



*Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado-Doutorado*



Desenvolvimento e Validação de Protótipo Experimental para Estudo do Envelhecimento Fototérmico de Superfícies Seletivas Solares

Por

Antonio Karlos Araújo Valença

*Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de doutor*

Antonio Karlos Araújo Valença

**Desenvolvimento e Validação de Protótipo Experimental para
Estudo do Envelhecimento Fototérmico de Superfícies
Seletivas Solares**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientadora: Prof^{ra}. Dr^a. Kelly Cristiane Gomes

Co-Orientador: Prof. Dr. Chrystian Gregório Medeiros de Lima

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V152d Valença, Antonio Karlos Araújo.

Desenvolvimento e validação de protótipo experimental para estudo do envelhecimento fototérmico de superfícies seletivas solares / Antonio Karlos Araújo Valença. - João Pessoa, 2026.
98 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes da Silva.

Coorientação: Chrystian Gregório Medeiros de Lima.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Envelhecimento fototérmico. 2. Superfícies seletivas solares. 3. Protótipo experimental. 4. Magnetron sputtering. 5. Cromo. I. Silva, Kelly Cristiane Gomes da. II. Lima, Chrystian Gregório Medeiros de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 620.193.6/.94(043)

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE PROTÓTIPO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DO ENVELHECIMENTO FOTOTÉRMICO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS SOLARES

por

ANTÔNIO KARLOS ARAÚJO VALENÇA

Tese aprovada em 30 de março de 2026

Documento assinado digitalmente
 **KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA**
Data: 06/04/2026 09:03:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva
Orientadora – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **DANIELLE SILVA GUEDES DE LIMA**
Data: 13/04/2026 14:24:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Danielle Guedes de Lima Cavalcante
Examinadora Interna – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO MARDEN TORRES**
Data: 14/04/2026 11:13:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sandro Marden Torres
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIA DE MEDEIROS AQUINO**
Data: 07/04/2026 09:17:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Flávia de Medeiros Aquino
Examinadora Externa – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **CHRYSITIAN GREGORIO MEDEIROS DE LIMA**
Data: 06/04/2026 11:55:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Chrystian Gregório Medeiros de Lima
Examinador Externo – UFRGS

Dedico esse trabalho à Parízio Valença, Jandira Valença, Kelly Valença, Admilson Oliveira, Nathália Roque e Maria José (Lila).

AGRADECIMENTOS

À Deus, presente na minha vida e na daqueles que me cercam, nos abençoando e livrando-nos de todo o mal.

À minha orientadora, Prof^ª. Dra. Kelly Cristiane Gomes, pelo apoio, pelo acompanhamento ao longo desses anos. Por acreditar em cada aluno e cada trabalho desenvolvido sob sua tutela.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Chrystian Gregório, por compartilhar sua experiência e acreditar no meu trabalho.

À todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PP-GEM) que contribuíram para a minha formação acadêmica e o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas pesquisadores, Lucas Medeiros, Thaís Almeida, Aline Oliveira, Francielle Cristine, Gustavo Pamplona e Fábio Emanuel, que contribuíram e compartilharam seus conhecimentos e suas amizades ao longo desses anos.

Aos integrantes do Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) da UFPB, do Laboratório de Biomateriais (LaBio) da UFPB, do Núcleo de Estudos e Pesquisas em Materiais (Nepem) da UFPB, do Instituto Senai de Tecnologia em Eficiência Operacional (Campina Grande) e, Instituto Senai de Tecnologia em Têxtil e Confecção (João Pessoa).

Aos meus ex-professores e hoje colegas de profissão, Dr. Rodrigo Reis e Me. Alcides Araújo, pela convivência e pelos ensinamentos que atravessaram as etapas de minha formação.

Aos meus queridos ex-alunos do Senai CITI/CAM e Senai Stênio Lopes, vocês foram figuras importantes durante essa trajetória.

Ao meu grande amigo Leonardo Bitu Correia, cuja amizade iniciada ainda nos tempos de Mestrado no PPGEM/UFPB atravessou fronteiras. Mesmo com a distância física, mantivemos o diálogo constante, o incentivo mútuo e a cumplicidade necessária para enfrentar os desafios da pós-graduação. Agradeço pela parceria de anos e por estar presente, ainda que virtualmente, em cada etapa desta conquista.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da bolsa de pesquisa.

Aos demais que de alguma forma ajudaram na construção dessa Tese.

À todos, meu muitíssimo obrigado!!

VALENÇA, A. K. A. **Desenvolvimento e Validação de Protótipo Experimental para o Estudo do Envelhecimento Fototérmico em Superfícies Seletivas Solares.** João Pessoa-PB, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Março de 2026. 98f. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Kelly Cristiane Gomes. Co-Orientador: Prof. Dr. Chrystian Gregório Medeiros de Lima.

RESUMO

O aumento da demanda por fontes renováveis impulsiona o uso de coletores solares térmicos, cujo desempenho depende da eficiência e durabilidade de superfícies seletivas. No entanto, esses revestimentos sofrem degradação sob condições severas de operação, demandando métodos de avaliação fototérmica acessíveis. Diante disso, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo experimental para análise do envelhecimento fototérmico de superfícies seletivas solares. O protótipo utiliza lâmpadas dicróicas halógenas como fontes de radiação, com aquisição de dados de temperatura realizada via microcontrolador Arduino e sensores termopares. A metodologia consistiu em submeter filmes seletivos a diferentes condições de radiação ultravioleta (UV-C e UV-A) e estresse térmico no dispositivo desenvolvido. Foram investigadas superfícies à base de cromo em três configurações: Cr (S1), Cr+Cr/Cr₂O₃ (S2) e Cr/Cr₂O₃ (S3), depositadas por Magnetron Sputtering. As amostras foram caracterizadas por UV-Vis-NIR, DRX e Perfilometria Óptica. Os resultados iniciais indicaram perdas na absorvidade nos substratos expostos aos ambientes de degradação, com redução de 1,28%. Entre os filmes fabricados, a configuração S1 demonstrou maior estabilidade (variação de apenas -0,09%), enquanto a S2 apresentou a menor resistência (perda de -15,89%). As análises de Difração de Raios-X revelaram que a estrutura dos filmes manteve caráter amorfo em todas as configurações e ambientes de exposição, indicando estabilidade de fase. Contudo, a perfilometria apontou que a exposição do filme S2 ao protótipo causou um maior efeito redutor da rugosidade em comparação aos demais ambientes. O protótipo desenvolvido operou de forma estável a 80 °C, validando sua eficácia como uma ferramenta inovadora e de baixo custo para o estudo da durabilidade de revestimentos absorvedores.

Palavras-chave: Envelhecimento Fototérmico. Superfícies Seletivas Solares. Protótipo Experimental. Magnetron Sputtering. Cromo.

VALENÇA, A. K. A. **Development and Validation of an Experimental Prototype for the Study of Photothermal Aging in Solar Selective Surfaces.** João Pessoa-PB, Technology Center, Federal University of Paraíba, March 2026. 98p. Thesis. Postgraduate Program in Mechanical Engineering. Advisor: Prof. Dr. Kelly Cristiane Gomes. Co-Advisor: Prof. Dr. Chrystian Gregório Medeiros de Lima.

ABSTRACT

The increasing demand for renewable energy sources has driven the use of solar thermal collectors, whose performance depends on the efficiency and durability of selective surfaces. However, these coatings undergo degradation under harsh operating conditions, requiring accessible photothermal evaluation methods. Given this context, this work presents the development and validation of an experimental prototype for the photothermal aging analysis of solar selective surfaces. The prototype utilizes halogen dichroic lamps as radiation sources, with temperature data acquisition performed via an Arduino microcontroller and thermocouple sensors. The methodology consisted of subjecting selective films to different ultraviolet radiation conditions (UV-C and UV-A) and thermal stress within the developed device. Chromium-based surfaces were investigated in three configurations: Cr (S1), Cr+Cr/Cr₂O₃ (S2) and Cr/Cr₂O₃ (S3), deposited by Magnetron Sputtering. The samples were characterized using UV-Vis-NIR, XRD, and Optical Profilometry. Results indicated losses in the absorptivity of the exposed substrates, with a mean reduction of 1.28%. Among the fabricated films, the S1 configuration demonstrated the highest stability (a variation of only -0.09%), while S2 showed the lowest resistance (-15.89% loss). XRD analysis revealed that the film structure maintained an amorphous character across all configurations and exposure environments, indicating phase stability. However, profilometry pointed out that the exposure of the S2 film to the prototype caused a greater roughness reduction effect compared to other environments. The prototype operated stably at 80 °C, validating its effectiveness as an innovative and low-cost tool for studying the durability of absorber coatings.

Keywords: Photothermal aging. Solar selective surfaces. Experimental prototype. Magnetron Sputtering. Chromium-based coatings.

Lista de Figuras

Figura 1	Espectro da radiação eletromagnética.....	22
Figura 2	Interação da radiação incidente com um material sólido.....	23
Figura 3	Comportamento de uma superfície seletiva ideal.....	25
Figura 4	Tipologia das superfícies seletivas.	28
Figura 5	(a) Excitação de elétron em material condutor e (b) excitação de elétron em material não condutor.	31
Figura 6	Esquema do processo de Magnetron Sputtering.....	33
Figura 7	Comportamento de filmes de cromo submetidos ao envelhecimento térmico. ...	34
Figura 8	Mapa de co-ocorrência de palavras-chaves.	37
Figura 9	Quantidade de citações por país.	39
Figura 10	Mapa de rede de co-citação de autores.....	40
Figura 11	Bancada experimental em madeira para testes de campo.	41
Figura 12	Fluxograma Experimental da Pesquisa.	43
Figura 13	Equipamento de um Sistema <i>Sputtering</i>	45
Figura 14	Substratos dispostos no porta-amostra antes da deposição (a); filmes depositados (b).	46
Figura 15	Configuração das superfícies adotadas na pesquisa.	46
Figura 16	Marcação do batente para analisar espessura.	47
Figura 17	Vista interna do sistema de iluminação do protótipo.....	49
Figura 18	Módulo MAX6675 + Termopar Tipo K (a) e Arduíno Mega (b).	49
Figura 19	Diagrama de blocos do software FilmTAS desenvolvido no Simulink para aquisição e processamento.	51
Figura 20	Dispositivo comercial do tipo Câmara Escura Ultravioleta.	52
Figura 21	Exposição das amostras na Câmara Ultravioleta: radiação UV-C (a) e radiação UV-A (b).	53
Figura 22	Forno Mufla F-3000 (a); Amostras posicionadas no interior do forno (b).	53
Figura 23	Vista do sistema em operação.....	58
Figura 24	Comparação do sinal de um sensor termopar em diferentes intervalos de aquisição.	59

Figura 25 Registro de temperatura na validação do sistema (700s).....	60
Figura 26 Espectros de absorvância do aço inoxidável AISI 304 submetidos à diferentes condições.	61
Figura 27 Curvas de absorvância das amostras depositadas.	63
Figura 28 Curvas de absorvância das amostras expostas à radiação UV-C	65
Figura 29 Curvas de absorvância das amostras expostas à radiação UV-A	67
Figura 30 Curvas de absorvância das amostras expostas ao protótipo fototérmico	69
Figura 31 Curvas de absorvância das amostras expostas à mufla.....	70
Figura 32 Comportamento dos filmes de cromo submetidos à diferentes ambientes de exposição à radiação UV	71
Figura 33 <i>Bandgap</i> do substrato e dos filmes de Cromo depositados em Aço Inox 304. ...	73
Figura 34 <i>Bandgap</i> do substrato e dos filmes de Cromo expostos à radiação UV-C.....	74
Figura 35 <i>Bandgap</i> do substrato e dos filmes de Cromo expostos à radiação UV-A.....	74
Figura 36 <i>Bandgap</i> do substrato e dos filmes de Cromo expostos ao protótipo fototérmico.	75
Figura 37 <i>Bandgap</i> do substrato e dos filmes de Cromo expostos ao forno mufla.	75
Figura 38 Mapa 3D de perfilometria dos filmes depositadas.....	78
Figura 39 Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição à radiação UV-C.....	79
Figura 40 Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição à radiação UV-A.	80
Figura 41 Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição ao protótipo fototérmico. .	82
Figura 42 Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição ao forno mufla.	83
Figura 43 Relação entre a absorvância média e a rugosidade superficial.	86
Figura 44 Análises por Difração de Raios-X nas amostras em estado inicial.	87
Figura 45 Análises por Difração de Raios-X nas amostras em estado de exposição.....	88

