxi, atuou como aglomerante dando consistência plástica no momento da deposição nos substratos pelo método *screen printing* e, depois da cura, atuou como endurecedor. 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, considerando que os testes de microdureza Vickers das superfícies apresentaram, média aproximada de 50HV, equivalente a dureza de bronzes e ligas de alumínio, materiais com boa ductilidade que facilitam o manuseio e suportam deformações moderadas sem provocar fissuras ou fraturas.

Os pós resultantes da amostra A3 foram aplicados por deposição em filmes finos denominados (Fa), (Fb), (Fc) (com araldite) e (Fd) (com cola térmica) com telas para *silk screen* de nylon #43 fios/cm e #61 fios/cm.

Após as análises de perfilometria concluiu-se que os melhores resultados, sob os aspectos, espessura (altura do filme) e rugosidade (aspereza do filme) foram observados nos filmes (Fc) sem tratamento térmico e (Fb) com tratamento térmico, cujos substratos receberam a deposição dos filmes respectivamente com tela #43 mais adesivo araldite e tela #61 mais

araldite. Os resultados foram melhorados após o tratamento térmico a 200°C, onde se observou a padronização da superfície e baixa rugosidade, fatores que aumentam a absorptância.

Imagens de MEV dos filmes (Fa), (Fb) e (Fc) mostram a morfologia da superfície aplicada no substrato evidenciando microestrutura com alta densificação, alvéolos, microfissuras de clivagem, microfraturas pontuais; no filme (Fd), verificam-se falhas no agrupamento dos grãos, concluindo-se que o filme (Fd) não é recomendado para aplicação em superfície seletiva.

Considerando as diversas análises realizadas e após tabular os dados obtidos na análise UV-Vis e interpretação dos gráficos gerados no intervalo dos espectros UV próximo, UV-Vis e IR próximo dos filmes (Fa), (Fb), (Fc) e (Fd). Sob o ponto de vista dos parâmetros quantitativos, o valor da absorptância obtido na região do espectro ultravioleta próximo foi 94,9%, na região do UV-Vis atingiu 90,5% e na região do infravermelho próximo 83,5%.

Conclui-se que o filme (Fb), com tratamento térmico, é o mais indicado para aplicação em superfície seletiva tendo em vista que os resultados obtidos estão dentro dos parâmetros consolidados na literatura tendo apresentado maior absorptância nos espectros ultravioleta próximo, no UV-Vis e menor absorptância no infravermelho próximo. Entretanto, pode ser aprimorado com a aplicação de material antirreflexos para melhorar ainda mais o seu desempenho, sendo assim, são recomendadas novas pesquisas científicas sobre o tema.