Lista de Tabelas

Tabela 2	Materiais comerciais utilizados como superfície seletiva.	26
Tabela 3	Técnicas de fabricação de superfície seletiva.	27
Tabela 4	Espaçamento entre bandas (E_g) e comprimento de onda (λ_g).	32
Tabela 5	Especificações comerciais dos alvos utilizados.	45
Tabela 6	Parâmetro de deposição e classificação das amostras.	47
Tabela 7	Posicionamento dos sensores para captação da temperatura no protótipo.	51
Tabela 8	Organização das amostras dispostas para os testes fototérmicos.	54
Tabela 9	Absortividades hemisféricas totais obtidas para cada sistema de exposição.	62
Tabela 10	Absortividades hemisféricas totais dos filmes depositados.	64
Tabela 11	Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição à radiação UV-C	66
Tabela 12	Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição à radiação UV-A	68
Tabela 13	Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição ao Protótipo Foto- término término término	68
Tabela 14	Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição ao forno mufla.	71
Tabela 15	Análise comparativa das amostras em diferentes ambientes de exposição Análise comparativa das amostras em diferentes ambientes de exposição	72
Tabela 16	<i>Bandgap</i> dos filmes de Cromo mediante todos os ambientes de exposição.	77
Tabela 17	Parâmetros de rugosidade superficial das amostras depositadas.	78
Tabela 18	Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas à exposição UV-C. UV-C. UV-C.	80
Tabela 19	Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas à exposição UV-A. UV-A. UV-A.	81
Tabela 20	Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas à exposição In- fravermelha do protótipo. fravermelha do protótipo. fravermelha do protótipo.	81
Tabela 21	Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas ao forno mufla. .	83
Tabela 22	Parâmetros de rugosidade superficial média e estimativa das espessuras, expe- rimental e calculada. rimental e calculada. rimental e calculada.	84

Lista de Abreviaturas e Siglas

AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço
AR	Camada Antirreflexiva
CCS	Centro de Ciências da Saúde
CEAR	Centro de Energias Alternativas e Renováveis
CVD	Deposição Química a Vapor
DRX	Difratometria de Raios-X
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IR	Região do Infravermelho
IRC	Índice de Reprodução de Cor
ISO	Organização Internacional de Padronização
LABFILM	Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos
LABIO	Laboratório de Biomateriais
NEPEM	Núcleo de Estudos e Pesquisas em Materiais
NIR	Região do Infravermelho Próximo
PC	Critério de Desempenho
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PVC	Policloreto de Vinila
PVD	Deposição Física a Vapor
SSS	Superfície Seletiva Solar
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UV	Região Ultravioleta
UV-A	Radiação Ultravioleta A
UV-C	Radiação Ultravioleta C
Vis	Região Visível
WOS	Web of Science

Lista de Símbolos

α	Absortividade
$\Delta\alpha$	Variação da absortividade
ε	Emissividade
$\Delta\varepsilon$	Variação da emissividade
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência
ρ	Refletividade
τ	Transmissividade
θ	Ângulo de incidência
c	Velocidade de propagação
d	Espaçamento interplanar
E_g	Gap de energia
h	Constante de Planck
I_{sol}	Distribuição espectral da radiação solar
n	Índice de refração
R	Reflectância
R_a	Rugosidade superficial
R_p	Valor médio do pico
R_v	Valor médio do vale
s	Seletividade ótica
S_a	Rugosidade média (área)
t	Espessura
T	Temperatura
V	Volts
$\%$	Porcentagem
$^{\circ}/s$	Graus por segundos
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$^{\circ}C/min$	Graus Celsius por minuto

h	Horas
kV	Quilovolt
kWh/m ²	Quilowatt-hora por metro quadrado
mA	Miliampere
min	Minutos
mm	Milímetros
nm	Nanômetros
μm	Micrometro
Pa	Pascal
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
Torr	Unidade de pressão (Torricelli)
W	Watts
xlsx	Formato de arquivo de planilha eletrônica

Sumário

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2	OBJETIVO GERAL	20
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	<u>REFERENCIAL TEÓRICO</u>	22
2.1	RADIAÇÃO SOLAR E PROPRIEDADES ÓPTICAS	22
2.2	SUPERFÍCIES SELETIVAS SOLARES	25
2.2.1	Absorvedores Intrínsecos	27
2.2.2	Revestimentos Metal-Semicondutor	29
2.2.3	Superfícies Texturizadas	29
2.2.4	Revestimentos em Multicamadas	29
2.2.5	Revestimento de Materiais Compósitos	30
2.3	<i>BANDGAP</i> E SUAS IMPLICAÇÕES	30
2.4	DEPOSIÇÃO VIA <i>SPUTTERING</i>	32
2.5	ESTABILIDADE TÉRMICA E ENVELHECIMENTO FOTOTÉRMICO	33
2.6	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	36
2.7	CONSIDERAÇÕES DO REFERENCIAL TEÓRICO	42
3	<u>METODOLOGIA</u>	43
3.1	DEPOSIÇÃO DOS FILMES	44
3.1.1	Escolha e Preparação dos Substratos	44
3.1.2	Deposição por pulverização catódica <i>Magnetron Sputtering</i>	44
3.2	PROTÓTIPO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS FOTOTÉRMICOS	48
3.2.1	FilmTAS: Sistema de Monitoramento e Aquisição de Dados de Temperatura....	49
3.3	CÂMARA COMERCIAL DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA	51
3.4	ENVELHECIMENTO TÉRMICO ACELERADO	53
3.5	DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS PARA OS TESTES	54
3.6	CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA, FÍSICA E QUÍMICA	54

3.6.1	Espectrofotometria UV–Vis–NIR	54
3.6.2	Estimativa de <i>Bandgap</i>	55
3.6.3	Difração de Raios-X	56
3.6.4	Perfilometria Óptica.....	56
4	<u>RESULTADOS</u>	58
4.1	VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO FOTOTÉRMICO	58
4.2	EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NA ABSORTI- VIDADE DOS FILMES	61
4.2.1	AVALIAÇÃO DOS SUBSTRATOS	61
4.2.2	AVALIAÇÃO DOS FILMES	63
4.2.2.a	Depositados (T = 25°C)	63
4.2.2.b	Exposição UV-C	65
4.2.2.c	Exposição UV-A	66
4.2.2.d	Exposição ao Protótipo	68
4.2.2.e	Exposição ao Forno Mufla.....	69
4.2.2.f	Comparativo entre os ambientes de Exposição	71
4.3	EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NO <i>BANDGAP</i> DOS FILMES	73
4.4	EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NA RUGOSI- DADE DOS FILMES	77
4.4.1	ANÁLISE DOS PERFIS TOPOGRÁFICOS	77
4.4.1.a	Depositados (T = 25°C)	77
4.4.1.b	Exposição UV-C	79
4.4.1.c	Exposição UV-A	80
4.4.1.d	Exposição ao Protótipo	81
4.4.1.e	Exposição ao Forno Mufla.....	82
4.4.1.f	Avaliação da Espessura e Comparativo entre os ambientes de Exposição	83
4.5	EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NAS PROPRI- DADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS FILMES.....	86
4.5.1	ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	86
5	<u>CONCLUSÕES</u>	89
5.1	ABSORTIVIDADE DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS	89

5.2	ANÁLISE MORFOLÓGICAS DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS	89
5.3	ANÁLISE ESTRUTURAL E QUÍMICA DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS....	90
5.4	AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO PROTÓTIPO	90
5.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		92

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescimento acelerado da demanda energética global, aliado à crescente escassez dos combustíveis fósseis e aos impactos ambientais provocados por sua queima, tem impulsionado a busca por fontes renováveis de energia (Maka; Alabid, 2022). Entre elas, a energia solar destaca-se como uma alternativa estratégica, abundante e sustentável, especialmente em países com elevada incidência de radiação solar, como o Brasil. Dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022) evidenciam que a matriz energética nacional em 2021 já apresentava uma predominância de fontes renováveis, com cerca de 22,8% da geração proveniente da combinação entre energia solar, eólica e biomassa. Este panorama reflete o compromisso nacional em diversificar a matriz e reduzir a dependência de fontes carbonatadas.

Dentro do escopo das tecnologias solares, os coletores solares térmicos representam uma solução madura e eficiente para a conversão da radiação solar em energia térmica, sendo amplamente aplicados no aquecimento de água, climatização de ambientes e processos industriais (Fraidenraich *et al.*, 2023). A viabilidade técnica e social dessa tecnologia no território brasileiro é demonstrada pela sua integração em programas habitacionais de larga escala, como o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) (Brasil, 2011). A implementação desses sistemas em diferentes regiões do país ratifica a robustez da tecnologia solar térmica sob variadas condições climáticas (Pereira *et al.*, 2017; Maia; Lima; Gomes, 2019).

O potencial de expansão é particularmente expressivo na região Nordeste, que combina alta disponibilidade de radiação com um crescente parque tecnológico. No estado da Paraíba, por exemplo, a irradiação média anual atinge patamares de até 5,71 kWh/m² (Paraíba, 2023). Tal condição, associada à presença de centros de pesquisa consolidados, como a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), tem impulsionado o avanço científico e tecnológico na área de energias renováveis (Valença, 2023).

O desempenho desses coletores depende fundamentalmente da eficiência óptica de suas superfícies absorvedoras, conhecidas como superfícies seletivas solares. Tais revestimentos são projetados para maximizar a absorção da radiação solar no espectro ultravioleta, visível e in-

fravermelho próximo (UV-Vis-NIR), enquanto minimizam a emissão térmica no infravermelho distante (Sade *et al.*, 2008; Cao *et al.*, 2014; Zayed, 2024). No entanto, apesar do alto desempenho inicial, as superfícies seletivas estão sujeitas a processos de degradação quando expostas a condições severas de operação, como estresse térmico prolongado (Asaad Yasseen; Istvan; Istvan, 2022; Kumar *et al.*, 2024) e radiação ultravioleta intensa — fenômeno denominado envelhecimento fototérmico.

Nesse contexto, grupos de pesquisa da UFPB têm concentrado estudos sobre a deposição de filmes finos via Magnetron Sputtering (Medeiros *et al.*, 2019; Silva Neto *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2024), buscando otimizar o processo de fabricação e correlacionar diferentes materiais à sua durabilidade. A realização de ensaios de degradação acelerada surge, portanto, da necessidade de estimar a vida útil e validar a aplicabilidade dessas superfícies em ambientes reais de operação (Kempe, 2008; Jorgensen *et al.*, 2000; Köhl *et al.*, 1989).

Contudo, embora existam protocolos normatizados para a qualificação desses absorvedores, estes frequentemente preconizam ensaios de envelhecimento de forma isolada — priorizando o estresse térmico em muflas isotérmicas. A carência de metodologias acessíveis que integrem esses agentes de forma sinérgica, aliada à dependência de equipamentos comerciais de alto custo, representa um gargalo crítico para a predição fiel da vida útil de novos revestimentos.

Diante dessa conjuntura, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo experimental para o envelhecimento fototérmico de superfícies seletivas solares. O dispositivo foi projetado para simular, de forma controlada e reproduzível, os efeitos combinados da radiação ultravioleta (UV) e do estresse térmico, permitindo uma análise acelerada da durabilidade de revestimentos absorvedores.

Além do desenvolvimento do hardware, o estudo compreende a caracterização óptica e morfológica de filmes seletivos à base de cromo em diferentes configurações. A integração entre a construção do aparato e os ensaios experimentais permitiu validar o protótipo como uma ferramenta eficaz para o avanço da engenharia de superfícies. Dessa forma, esta pesquisa não apenas contribui para a avaliação da durabilidade de novos materiais, mas também fortalece a autonomia científica da UFPB no campo da energia solar térmica, com impacto direto no desenvolvimento de soluções sustentáveis nacionais.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar um protótipo experimental para o estudo do envelhecimento fototérmico em superfícies seletivas solares.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar um sistema experimental dedicado a ensaios de envelhecimento fototérmico, integrando controle de aquecimento e monitoramento em tempo real.
2. Investigar a influência de diferentes configurações de filmes à base de cromo nas propriedades seletivas, correlacionando os parâmetros de deposição via *Magnetron Sputtering* com a arquitetura dos filmes.
3. Estabelecer a correlação entre os aspectos microestruturais (morfológicos/químicos) e o desempenho óptico dos revestimentos.
4. Analisar a cinética de degradação e a estabilidade térmica dos revestimentos quando submetidos a ciclos de estresse fototérmico, quantificando perdas de eficiência absorptiva.
5. Comparar o desempenho dos revestimentos produzidos com o de superfícies seletivas comerciais, visando validar a eficácia do protótipo desenvolvido e a eficiência dos filmes obtidos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está organizada em cinco capítulos, estruturados de forma a refletir a evolução lógica da pesquisa — desde a contextualização do problema até a apresentação dos resultados e das principais contribuições do estudo:

- **Capítulo I – Introdução:** Apresenta o panorama energético global e nacional, destacando a relevância das superfícies seletivas em coletores térmicos. Define-se o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, bem como a justificativa técnica da proposta.
- **Capítulo II – Referencial Teórico e Estado da Arte:** Estabelece a base teórica sobre radiação solar, coletores planos e os princípios físicos das superfícies seletivas. Aborda o estado da arte por meio de uma análise bibliométrica, discutindo o desenvolvimento de

bancadas experimentais e as metodologias de análise térmica e fototérmica na literatura recente.

- **Capítulo III – Metodologia Experimental:** Descreve os materiais empregados e os procedimentos adotados para o alcance dos objetivos, detalhando as técnicas de deposição por *Magnetron Sputtering* e as ferramentas de caracterização óptica e morfológica utilizadas.
- **Capítulo IV – Resultados e Discussões:** Apresenta e discute os dados obtidos, detalhando a engenharia do protótipo desenvolvido (hardware e software) e os resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado nas amostras de cromo.
- **Capítulo V – Conclusões e Trabalhos Futuros:** Sintetiza as principais contribuições da pesquisa, validando a eficácia do protótipo e propondo diretrizes para a continuidade das investigações nesta linha de estudo.

CAPÍTULO II

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RADIAÇÃO SOLAR E PROPRIEDADES ÓPTICAS

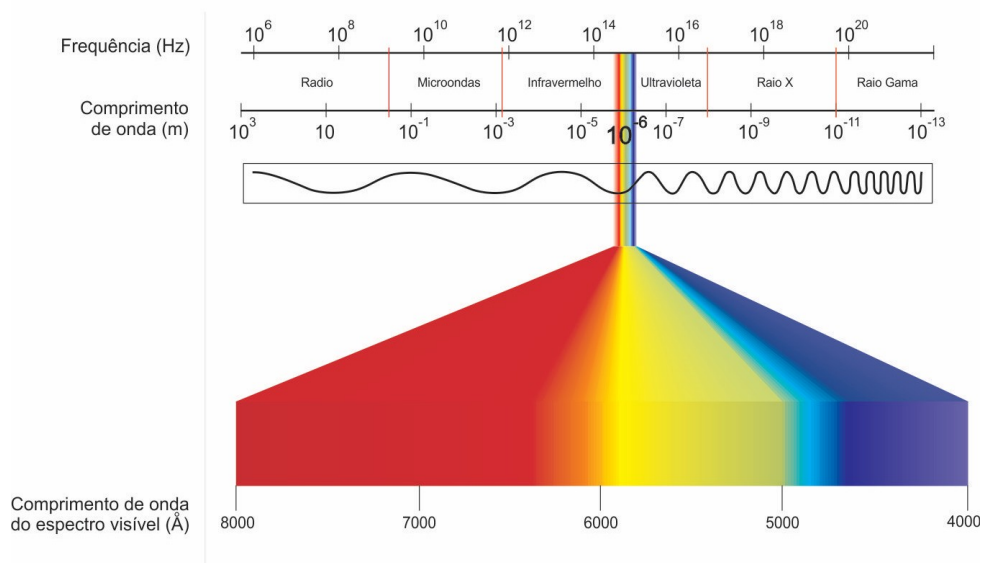
Na teoria clássica, a radiação eletromagnética pode ser definida como a composição entre um campo elétrico e um campo magnético que oscilam entre si, tanto perpendicularmente quanto também à direção em que eles se propagam no vácuo a uma velocidade constante (3×10^8 m/s). É representada por duas propriedades, frequência (ν) e comprimento de onda (λ) que se relacionam conforme a Eq. (1).

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda no meio.

As ondas eletromagnéticas apresentam características semelhantes, embora seu comportamento se altere dependendo do comprimento de onda. A Figura 1 apresenta o espectro eletromagnético, faixa completa de radiações eletromagnéticas que variam de micro-ondas de rádio de baixa frequência (10^2) a raios gama (10^{-4}) de alta frequência.

Figura 1: Espectro da radiação eletromagnética.

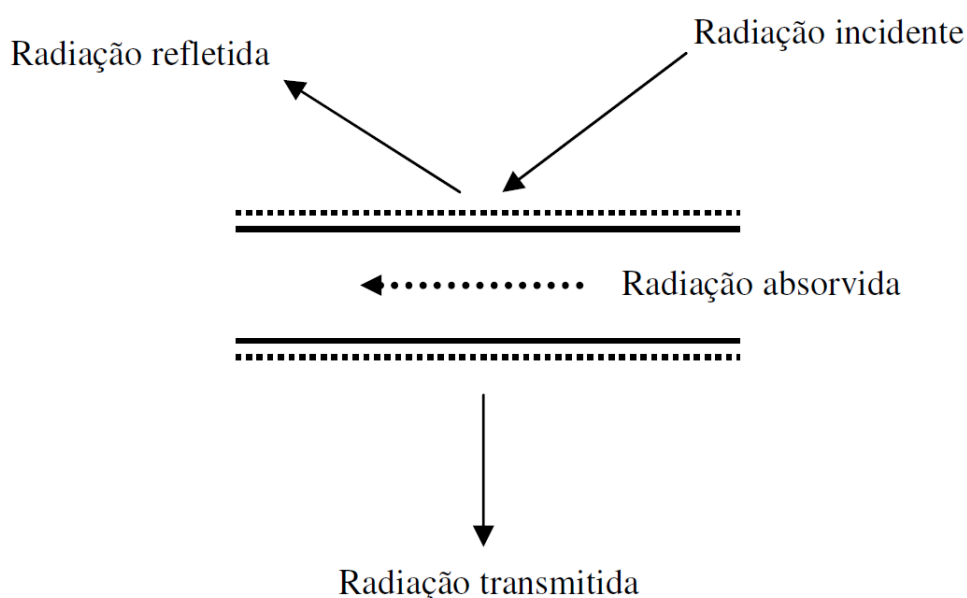


Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2008)

A radiação solar que incide sobre a Terra se distribui com Ultravioleta (100–400 nm): 5% da energia; Visível (400–700 nm): 43% da energia; e Infravermelho (700–2500 nm): 52% da energia (Çengel, 2012). Para aplicações térmicas, como coletores solares, a faixa mais relevante vai de 300 a 2500 nm, pois representa a maior parte da energia disponível para conversão em calor (Silva Neto, 2017). A eficiência de um sistema de captação térmica solar depende, portanto, da capacidade do material absorvedor de captar eficientemente essas faixas, minimizando a perda por emissão na região do infravermelho térmico ($\geq 2,5 \mu\text{m}$).

Para fins de aplicação no aproveitamento da energia solar é preciso entender a maneira como a radiação interage com materiais sólidos. Essa interação depende tanto do tipo de radiação envolvida quanto das características a nível atômico desses materiais (Gonçalves, 2020). Essas características são chamadas de propriedades ópticas dos materiais e são agrupadas em quatro tipos: absortividade, refletividade, transmissividade e emissividade. A radiação que incide em um material sólido, pode provocar a ocorrência de três comportamentos, podendo a radiação ser absorvida, refletida ou transmitida (Figura 2). Assim, admite-se dizer que a intensidade total da radiação incidente é dada pela soma das parcelas absorvida, refletida e transmitida.

Figura 2: Interação da radiação incidente com um material sólido.



Fonte: Adaptado de Incropera & Witt (1992)

Esquematizando as informações presentes na Figura 2, onde a incidência total é dada pela soma das parcelas absorvida, refletida e transmitida, chega-se a Equação (2) e a partir dela, definir as propriedades ópticas: **absortividade, refletividade e transmissividade**.

$$G_T = G_a + G_r + G_t \quad (2)$$

onde G_T é a irradiação incidente, G_a é a parcela da radiação absorvida, G_r é a parcela da radiação refletida e G_t é a parcela da radiação transmitida.

A divisão de todos os termos da Equação (2) pela incidência da irradiação total G_T , resulta na seguinte equação:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (3)$$

onde α é a absortividade, ρ é a refletividade e τ é a transmissividade.

Quando materiais semitransparentes (vidros, cristais incolores) recebem radiação ocorre um fenômeno global em que a radiação emana de todo o material ($\tau \neq 0$). No entanto, quando o material for opaco (metais, madeiras), a radiação não é transmitida ($\tau = 0$) e torna-se um fenômeno superficial. Para materiais opacos, simplifica-se a Eq. (3) para Eq. (4).

$$1 = \alpha + \rho \longrightarrow \alpha = 1 - \rho \quad (4)$$

É importante considerar que as propriedades ópticas como absortividade, refletividade e transmissividade, também apresentam um caráter direcional e espectral em seu comportamento, ou seja, dependem da direção e do comprimento de onda associados (Silva Neto, 2017). Tendo isso em mente, pode-se calcular essas propriedades a partir da Lei de Kirchhoff. Segundo Çengel (2012), essa lei enuncia que a emissividade hemisférica total da superfície na temperatura (T) é igual a sua absortividade hemisférica total para radiação proveniente do corpo negro na mesma temperatura. Essa lei também é válida considerando superfícies na mesma temperatura que emitem e absorvem independentemente da direção. A Eq. (5) mostra a forma espectral da lei de Kirchhoff.

$$\varepsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) \quad (5)$$

Conhecer a natureza da radiação solar, as formas de interação com os materiais sólidos e as equações que representam esses fenômenos é imprescindível para o perfeito entendimento sobre as superfícies seletivas solares. No entanto, é fundamental também saber que tipos de materiais, ligações moleculares entre eles e que geometrias construtivas são facilitadoras da

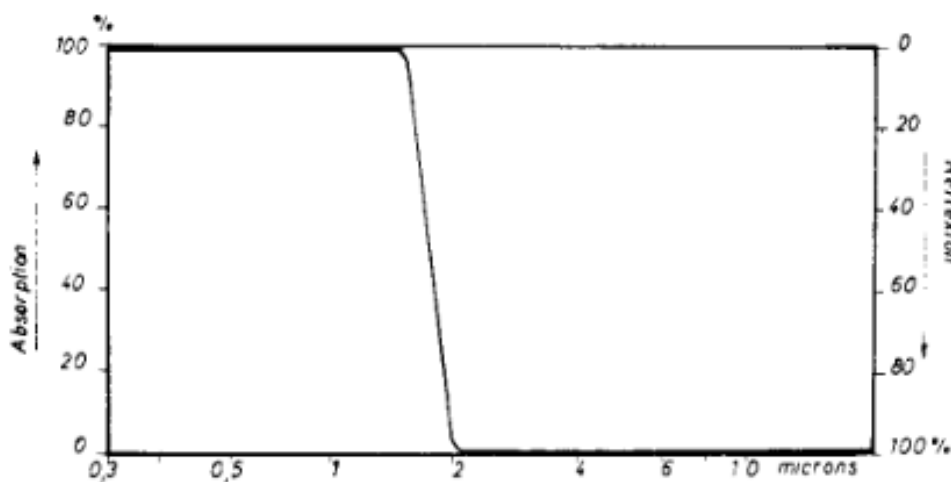
absorção solar incidente, contribui para uma maior eficiência no processo de conversão termosolar (Medeiros *et al.*, 2021).

2.2 SUPERFÍCIES SELETIVAS SOLARES

Uma superfície seletiva solar é um material projetado para absorver a radiação solar de forma seletiva, maximizando a absorptância na região do visível enquanto minimiza a emissividade no infravermelho (Alencastro, 2014). Estes revestimentos desempenham papel central em sistemas de aquecimento solar térmico, como coletores planos e concentradores, pois determinam o desempenho térmico global do sistema (Barshilia *et al.*, 2008b; Yin *et al.*, 2009). A literatura científica mostra um interesse crescente no desenvolvimento de novos materiais e estruturas seletivas com maior durabilidade e seletividade espectral (Sade *et al.*, 2008; Barshilia *et al.*, 2008a).