## Referências

- ABAL – Associação Brasileira de Alumínio. **Alumínio: características químicas e físicas**. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/#:~:text=O%20alum%C3%ADnio%20possui%20ponto%20de,30%25%20do%20peso%20do%20cobre>. Acesso em: março/2023.
- ABUSKA. Mesut; SEVIK. Seyfi; KAYAPUNAR. Arif.. *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> Acesso em: junho/2022.
- ALENCAR, Carlos Rubens Araujo. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. IEL:Espírito Santo. 2013.
- ALVES, Alceu Ferreira. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. Tese (Doutorado). São Paulo: UNESP. Botucatu. 2008. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/1b29a6fc-f4bd-44b8-b66e-c577de509109/content> Acesso em: 22/11/2022.
- ANDRADE, G. M. de, MACEDO, D. A. de, GOMES, K. C., & RAIMUNDO, R. A. (2024). **Aproveitamento do resíduo de rochas ornamentais com adição de CuO e SiC para aplicação em superfície seletiva de coletor solar**. *Peer Review*, 6(10), 183–203. <https://doi.org/10.53660/PRW-2199-4032>. Acesso em: 10/05/2024.
- ARAÚJO<sup>(a)</sup>, Felipe Alves Albuquerque. **Caracterização de novas superfícies seletivas, à base de óxido de titânio, de óxido de cromo e de pó de granito, para coletores solares**. Tese (Doutorado). Fortaleza – UFC/CT/PPCEM. 2020.
- ARAÚJO<sup>(b)</sup>, Allan J. M.; SOUSA, Angel R. O.; MACEDO, Daniel A.; DUTRA, Ricardo P.S.; CAMPOS, Lizabetha F. A.. **Effects of granite waste addition on the technological properties of industrial silicate based-ceramics**. *Materials Research Express* 6 125205. Paper. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab62e8> Acesso em: 06/09/2022.
- ARAÚJO<sup>(c)</sup>, Frederico Resende. **Desenvolvimento de superfícies seletivas constituídas por cromo aplicadas em usinas termelétricas solares**. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: POSMAT/CEFET-MG. 2014.
- ASM Speciality **Handbook: Stainless Steels**. Ed. by DAVIS, J.R. Metals Park, Ohio: ASM International, 1994. vol. 1, 577P. Disponível em: <http://s2.iran-mavad.com/book/en/asm-specialty-handbook-stainless-steels.pdf> Acesso em: 30/12/2022.
- BABISK, M. P.. *et al.* (2012). **Incorporação de resíduo de quartzitos em cerâmica vermelha**. Article in HOLOS - ISSN 1807-1600 · February 2013 DOI: 10.15628/holos.2012.1104. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/273230641\\_INCORPORACAO\\_DE\\_RESIDUO\\_D\\_E\\_QUARTZITOS\\_EM\\_CERAMICA\\_VERMELHA](https://www.researchgate.net/publication/273230641_INCORPORACAO_DE_RESIDUO_D_E_QUARTZITOS_EM_CERAMICA_VERMELHA) Acesso em: 03/2024.

BARBOSA<sup>(a)</sup>, Karla Suelen Lino; CARNEIRO, M. S.; SOUZA, J. A. S.; COSTA, D. S.; MACÊDO, E. N.. **Resíduos de mármore e granito em materiais compósitos: relação da granulometria nas propriedades mecânicas**. Conjecturas, ISSN: 1657-5830, Vol. 22, Nº 2. Março/2022. DOI: 10.53660/CONJ-833-F04. Disponível em: <https://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/833/631> Acesso em: 20/01/2022.

BARBOSA<sup>(b)</sup>, Milton de Almeida. **Tecnologia e fontes alternativas de energia**. 1ª ed. São Paulo: Contentus, 2020.

BENTIVENHA. Luiz Carlos. **Determinação da eficiência de um coletor solar plano com aletas de vidro**. Dissertação (Mestrado). UNESP. Botucatu. 2005.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adriene. **Incropera – fundamentos de transferência de calor e de massa**. Disponível em: Minha Biblioteca, UFPB, (8ª edição). Grupo GEN, 2019.

BERTENE, Luciano. **Propriedades do aço inoxidável AISI 304: resistência à tração e dureza**. COMPRAÇO: Piracicaba. Fev/2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/propriedades-do-aco-inoxidavel-aisi-304-resistencia-a-tracao-e-dureza> . Acesso em: 04/2024.

BLATT. Harvey; TRACY. Robert J.. **Petrology** 2<sup>nd</sup> ed. New York: Freeman. p. 66. 1997.

BORN, Cristiano Rocha [et al.]; revisão técnica: PULZ, Gênova Maria. **Petrologia** [recurso eletrônico]. Porto Alegre: SAGAH, 2021.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15.012:2003. **Rochas para revestimentos de edificações – terminologia**. ABNT: RJ. 2003.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15.220:2005. **Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. ABNT: RJ. 2005.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15.569/2020. **Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto**. ABNT: RJ. 2020.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5626/1998. **Instalação predial de água fria**. ABNT: RJ. 1998.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6502/2020. **Rochas e solos**. ABNT: RJ. 1995.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 9575/2010. **Impermeabilização - Seleção e projeto**. ABNT: RJ. 2010.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7198/1993. **Projeto e execução de instalações prediais de água quente**. ABNT: RJ. 1993.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15747-2/2022. **Sistemas solares térmicos e seus componentes – coletores solares. Parte 2 – métodos de ensaio**. ABNT: RJ. 2022.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15.844/2015. **Rochas para revestimento – Requisitos para granito**. ABNT: RJ. 2015.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR/ISO 4287/2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - **Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. ABNT: RJ. 2002.