O comportamento considerado ideal de uma superfície seletiva foi apresentado por Petitjean & Poorten (1980), conforme ilustrado na Figura 3. Para que a conversão em calor seja eficiente, o absorvedor deve captar fortemente a radiação na faixa de 0,3 a 2,5 μm (espectro solar ativo) e emitir minimamente na faixa de 2,5 a 20 μm (infravermelho térmico), reduzindo perdas por re-radiação (Selvakumar *et al.*, 2010).

Figura 3: Comportamento de uma superfície seletiva ideal.



Fonte: Adaptado de Petitjean & Poorten (1980)

A eficiência de uma superfície é quantificada através de um processo conhecido como seletividade espectral, que envolve a seleção cuidadosa de materiais que têm propriedades ópticas específicas. Portanto, a seletividade buscada consiste na absorção de toda a radiação emitida

pelo sol correspondente ao visível e na não-emissão de radiação pelos coletores na faixa do infravermelho (Silva Neto, 2017). Esta propriedade óptica (s) pode ser calculada através da razão entre a absorbância do revestimento (α) e emissividade (ε), conforme Equação (6) (Gomes, 2001).

$$s = \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (6)$$

Em sistemas de aproveitamento solar, superfícies com $s > 10$ são consideradas altamente seletivas (Xiao *et al.*, 2011). Historicamente, autores como Shaffer (1958) e Kokoropoulos, Salam & Daniels (1959) perceberam que alguns materiais poderiam ser projetados e utilizados como revestimento superficial em outros. Este conceito consolidou-se com os trabalhos de Tabor (1961), que utilizou eletrodeposição para produzir revestimentos de NiS e ZnS, amplamente aplicados em aquecedores comerciais à época (Pinho *et al.*, 2020; Sena, 2016). Desde então, materiais metálicos como o cromo negro têm sido empregados devido à elevada absorvância ($\alpha \geq 0,90$) e baixa emissividade ($\varepsilon \leq 0,10$) (Cao; Hu, 2000; Cong *et al.*, 2006; Janicki *et al.*, 2012; Gomes *et al.*, 2017). A Tabela 2 resume os principais materiais aplicados como camadas absorvedoras nas últimas décadas.

Tabela 2: Materiais comerciais utilizados como superfície seletiva.

Revestimento	Fabricação	Absortividade	Emissividade (100°C)	Estabilidade Térmica	Fabricante
Aço Inoxidável modificado	Conversão química	0,62-0,93	0,10	<200°C (ar)	SEL, INCO
Níquel Negro (NiS-ZnS)	Eletrodeposição	0,88-0,96	0,03-0,10	<200°C (ar)	Maxorb
Cromo Negro (Cr-Cr ₂ O ₃)	Eletrodeposição	0,97	0,09	400°C (vácuo) 350°C (ar)	MTI, ChromeCoat, Energie Solaire
Ni-NiOx	Sputtering	0,96	0,10	300°C (ar)	Sunstrip
Mo-Al ₂ O ₃	Sputtering	0,96	0,16 (350°C)	350-500°C (vácuo)	Solel
Mo-Al ₂ O ₃	Sputtering	0,96	0,06 (350°C)	350-500°C (vácuo)	TurboSun
Mo-SiO ₂	Sputtering	0,94	0,13 (580°C)	580°C (vácuo)	Angelantoni
W-Al ₂ O ₃	Sputtering	0,96	0,16 (350°C)	350-500°C (vácuo)	Solel

Fonte: Adaptado de Kennedy (2002) e Selvakumar & Barshilia (2012)

Com o intuito de superar as limitações de estabilidade e desempenho observadas em revestimentos tradicionais, a literatura têm focado na otimização dos métodos de deposição utilizados na produção de superfícies seletivas. A escolha adequada da técnica é determinante para o controle da composição, aderência e morfologia dos filmes, influenciando diretamente suas propriedades ópticas e térmicas. As técnicas de deposição mais recorrentes incluem PVD (Physical Vapor Deposition), CVD (Chemical Vapor Deposition), spin coating, spray pyrolysis e, mais recentemente, o Magnetron Sputtering, que oferece maior controle sobre a espessura, composição e microestrutura dos filmes (Teixeira *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2023). Essas técnicas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Técnicas de fabricação de superfície seletiva.

Material	Substrato	Processo de Fabricação	Absortância (%)	Emitância (100°C)
Cr:SiO ₂	Cu, Al	DC Sputtering	90-96	3-14
NiCrOx	SS	Sputtering	80	14
CuFeMnO ₄ /Sílica	Vidro, Si	Sol-Gel	60	29-39
PbS	Al	Evaporação, Pirólise	93-99	10-21
Cromo Negro	Ni-Cu, Cu, SS	Eletrodeposição	97	9
Cr, Fe, Mo, SS, Ta, Ti, W	Cu	DC Sputtering	84-90	3-6
Ge, Si, PbS	Cu, SS	Pintura	83-96	7

Fonte: Adaptado de Kennedy (2002)

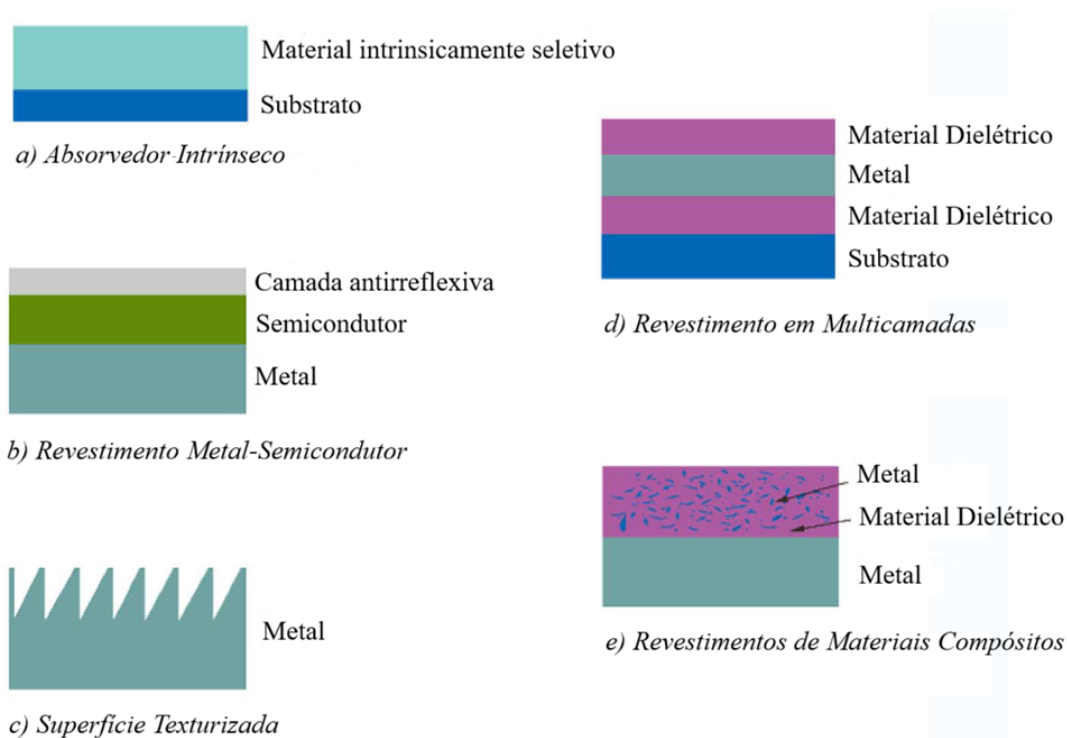
As superfícies seletivas podem ser agrupadas segundo sua constituição química e morfológica, conforme ilustrado na Figura 4. Cada categoria busca aperfeiçoar a relação absortividade/emissividade por diferentes mecanismos físicos. Estudos comparativos mostram que as superfícies multicamadas apresentam melhor estabilidade térmica e resistência ao envelhecimento em comparação com os revestimentos intrínsecos (Silva Neto *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2023; Farchado *et al.*, 2024). Em particular, a combinação de filmes metálicos absorvedores com camadas dielétricas e antirreflexivas aumenta a seletividade espectral e reduz perdas por radiação no infravermelho (Yin *et al.*, 2009; Selvakumar *et al.*, 2010).

2.2.1 Absorvedores Intrínsecos

Os absorvedores intrínsecos são materiais que possuem seletividade natural, ou seja, sem necessidade de processamentos em laboratório. Por conta disso, não possuem altos valores de seletividade. Os materiais utilizados como absorventes intrínsecos são principalmente en-

contrados em metais de transição e semicondutores, como Tungstênio (W) metálico (Agnihotri; Gupta, 1981), MoO_3 dopado de Mo (Savelli; Bougnot, 2005), HfC (Randich; Pettit, 1981), entre outros.

Figura 4: Tipologia das superfícies seletivas.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2017)

De acordo com Randich & Pettit (1981), o ZrB_2 , por exemplo, possui absorvência solar de 0,77, enquanto sua emitância é 0,08. Por sua vez, a adição de processos químicos pode melhorar o comportamento seletivo do filme, proporcionando que alguns materiais obtidos em laboratório obtenham a absorvência de 0,96 (Madhukeshwara; Prakash, 2012; Silva Neto, 2017). Os revestimentos absorventes intrínsecos não são candidatos ideais para utilização direta em revestimentos de absorção solar, mas sim como um componente para formação de multicamadas (Zhang *et al.*, 2017).

Embora de fácil obtenção e baixo custo, os revestimentos intrínsecos geralmente possuem baixa estabilidade térmica e limitada durabilidade em longo prazo, principalmente quando aplicados sobre substratos metálicos submetidos a ciclos térmicos (Cao; Hu, 2000; Sade *et al.*, 2008).

2.2.2 Revestimentos Metal-Semicondutor

Os revestimentos metal-semicondutor possuem um alto índice de refração e, geralmente são aplicados como uma camada anti-reflexiva. Neste tipo de revestimento, o material semicondutor absorve radiação solar em pequenos comprimentos de onda. Os fótons devem possuir energia superior a banda de energia (*bandgap*) do semicondutor para promover a ida dos elétrons à banda de condução. Pode-se citar alguns semicondutores de interesse, como Si (1,1eV), Ge (0,7eV), PbS (0,4eV), entre vários outros materiais apropriados (Zhang *et al.*, 2017). Devido ao fato de que os semicondutores não são estáveis em aplicações com altas temperaturas, portanto, a barreira de fusão é necessária como um tampão para restringir a difusão de alta temperatura (Seraphin, 1976).

Zhang *et al.* (2017) comenta que a maioria das camadas de absorção de semicondutores possuem altos índices de refração, o que resultará em maiores perdas de refletância, então uma camada anti-reflexiva deve ser levada em consideração ao se projetar um filme fino.

2.2.3 Superfícies Texturizadas

As Superfícies texturizadas, ou rugosas, também podem ter características seletivas, sendo baseadas na geometria, na porosidade ou em pequenas estruturas que parecem ásperas aos pequenos comprimentos de ondas, e lisas aos grandes comprimentos de ondas da radiação solar, conhecidas como estruturas dendríticas (Rodrigues, 2014). Essas estruturas funcionam como armadilhas ópticas, ocorrendo múltiplas reflexões da radiação incidente, ocasionando o aprisionamento das mesmas.

2.2.4 Revestimentos em Multicamadas

Os revestimentos multicamadas são projetados para obter alto desempenho seletivo por meio da superposição de três ou mais camadas, cada uma com função específica. Em geral, a estrutura compreende substrato metálico refletivo (ex: alumínio, cobre, aço inoxidável); camada metálica absorvedora (Cr, Ni, Mo); camada dielétrica (Al_2O_3 , Si_3N_4 , HfO_2); camada antirreflexiva superior. Vale ressaltar que a sequência de deposição e a espessura das camadas devem ser projetada corretamente para que os efeitos de múltiplas reflexões que acontecem no interior dessas camadas resultem na interferência completa da radiação solar incidente (Silva Neto, 2017).

No estudo de Valença (2021), este tipo de revestimento foi fabricado na configuração $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$. O revestimento apresentou valor médio de absorvância 0,93 antes do processo de envelhecimento e 0,88 pós-envelhecimento a temperatura de 250 °C. Esse resultado corrobora com os valores obtidos por Barshilia *et al.* (2008b) na configuração $\text{Cr}_x\text{O}_y/\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$. Em ambos os trabalhos supracitados os revestimentos foram obtidos pela técnica de deposição conhecida como *sputtering* devido a complexidade e controle dos parâmetros de deposição.

2.2.5 Revestimento de Materiais Compósitos

Os materiais compósitos ou cermets (*ceramic-metal composites*) consistem em nanopartículas metálicas dispersas em uma matriz dielétrica, formando uma camada com comportamento óptico intermediário. A matriz pode ser SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 etc., enquanto as partículas metálicas incluem Cr, Ni, Co ou Cu. Contudo, o desempenho depende fortemente da homogeneidade da dispersão, do tamanho das partículas e da estabilidade da matriz sob calor (Silva Neto, 2017; Yang *et al.*, 2023a).

2.3 BANDGAP E SUAS IMPLICAÇÕES

A estrutura atômica e molecular dos materiais sólidos é um fator determinante para o modo como esses materiais interagem com a radiação eletromagnética. A natureza da ligação química predominante no material influencia diretamente a energia necessária para que os elétrons transitem de estados fundamentais para estados excitados, fenômeno que está diretamente relacionado à absorção da radiação incidente (Silva Neto, 2017).

Em materiais metálicos, onde predominam ligações metálicas, os elétrons estão relativamente livres no reticulado cristalino e exigem quantidades muito pequenas de energia para serem excitados. Como consequência, esses materiais apresentam alta densidade de estados disponíveis e, portanto, absorvem fótons de praticamente todo o espectro solar, o que os torna altamente absorvedores, porém também altamente emissores na faixa do infravermelho térmico (Fox, 2010).

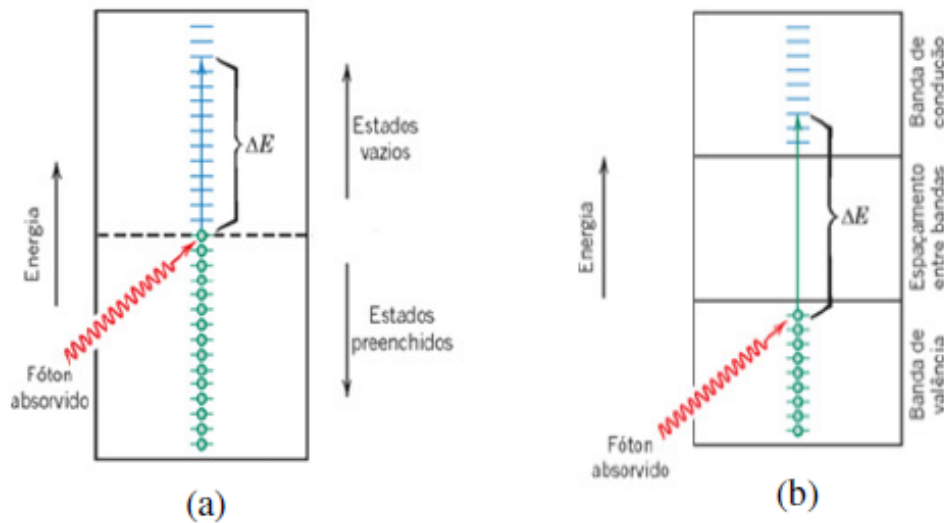
Em contrapartida, em materiais compostos por ligações covalentes ou iônicas, os elétrons estão fortemente ligados aos núcleos, sendo necessário fornecer quantidades de energia significativamente maiores para promover sua excitação. Nesse caso, apenas fótons de alta energia (isto é, comprimentos de onda curtos, como o ultravioleta) podem ser absorvidos. A

radiação incidente em comprimentos de onda maiores (como o visível ou o infravermelho próximo) tende a ser refletida ou transmitida, o que faz desses materiais bons isolantes térmicos ou camadas antirreflexivas (Silva Neto, 2017; Fox, 2010).

Adicionalmente, materiais com ligações covalentes também podem apresentar absorção significativa na faixa do infravermelho médio, devido à ressonância com modos vibracionais moleculares. Isso ocorre porque o infravermelho possui energia suficiente para excitar vibrações de ligação — especialmente estiramentos e deformações angulares — sem necessariamente promover transições eletrônicas (Fox, 2010).

Essas diferenças fundamentais entre materiais metálicos e dielétricos podem ser melhor compreendidas com base na largura de banda proibida ou bandgap, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: (a) Excitação de elétron em material condutor e (b) excitação de elétron em material não condutor.



Fonte: Adaptada de Callister JR & Rethwisch (2016)

O *bandgap* corresponde à diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução de um material. Essa diferença define a energia mínima que um fóton precisa ter para ser absorvido pelo material. A relação entre a energia de fóton (E_g) e o comprimento de onda (λ_g) do fóton incidente é dada pela Eq. (7).

$$E_g \approx \frac{1240}{\lambda_g} \quad (7)$$

onde 1240 é o valor aproximado do produto das constantes físicas h (constante de Planck) e c (velocidade da luz) com resultado em elétron-volts (eV).

A Tabela 4 apresenta os valores de *bandgap* de alguns óxidos metálicos utilizados em superfícies seletivas solares, junto aos respectivos comprimentos de onda associados ao início da absorção espectral. A interpretação desses dados é fundamental para a seleção criteriosa de materiais para superfícies seletivas. Por exemplo, óxidos como TiO_2 e Cr_2O_3 apresentam *bandgaps* intermediários, o que os torna capazes de absorver parte da radiação visível e ao mesmo tempo reduzir perdas por emissão térmica. Já materiais como SiO_2 e Al_2O_3 , com *bandgaps* elevados, são ideais como camadas dielétricas antirreflexivas, pois são transparentes ao visível e ao infravermelho próximo, e resistentes à degradação térmica.

Tabela 4: Espaçamento entre bandas (E_g) e comprimento de onda (λ_g).

Óxidos metálicos	<i>Bandgap</i> (eV)	Comprimento de onda (λ_g)
Si	1,1	1127 nm
SiO_2	9,24	134 nm
TiO_2	2,04	608 nm
Al_2O_3	6,96	178 nm
NiO	3,86	321 nm
Cr_2O_3	2,58	481 nm
MoO_3	2,74	452 nm
Cu_2O	2,04	608 nm
CrO_3	2,25	551 nm

Fonte: Adaptado de Reddy *et al.* (1998), Fox (2010), Zhai *et al.* (2008)

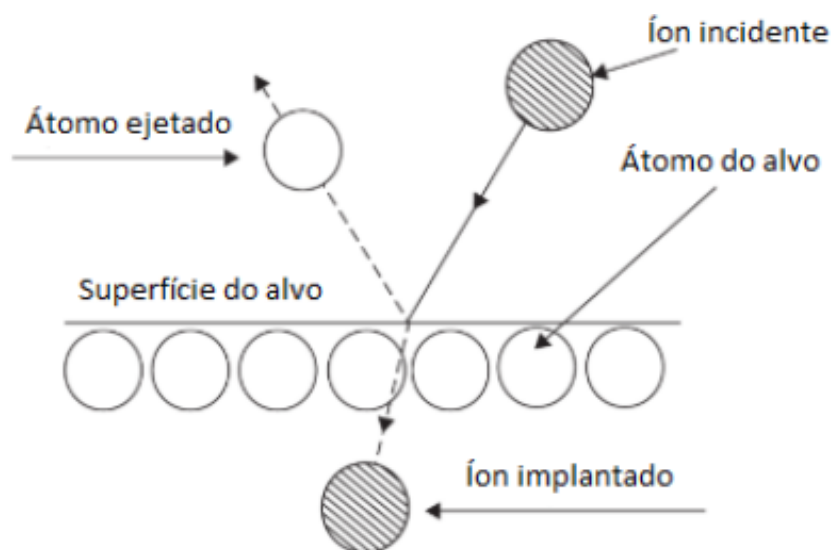
2.4 DEPOSIÇÃO VIA SPUTTERING

A eficiência e a durabilidade de superfícies seletivas solares dependem não apenas da escolha dos materiais, mas também da qualidade do processo de deposição utilizado para a formação dos filmes. As técnicas de deposição influenciam diretamente a aderência ao substrato, a espessura das camadas, a morfologia superficial, a porosidade, a estrutura cristalina e as propriedades ópticas e térmicas dos revestimentos (Selvakumar *et al.*, 2010; Barshilia *et al.*, 2008b).

O processo de *Sputtering* designa o mecanismo de ejeção de material de uma superfície, denominada de alvo, pelo bombardeamento de partículas com alta energia, projetando o material que é ejetado sobre o substrato e seu suporte, colocados em oposição à superfície bombardeada (Tatsch, 2000). Esses processos ocorrem geralmente em câmaras de vácuo, permitindo a deposição controlada de metais e óxidos. A baixa pressão reduz a interação com gases residuais, o que favorece a formação de filmes com boa pureza química e aderência controlada

(Cao; Hu, 2000; Yin *et al.*, 2009), ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Esquema do processo de Magnetron Sputtering.



Fonte: Adaptado de Wasa, Kanno & Kotera (2012).

O Magnetron Sputtering é a principal técnica utilizada neste trabalho, e uma das mais relevantes na indústria para a produção de filmes finos multicamadas, com excelente controle morfológico, ótima aderência e boa reprodutibilidade. Neste processo, um gás inerte (geralmente argônio) é introduzido em uma câmara de vácuo, onde um campo elétrico de alta tensão é aplicado entre o alvo e o substrato. Os átomos de argônio são ionizados e acelerados em direção ao alvo, ejetando átomos do material por impacto (sputtering), que se depositam sobre o substrato.

A introdução de um campo magnético próximo ao cátodo intensifica o plasma, aumentando a eficiência de ionização e, conseqüentemente, a taxa de deposição. Isso permite trabalhar com baixas pressões e baixas temperaturas, resultando em filmes com microestrutura densa e controlada (Teixeira *et al.*, 2001; Janicki *et al.*, 2012).

Considerando as principais vantagens do Magnetron Sputtering estão a deposição de materiais metálicos, cerâmicos e compósitos, excelente aderência ao substrato (mesmo metálico), espessura controlada na faixa de nanômetros, boa uniformidade e baixa rugosidade superficial (Silva Neto, 2017).

2.5 ESTABILIDADE TÉRMICA E ENVELHECIMENTO FOTOTÉRMICO

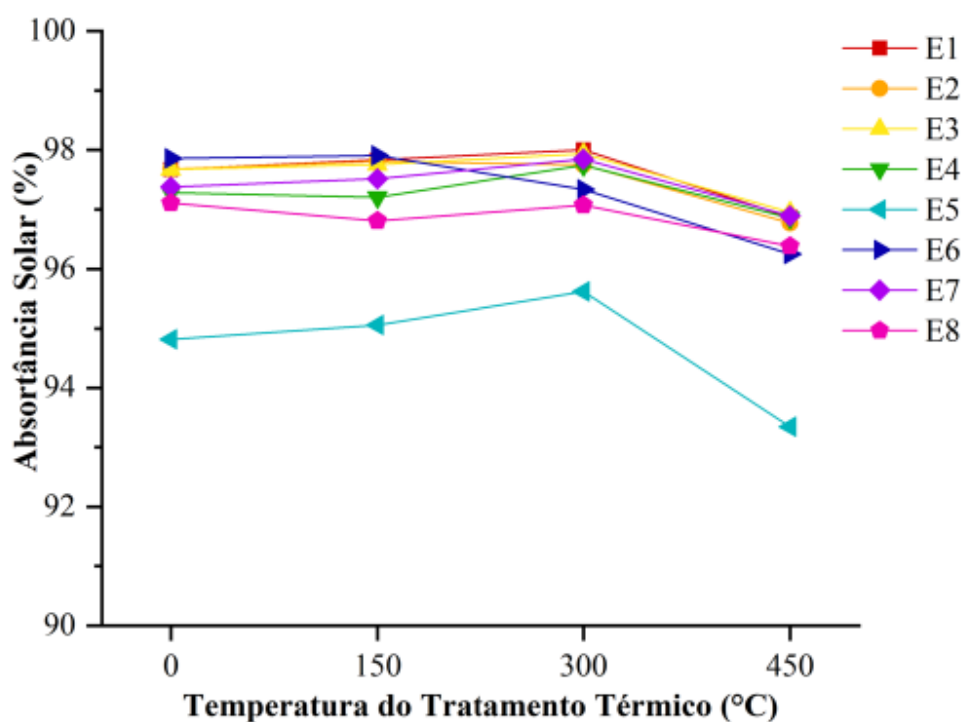
A estabilidade térmica e fototérmica das superfícies seletivas constitui um critério fundamental para a viabilidade de aplicações reais, uma vez que a exposição prolongada à radiação

solar submete os revestimentos a choques térmicos cíclicos e mecanismos de degradação que comprometem sua durabilidade e eficiência óptica ao longo do tempo (Boubault *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2023a; Zayed, 2024).