CALLISTER, William D.; JR., RETHWISCH, David G.. Tradução: SOARES, Sérgio Murilo Stamile. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10ª ed.. 2ª reimpressão. LTC. Rio de Janeiro: 2024.

COSTA E SILVA, André Luiz V.; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 4ª ed.. São Paulo: Blucher, 2021.

DAMASCENO, H.; BASSINI, A. **Tudo são ondas: espectro eletromagnético**. Parque CienTec. USP. São Paulo: 2021. Disponível em: <https://www.parquecientec.usp.br/passeio-virtual/tudo-sao-ondas/o-espectro-eletromagnetico> . Acesso em: 04/2024.

DAS, Likhan; 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> . Acesso em: novembro/2023.

DENARI, G. B.. **Princípios e aplicações de análise térmica**. Org. Gabriela Bueno Denari e Eder Tadeu Cavalheiro. São Carlos: IQSC/USP, 2012.

DUTRA, Kaio Hemerson. **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. **Balanco 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> . Acesso em: 01/12/2023.

Fraternidade Rosacruz: Associação de Cristãos Místicos. **Arquivo de categoria astrologia e os solstícios e equinócios**. Campinas: SP. Disponível em: <https://fraternidaderosacruz.com/category/astrologia/astrologia-e-os-solsticios-e-equinocios/> Acesso em: 20/12/2022.

FREITAS. Diogenes Linard Aquino. **Caracterização numérica e experimental de um coletor solar de placa plana**. Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT. João Pessoa. 2017.

FROST. Ronald; FROST. Carol D.. **Essentials of igneous and metamorphic petrology**. Cambridge University Press. Printed in USA. New York:NY. 2014.

FURTADO, José Geraldo de M.; DIAS, Rodrigo; NÓBREGA, Maria Cecília de S.; SERRA, Eduardo Torres. **Uma aplicação da análise de imagens na caracterização microestrutural**

de cerâmicas varistoras. *Tecnol. Metal. Mater. Min.*, vol.6, n3, p.179-184, 2010. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/doi/10.4322/tmm.00603011> Acesso em: 03/2024.

GOEL. Varun *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> Acesso em: setembro/2022.

GONÇALVES. Kalliny dos Santos. **Efeito do envelhecimento acelerado nas propriedades ópticas, morfológicas e microestruturais de superfícies absorvedoras multicamadas a base de cromo e sílica**. Dissertação (Mestrado) – UFPB/CEAR. João Pessoa – Pb. 2021.

HELERBROCK, Rafael. **Calorimetria**. Brasil Escola, 2018/10. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/calorimetria-i.htm> Acesso em: 01/06/2022.

HUDSON. Lloyd Gary; MARKELL. Jeff. *Solar technology*. Reston Pub Co. University of Virginia. USA. 1985.

ICTAC – INTERNATIONAL CONFEDERATION OF THERMAL ANALYSIS. In: ICTAC Nomenclature Committee. *ICTAC: Nomenclature of thermal analysis*. Brazil, August, 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/272559706\\_ICTAC\\_nomenclature\\_of\\_thermal\\_analysis\\_IUPAC\\_recommendations\\_2014](https://www.researchgate.net/publication/272559706_ICTAC_nomenclature_of_thermal_analysis_IUPAC_recommendations_2014) . Acesso em: 21/02/2023.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. **2º Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas (ano base, 2021): geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis do Sistema Interligado Nacional**. Rio Grande do Sul, IEMA, dezembro/2022. Disponível em: [http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2022/12/termeletricas\\_IEMA\\_2021.pdf](http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2022/12/termeletricas_IEMA_2021.pdf) . Acesso em: 21/01/2023.

INCROPERA, Frank P.; DeWITT, David P.. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2003.

IONASHIRO, M., **Giolito: princípios básicos da termogravimetria e análise térmica diferencial / calorimetria exploratória diferencial**. São Paulo: Editora GIZ, ISBN 85-8843-413-X, 2004.

KALOGIROU, A. Soteris; [tradução: Lucina Arissava]. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**. 2ª ed.. ELSEVIER. Rio de Janeiro. 2016, il: 864p.