Nesse contexto, o desempenho desses materiais depende da resistência a processos como a foto-oxidação, difusão intercamadas e delaminação, fatores que permanecem como temas centrais de debate científico, especialmente diante de estudos recentes que identificaram falhas estruturais e perda de propriedades ópticas em curtos períodos de exposição operacional (Kumar *et al.*, 2024).

Conceitualmente, o envelhecimento térmico é caracterizado pela exposição das amostras a temperaturas elevadas, geralmente superiores a 100°C, o que desencadeia fenômenos como a oxidação superficial, o crescimento de grãos cristalinos e reações interfaciais em sistemas multicamadas (Kempe, 2008; Barshilia *et al.*, 2008b; Yang *et al.*, 2023a). Tais mecanismos de degradação são frequentemente mais severos em filmes metálicos puros, como o Cromo ou Molibdênio, devido à sua alta condutividade térmica e reduzida resistência à oxidação, embora o uso de barreiras dielétricas possa mitigar parcialmente esses danos (Cao *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2023). A Figura 7 apresenta espectros de absorção de superfícies de Cromo sob envelhecimento térmico.

Figura 7: Comportamento de filmes de cromo submetidos ao envelhecimento térmico.



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2020)

Complementarmente, o envelhecimento fototérmico ocorre pela ação simultânea da radiação ultravioleta (UV) e do aquecimento controlado, intensificando a degradação físico-química dos filmes finos. A radiação UV, particularmente na faixa de 280 a 400 nm, possui energia fônica suficiente para romper ligações químicas, promovendo efeitos fotodegradativos mesmo em materiais estáveis sob ação térmica isolada, como óxidos metálicos e dielétricos (Yang *et al.*, 2023a). Em consequência, surgem defeitos estruturais e modificações morfológicas, como vacâncias, intersticiais e alterações de rugosidade que afetam diretamente a absorvância solar e a emissividade térmica dos coletores (Liu *et al.*, 2024).

Para simular tais condições, a literatura preconiza o uso de ensaios de envelhecimento acelerado em estufas ou fornos, buscando estabelecer correlações entre o estresse térmico e a estabilidade dos revestimentos (Gonçalves, 2020; Valença, 2021; Gonçalves, 2021). Todavia, observa-se uma lacuna significativa em estudos que integrem radiação UV e aquecimento simultâneo em bancadas acessíveis, dificultando a reprodutibilidade das condições reais de operação (Jorgensen *et al.*, 2000; Asaad Yasseen; Istvan; Istvan, 2022). Historicamente, as bases para esses testes foram estabelecidas por estudos pioneiros como o de Pettit (1983), que quantificou a perda de absorvância em filmes de Cromo Negro submetidos a altas temperaturas, e pelo trabalho da Agência Internacional de Energia Solar (IEA-SHCP), que documentou limitações metodológicas em ensaios de vida acelerada (Carlsson *et al.*, 1994).

Esses esforços culminaram na normalização internacional, inicialmente via *Draft Proposal* ISO/CD 12952,2 (1997) e, posteriormente, pela validação da norma ISO 22975-3 (2014). Com base nestes parâmetros, Brunold *et al.* (2000) sistematizou a análise da estabilidade térmica através do Critério de Desempenho (PC), que avalia a variação da absorvância e da emitância para qualificar superfícies com vida útil estimada de 25 anos (Hollands *et al.*, 1992), conforme Eq. (8).

$$PC = -\Delta\alpha_{sol} + 0,25\Delta\varepsilon_{sol} \quad (8)$$

Conforme o protocolo, a qualificação exige que o valor de PC seja inferior a 5%, sendo a amostra submetida a ciclos sequenciais de temperatura, resistência à umidade e estresse térmico prolongado. Na impossibilidade técnica de aferir a emitância para o cálculo do PC, a literatura técnica de Raccurt *et al.* (2015) estabelece como alternativa viável o cálculo da variação absoluta da absorvância solar, segundo a Eq. (9).

$$\Delta_{\alpha} = \alpha_{sol}(t) - \alpha_{sol}(0) \quad (9)$$

Dessa forma, o entendimento integrado dos mecanismos térmicos e fotoquímicos revela-se essencial para o desenvolvimento de revestimentos robustos, fortalecendo a necessidade de dispositivos experimentais que permitam validar a durabilidade fototérmica de novas superfícies seletivas de maneira eficaz e reprodutível.

2.6 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica é uma ferramenta essencial para avaliar a evolução e as tendências da produção científica em determinado campo do conhecimento. Por meio de indicadores quantitativos, é possível identificar padrões de publicação, palavras-chave recorrentes, autores influentes, fontes mais citadas e redes de colaboração entre países e instituições (Van Eck; Waltman, 2010; Aria; Cuccurullo, 2017).

Neste sentido, a análise bibliométrica consistiu na busca por documentos científicos referentes à superfícies seletivas solares e envelhecimento, a fim de identificar lacunas, tendências emergentes e potenciais nichos para inovação técnica. Devido a baixa quantidade de documentos, a escala temporal foi deixada em aberto para análise cronológica dos artigos.

A sistematização da pesquisa foi conduzida a partir de termos diretamente relacionados ao tema deste trabalho, utilizando como base de dados a Coleção Principal da *Web of Science*. Os critérios da busca foi baseado na funcionalidade "topic", que pesquisa título, resumo, palavra-chave plus e palavras-chave do autor.

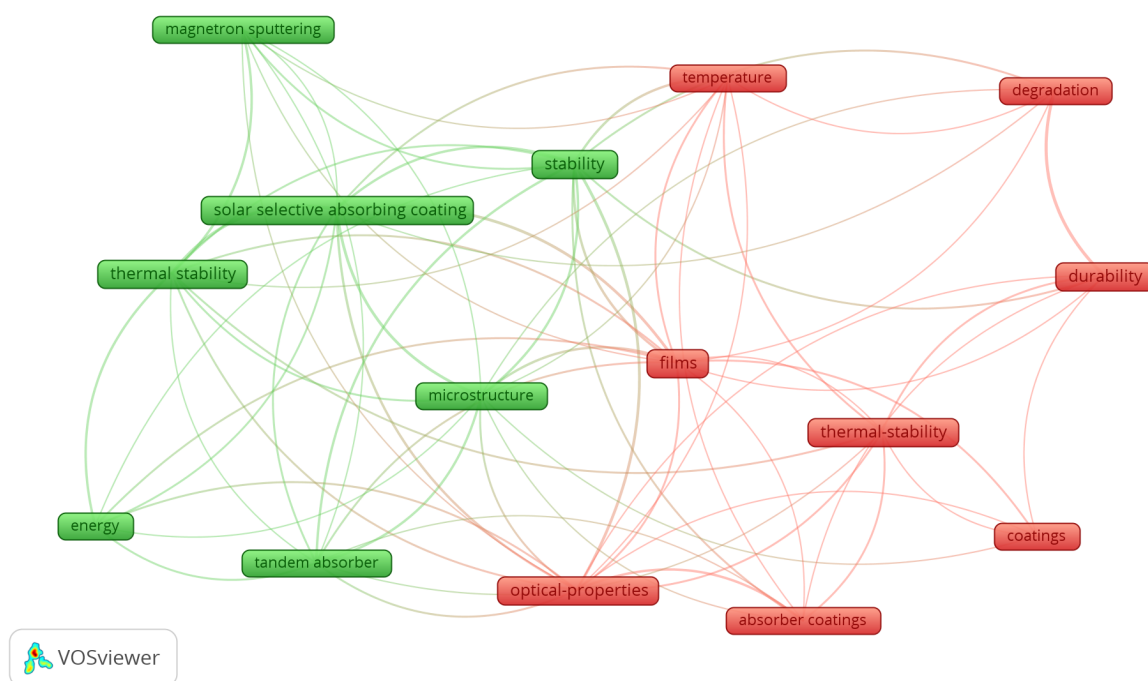
Foram empregados os descritores “selective surface” e “absorbing coating”, conectados pelo operador booleano OR, por representarem de forma abrangente e significativa o conjunto de estudos voltados ao desenvolvimento e caracterização de superfícies seletivas solares. Os termos “aging” e “uv test” foram adicionados à query por meio do conector booleano OR, com o objetivo de refinar a busca e ampliar a identificação de estudos que abordam o envelhecimento e os ensaios de degradação sob radiação ultravioleta em superfícies seletivas solares.

Aplicando o filtro de seleção por tipo de documento "artigo" e "artigo de revisão", foram identificados 59 registros ao longo dos anos. Optou-se por não estabelecer um recorte temporal, em razão do reduzido número de publicações encontradas, de modo a abranger todo o histórico de pesquisas relevantes relacionadas ao tema.

O registro completo e as respectivas referências citadas foram exportados para uma planilha eletrônica e, em seguida, importados para o software *VOSviewer*, utilizado para a geração dos mapas bibliométricos e de co-ocorrência, abrangendo palavras-chave, coautoria e redes de colaboração científica.

A Figura 8 representa a rede de co-ocorrência de palavras-chave, que evidencia as principais conexões temáticas entre os estudos sobre revestimentos seletivos solares. Para a geração do mapa, estabeleceu-se 5 como número mínimo de ocorrências de palavra-chave. A Figura também evidencia a presença de dois clusters representado por diferentes cores que indicam agrupamentos temáticos distintos que revelam linhas de pesquisas que geralmente são citadas em conjunto.

Figura 8: Mapa de co-ocorrência de palavras-chaves.



Fonte: Autor (2026)

O cluster verde reúne termos como *magnetron sputtering* (6 ocorrências), *solar selective absorbing coating* (8), *thermal stability* (11), *microstructure* (6) e *energy* (5), associado à abordagem experimental e de fabricação dos revestimentos seletivos. O termo de maior destaque, *thermal stability*, indica estudos sobre superfícies seletivas se concentrado principalmente na estabilidade térmica e nas propriedades ópticas dos revestimentos, aspectos fundamentais para o aprimoramento do desempenho e da durabilidade desses materiais (Wang *et al.*, 2018).

O termo *tandem absorber* evidencia uma tendência de pesquisa voltada ao desenvolvimento de revestimentos seletivos multicamadas capazes de otimizar simultaneamente a absorção solar e a estabilidade térmica. Nesse contexto, Wu *et al.* (2015) investigaram a substituição das camadas NbTiN e NbTiON por NbTiSiN e NbTiSiON, visando aprimorar a estabilidade térmica de um revestimento seletivo multicamadas Al/NbTiN/NbTiON/SiO₂, submetido a envelhecimento térmico a 500 °C por 2 h.

De modo semelhante, Liu, Sun & Wang (2018) projetaram e caracterizaram um revestimento seletivo à base de oxinitreto de cromo (Cr/CrN_x//CrN_xO_y), com camada antirreflexiva de SiO₂. Após o teste de envelhecimento ao ar a 250 °C por 200 h, o critério de desempenho (PC) permaneceu abaixo de 1%, evidenciando a elevada estabilidade térmica do sistema.

O cluster vermelho, que envolve termos como *temperature* (6), *degradation* (6), *durability* (11), *films* (10), *optical properties* (12) e *thermal-stability* (9), concentra-se na avaliação do desempenho e degradação dos revestimentos sob condições térmicas e ambientais. O termo *optical-properties*, com maior número de co-ocorrências, apresenta foco nas pesquisas que buscam aperfeiçoamento das propriedades óticas dos revestimentos solares.

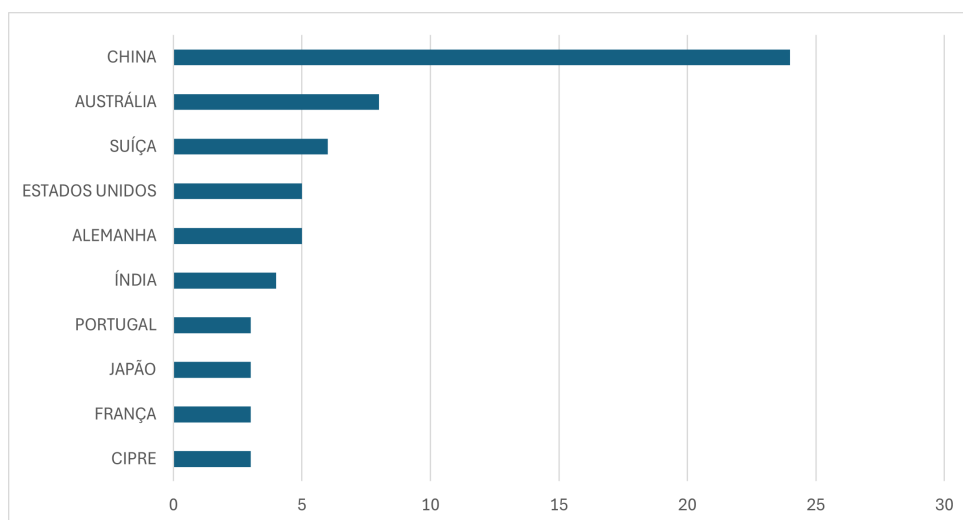
Os resultados da pesquisa de Liu *et al.* (2021) alcançaram um aumento notável das propriedades óticas, como absorção solar superior a 0,97, afetando diferentes níveis de estabilidade térmica para aplicações de baixa, média ou preferencialmente alta temperatura. Ao mesmo tempo, observa-se que os nanomateriais ZnO, SiO₂, CuO, Al₂O₃ e derivados de carbono aplicados em substratos de cobre, silício, SiO₂, alumínio e aço inoxidável são a combinação promissora mais aplicável de vários tipos de revestimentos absorvedores seletivos à base de nanomateriais para aplicação em energia solar.

O termo *degradation*, identificado com seis ocorrências, abrange diferentes mecanismos que podem afetar filmes finos. Entre eles, destaca-se a corrosão, que embora não apareça diretamente associada aos demais termos, representa um processo relevante de deterioração desses materiais. Liu *et al.* (2014) relacionam a corrosão a mecanismos de envelhecimento, uma vez que ela pode atuar de forma progressiva sob condições ambientais específicas. Estudos anteriores indicam que esse tipo de degradação compromete significativamente a durabilidade e o desempenho óptico das superfícies seletivas, evidenciando sua importância nas análises de estabilidade dos revestimentos (Yu *et al.*, 2021).

A Figura 9 apresenta a quantidade de citações por país. Verifica-se que a China lidera as publicações com citações relevantes, seguido de Austrália e Suíça. Os Estados Unidos apa-

recem na quarta posição mais relevantes rede de colaboração entre os autores identificados na pesquisa, evidenciando as conexões e parcerias estabelecidas entre diferentes grupos de estudo e instituições.

Figura 9: Quantidade de citações por país.



Fonte: Autor (2026)

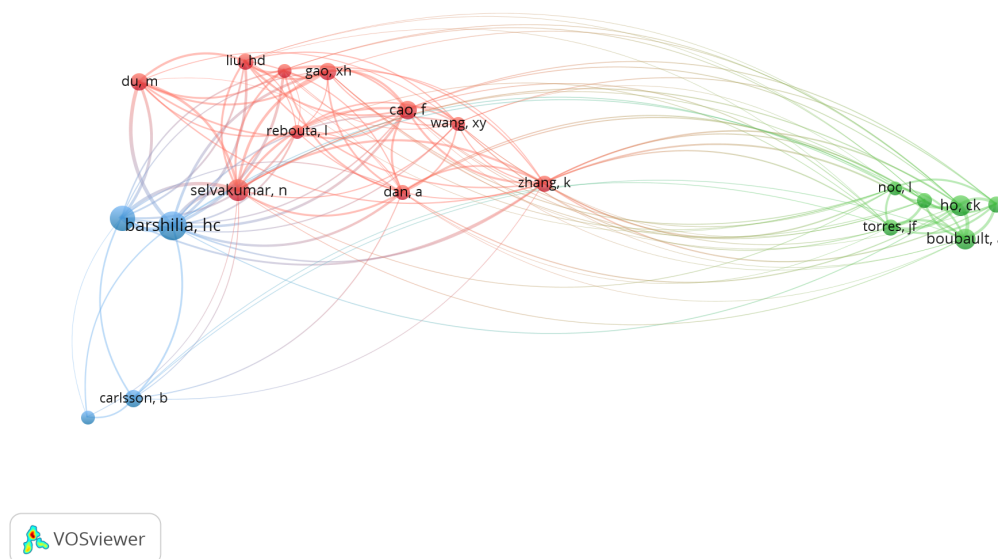
A Figura 10 apresenta o mapa de rede de colaboração entre autores. Para a formação dos agrupamentos, estabeleceu-se um mínimo de 10 ocorrências por autor. A análise resultou na identificação de 3 clusters distintos, representando os principais núcleos de cooperação científica no tema.

O cluster azul apresenta como principais autores co-citados Barshilia H. C. e Zhang Q. C., cujos trabalhos concentram-se no desenvolvimento de novos materiais depositados por técnicas de deposição física (PVD). No cluster vermelho, destacam-se Selvakumar N. e Cao F., que abordam temas relacionados à deposição PVD e *magnetron sputtering*, bem como às propriedades ópticas e à estabilidade térmica dos revestimentos. Por fim, o cluster verde evidencia como principais autores co-citados Boubault A. e Ho C. K., cuja produção científica se volta à investigação de materiais seletivos, degradação em altas temperaturas e estabilidade térmica. Observa-se que as linhas de pesquisa apresentam forte inter-relação temática, diferindo principalmente quanto às abordagens experimentais e metodológicas adotadas.

O desempenho a longo prazo das superfícies seletivas solares depende fortemente de sua capacidade de resistir aos efeitos combinados da radiação ultravioleta (UV), altas temperaturas e umidade. Para investigar tais efeitos em condições controladas, alguns estudos tem buscado o desenvolvimento de bancadas experimentais para simular a exposição à radiação e ensaios de envelhecimento acelerado, especialmente térmico UV isolado (Köhl *et al.*, 1989; Jorgensen *et*

al., 2000; Kempe, 2008; Vieira, 2011).

Figura 10: Mapa de rede de co-citação de autores.



Fonte: Autor (2026)

Em sua maioria, os dispositivos empregados em grandes laboratórios são projetados para expor amostras de revestimentos seletivos a temperaturas elevadas por meio de resistências elétricas ou placas aquecidas, com ou sem irradiação luminosa. No entanto, existem alternativas para a simulação do espectro solar, através de Câmaras comerciais UV com lâmpadas fluorescentes ou xenônio, embora nem sempre com controle adequado sobre o espectro incidente, especialmente nas faixas do infravermelho e ultravioleta e nem sempre correspondem à radiação solar real (Asaad Yasseen; Istvan; Istvan, 2022; Yang *et al.*, 2023a; Liu *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2024).

Além disso, estudos como o de Hardcastle, Jorgensen & Bingham (2010) propõem o uso de simuladores solares com filtros ópticos para modulação espectral. No entanto, a alta complexidade e custo desses sistemas limitam sua replicação em ambientes de pesquisa de pequeno e médio porte. A maioria dos protocolos existentes, conforme observado por Köhl *et al.* (1989), não fornece diretrizes padronizadas quanto ao tempo de exposição, taxa de aquecimento e ciclo térmico associado à exposição UV.

Como tentativa de preencher a lacuna metodológica nos ensaios de durabilidade, Gomes (2001) desenvolveu uma caixa coletora para exposição de revestimentos em condições de campo. Posteriormente, este conceito foi aperfeiçoado por Pinho *et al.* (2020), Araújo *et al.*

(2021) e Dutra *et al.* (2022), que mantiveram mecanismos similares de monitoramento, utilizando isolamento térmico de lã de vidro, termopares tipo K e sistemas de *datalogger* para a aquisição de dados térmicos (Figura 11).

Figura 11: Bancada experimental em madeira para testes de campo.



Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2021)

Embora tais ensaios possuam elevado valor prático por simularem o ambiente de operação real, eles apresentam limitações críticas decorrentes da variabilidade ambiental, como a intermitência de nuvens, variações de umidade, chuvas sazonais e acúmulo de poeira. Essas condições incontroláveis dificultam a reprodutibilidade dos resultados e exigem longos períodos de exposição para a obtenção de dados conclusivos sobre a degradação dos filmes.

Nesse cenário, a transição para sistemas controlados em laboratório torna-se imperativa, permitindo a dissociação dos agentes degradadores e a aceleração dos mecanismos de envelhecimento fototérmico de forma sistemática. Tal necessidade fundamenta o desenvolvimento do protótipo experimental proposto neste trabalho, que visa superar a dependência das condições climáticas locais e garantir a precisão na estimativa da vida útil de novas superfícies seletivas.

2.7 CONSIDERAÇÕES DO REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo apresentou os fundamentos teóricos necessários para compreender o funcionamento e os desafios associados às superfícies seletivas solares utilizadas em sistemas de aquecimento térmico por radiação solar. Ao longo das seções, foram discutidos os princípios físicos da radiação eletromagnética, a relação entre estrutura atômica dos materiais e seu comportamento óptico, a importância do *bandgap* na absorção seletiva, bem como as principais técnicas de deposição empregadas na fabricação desses revestimentos.

Verificou-se que a eficiência de uma superfície seletiva está diretamente associada à sua capacidade de absorver radiação solar no espectro de 0,3 a $2,5\mu\text{m}$ e de minimizar a emissão térmica acima de $2,5\mu\text{m}$, sendo esta seletividade espectral dependente tanto da natureza eletrônica dos materiais utilizados quanto da arquitetura multicamada adotada.

A análise das categorias de superfícies seletivas demonstrou que os revestimentos multicamadas e compósitos oferecem as melhores perspectivas em termos de desempenho e estabilidade térmica. No entanto, os mecanismos de degradação térmica e fototérmica ainda representam barreiras importantes à aplicação de longo prazo desses revestimentos, especialmente em condições reais de operação, onde a radiação UV, a oxidação e a ciclagem térmica atuam simultaneamente.

Além disso, observou-se que, embora existam diversas técnicas de deposição para filmes finos, o Magnetron Sputtering destaca-se por sua capacidade de produzir revestimentos com alta aderência, espessura controlada e microestrutura ajustável — fatores essenciais para a engenharia de superfícies seletivas de alta durabilidade.

A análise bibliométrica revelou uma lacuna técnica relevante no tocante a escassez de dispositivos acessíveis que permitam avaliar, de forma simultânea e controlada, os efeitos do envelhecimento térmico e da radiação UV sobre as propriedades ópticas e morfológicas dos revestimentos seletivos. Essa carência justifica a necessidade de desenvolvimento de uma bancada experimental dedicada, capaz de simular condições ambientais críticas e contribuir para a avaliação da estabilidade de novos materiais seletivos.