KENNEDY, C. E.. **Review of Mid- to high-temperature solar selective absorber materials**. United States: 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/15000706> Acesso em: 20/12/2023.

KREITH, Frank; 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. Abhay Branudas *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 january 2020, 114005. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919316927> Acesso em: outubro/2022.

MAGNOLI, Demétrio; SCALZARETTO, Reinaldo. **Geografia, espaço, cultura e cidadania o espaço geográfico**. São Paulo: Moderna. 1998.

MARTINS, Moema. **Produção de superfícies seletivas por magnetron sputtering para aplicação em coletores solares**. Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE. 2010.

MAY, Peter H. (organizador). **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. 3ª ed., Rio de Janeiro:Elsevier, 2018, Cap. 6, pp. 143-145. Colaboradores: MIBIELLI, P. G.; BARCELOS, F.

MEDEIROS, Ithyara Dheylle Machado de. **Superfícies seletivas de polímeros inorgânicos para coletores solares de média e alta temperatura**. Dissertação (Mestrado) – UFPB/CEAR. João Pessoa. 2016.

NAIK. N. Channa Keshava, SHEKAR. K. S. Shashi, GAUTHAM. M. G., PRASAD. T. B.. **Comparative study of Pebble absorber solar thermal collector (PASTC) with conventional absorber solar thermal collector (CASTC)**. ELSEVIER: *Materials Today: Proceedings*, nº 46 (2021), p. 2641-2646. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321014577?via%3Dihub> Acesso em: junho/2022.

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> Acesso em: 09/2022.

PINEDO. Carlos Eduardo. **Tratamentos térmicos superficiais de aço**. São Paulo. Blucher. 2021. Cap. 8.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (organizadores). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPTEL – 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) . Acesso em: 21/02/2023.

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

RIEKE, Bernd (2011). *Apud Wikiwand*. **Aquecimento Solar**. Disponível em: [https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento\\_solar](https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento_solar) Acesso em: 04/2022.

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

RUFUSS, D. Dsilva Winfred; INIYAN, S.; SUGANTHI, L.; DAVIES, P. A.. **Solar stills: A comprehensive review of designs, performance, and material advances**. ELSEVIER: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 63. September, 2016. pages 464-496. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116301800> . Acesso em: outubro/2022.

SABESP, **Necessidades de consumo.** Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=140#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20Organiza%C3%A7%C3%A3o,necessidades%20de%20consumo%20e%20higie ne>. Acesso em: 1/11/2022.

SALES. J. L.; MORAIS. C.R.S.; Lima L. M. R.; ALTIDIS. M. E. D.. **Caracterização de caulim, granito e mármore para uso em massas cerâmicas.** 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Porto de Galinhas: PE, Brasil, 2011. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/47/081/47081547.pdf> . Acesso em: 7/03/2022.

SILVA, Hugo Fernandes Medeiros da. **Obtenção de superfície seletiva do tipo armadilha ótica via oxidação por plasma eletrolítico.** Tese (Doutorado). UFRN/CT/PPGEM. Natal. 2020.

SOUSA, Gustavo César P.; DUARTE, Raimundo Nonato C.; AMORIM Jr. Wanderley Ferreira de; GOMES, Kelly Cristiane. **Radiação térmica em superfícies seletivas.** In: A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica 2 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020. Capítulo 12, p.117. DOI 10.22533/at.ed.76720110912. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/radiacao-termica-em-superficies-seletivas> Acesso em: 14/03/2023.

STUART, Barbara. *Analytical Techniques in Materials Conservation.* John Wiley & Sons, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470060520>. Acesso em: 28/11/2022.

US Dept. of Energy (2009). *Apud Wikiwand. Aquecimento Solar.* Disponível em: [https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento\\_solar](https://www.wikiwand.com/pt/Aquecimento_solar) Acesso em: 04/2022.

VENÂNCIO, Raissa. **Análise comparativa dos parâmetros de comparação de filmes finos a base de Cr e Mo com uma composição graduada de Si para aplicações em absorvedores solares coletivos.** Dissertação (Mestrado). UFPB/CT/PPGEM. João Pessoa. 2022.

VIAN, Ângelo; 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.