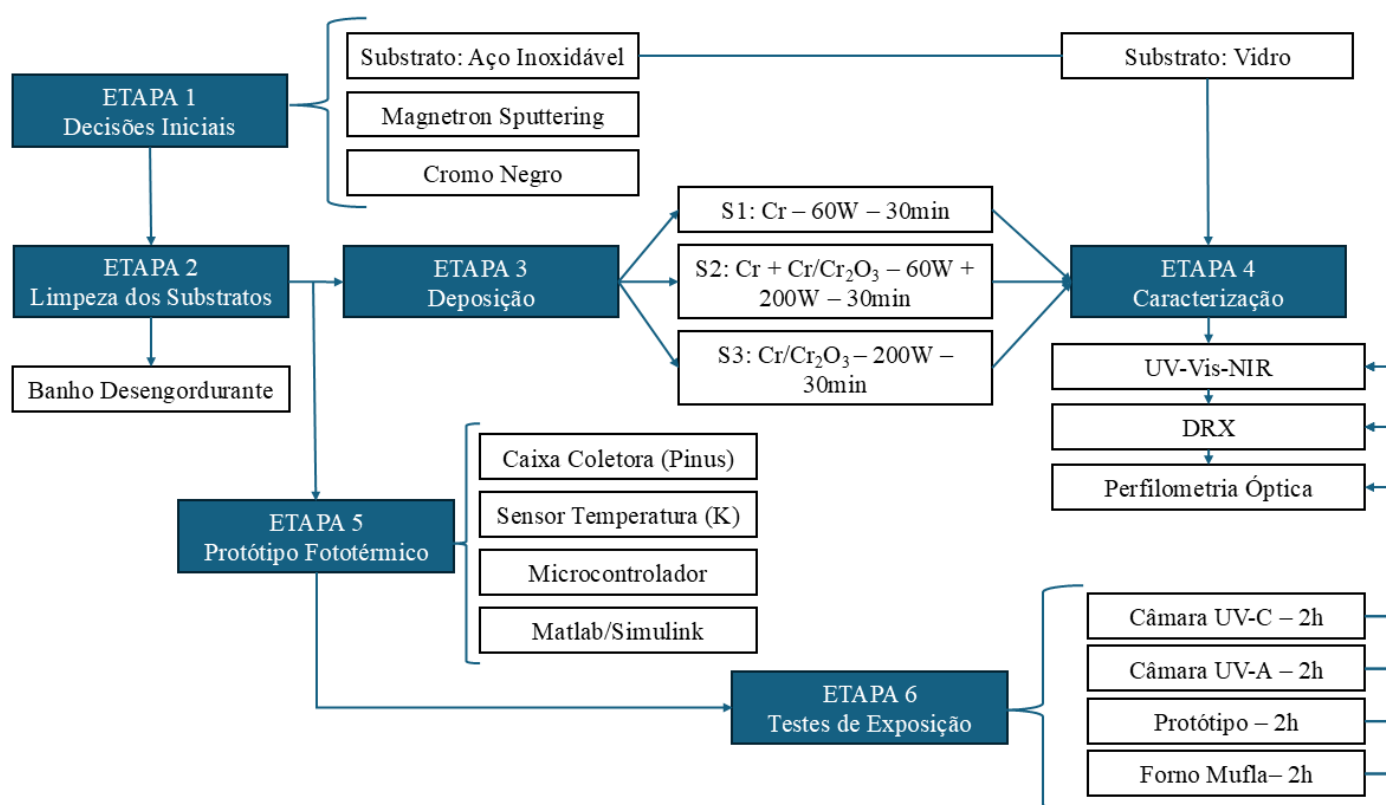
CAPÍTULO III

METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho compreendeu os procedimentos utilizados para a preparação, deposição e caracterização físico-química das superfícies seletivas à base de Cr e Cr/Cr₂O₃. As etapas desta pesquisa consistiram na seleção e preparação dos substratos, na definição da técnica e dos parâmetros de deposição dos revestimentos, bem como no estabelecimento dos critérios para os testes de envelhecimento térmico. Adicionalmente, realizou-se a construção de um protótipo para ensaios fototérmicos e a completa caracterização físico-química dos revestimentos obtidos.

A Figura 12 apresenta de forma sistemática o planejamento experimental realizado para que os objetivos propostos fossem atingidos.

Figura 12: Fluxograma Experimental da Pesquisa.



Fonte: Autor (2026)

3.1 DEPOSIÇÃO DOS FILMES

3.1.1 Escolha e Preparação dos Substratos

A primeira etapa desta pesquisa consistiu na seleção do substrato para a deposição dos filmes. Optou-se pelo aço inoxidável AISI 304, fundamentando-se em estudos prévios que demonstraram sua adequação para processos de tratamento de superfície e deposição de filmes finos (Valença, 2021). A escolha justificou-se, também, pela elevada resistência à corrosão e pela estabilidade térmica do material sob condições severas de operação. Este tipo de aço é composto por 18–20% de Cr, 8–10% de Ni e o restante de Fe (Wu *et al.*, 2016).

O processo de limpeza dos substratos de aço inoxidável seguiu a metodologia utilizada por Galvão (2022), na qual foi empregada a limpeza com desengordurante comercial e álcool isopropílico, seguida de secagem em temperatura ambiente. Os substratos de aço inoxidável foram dimensionados no formato de placas de 30 mm × 30 mm. Utilizaram-se, também, substratos de vidro do tipo lâminas (75 mm × 25 mm); para estes, não se considerou necessária a mesma metodologia de limpeza rigorosa devido ao seu bom acondicionamento original, o que reduziu o risco de contaminação.

3.1.2 Deposição por pulverização catódica *Magnetron Sputtering*

A deposição das superfícies foi realizada através de um sistema *Magnetron Sputtering* modelo ATC ORION 5 da fabricante AJA International Inc. (Figura 13), localizado nas dependências do Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da UFPB.

Como matéria-prima para o processo de deposição, foram utilizados dois tipos de alvos, conforme descrito na Tabela 5. A escolha desses alvos foi fundamentada na literatura, que aponta o sistema Cr/Cr₂O₃ como um dos mais promissores para superfícies seletivas multicamadas, devido à sua alta seletividade espectral e boa estabilidade térmica (Selvakumar *et al.*, 2010; Jafari; Rozati, 2011; Janicki *et al.*, 2012).

O procedimento experimental de operação iniciou com o posicionamento dos substratos na câmara. A bomba de vácuo foi acionada atingindo o seu funcionamento pleno (1000 Hz), à uma pressão inicial de 1×10^{-5} Torr. Em seguida é realizada a liberação do gás (Argônio) e acionamento da fonte para iniciar a formação do plasma nos canhões. Para o alvo de Cermet a

formação do plasma se deu a uma pressão de 5×10^{-2} Torr e potência de 19 W. Já os alvos de Cromo, a formação do plasma ocorreu com $9,78 \times 10^{-2}$ Torr e potência 18 W. A pressão em todos os processos de deposição variou aproximadamente entre $5,48 \times 10^{-3}$ Torr e $5,70 \times 10^{-3}$ Torr.

Tabela 5: Especificações comerciais dos alvos utilizados.

Alvo	Fabricante	Pureza (%)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
Cr	Kurt J. Lesker	99,95	50,8	3,175
Cr/Cr ₂ O ₃	Macashew Tecnologias LTDA	99,95	50,8	3,5

Fonte: Autor (2026)

Para o alvo de Cromo foi empregada uma potência de 60 W e para o alvo de Cermet empregou-se potência de 200 W, ambos com tempo de deposição de 30 min. Os substratos foram posicionados no porta-amostra e fixados a uma distância de 106 mm do alvo, sendo aplicada velocidade de rotação de 15 RPM visando garantir homogeneidade e uniformidade no processo de deposição.

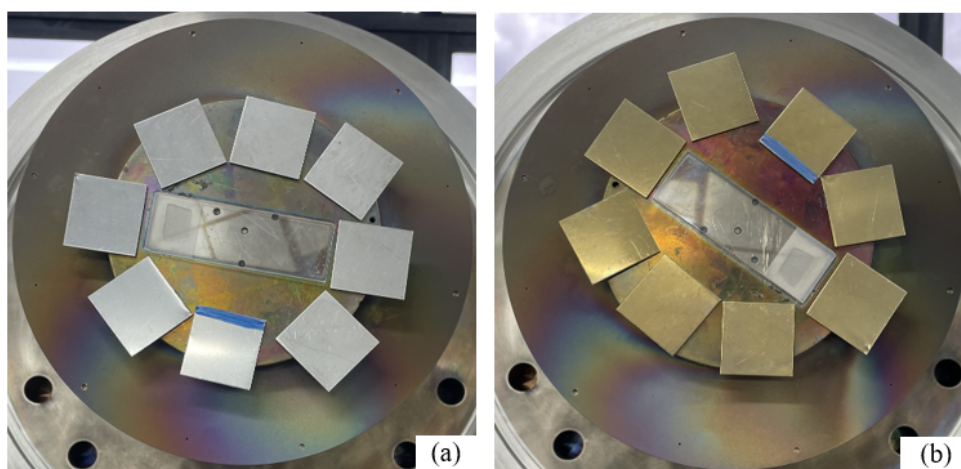
Figura 13: Equipamento de um Sistema *Sputtering*.



Fonte: Autor (2026)

O processo de deposição foi realizado em triplicata, utilizando-se 9 substratos, sendo 8 metálicos e 1 de vidro, conforme apresentado na Figura 14.

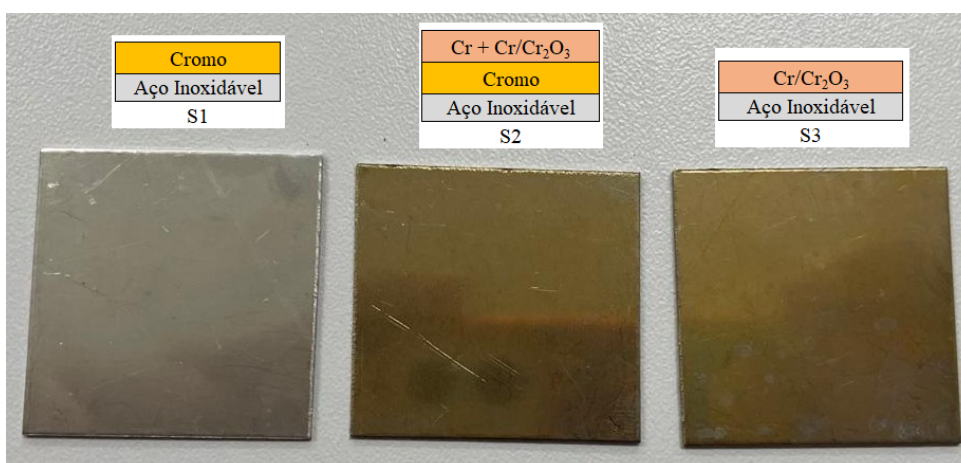
Figura 14: Substratos dispostos no porta-amostra antes da deposição (a); filmes depositados (b).



Fonte: Autor (2026)

Os filmes foram agrupados de acordo com cada configuração: Cromo (S1), Cromo + Cermet (S2) e Cermet (S3), conforme esquematizado na Figura 15. Os parâmetros de deposição utilizados, as nomenclaturas para identificação e a arquitetura dos filmes produzidos foram apresentados na Tabela 6. Como forma de facilitar os testes e as caracterizações, os filmes depositados sobre substrato de aço inoxidável foram submetidos às caracterizações óptica e morfológica. Já os filmes depositados sobre substrato de vidro foram submetidos às análises por difração de raios-X.

Figura 15: Configuração das superfícies adotadas na pesquisa.



Fonte: Autor (2026)

Para estimar a espessura dos filmes depositados, empregou-se inicialmente a técnica de batente, na qual uma marcação é realizada no substrato para gerar uma descontinuidade física entre a superfície recoberta e a região sem deposição, permitindo a medição direta da diferença

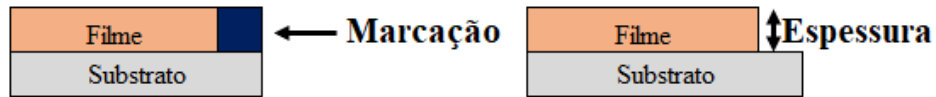
de altura Figura 16.

Tabela 6: Parâmetro de deposição e classificação das amostras.

Nomenclatura	Configuração	Potência (W)		Tempo de Deposição (min)
		Cr	Cr/Cr ₂ O ₃	
S1	Cr	60	–	30
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	60	200	30 + 30
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	–	200	30

Fonte: Autor (2026)

Figura 16: Marcação do batente para analisar espessura.



Fonte: Autor (2026)

Complementarmente, a espessura dos filmes foi estimada de forma indireta por meio de um modelo matemático fundamentado nos espectros de reflectância. Inicialmente, determinou-se o índice de refração (n) seguindo o procedimento adaptado por Sousa *et al.* (2024). Posteriormente, calculou-se a espessura do filme (t) com base na metodologia de Swanepoel (1983), que utiliza os envelopes superior (R_M) e inferior (R_m) da curva de reflectância para isolar as franjas de interferência. Aplicando esses parâmetros às Eq. (10) e Eq. (11), obteve-se uma estimativa óptica consistente da espessura física dos revestimentos:

$$n = \frac{2 + 2R + \sqrt{-\frac{(-3+(6+R)R)(-1+3R(2+R))}{(1+R)^2}}}{2 - 2R} \quad (10)$$

onde R representa a reflectância resultante dos envelopes de interferência.

$$t = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (11)$$

onde λ_1 e λ_2 são comprimentos de onda de picos adjacentes, e n_1 e n_2 são os respectivos índices de refração calculados para esses pontos.

3.2 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS FOTOTÉRMICOS

Para simular o envelhecimento fototérmico em condições controladas, desenvolveu-se um protótipo experimental de estrutura modular e baixo custo. O sistema foi projetado para permitir o controle independente das fontes de radiação, o monitoramento térmico em tempo real e a exportação de dados para análise de degradação.

A idealização da construção do protótipo ocorreu devido à necessidade de um dispositivo que pudesse simular o ambiente real de aplicação das superfícies seletivas (Kizildag *et al.*, 2022). A inspiração para o desenvolvimento conceitual da bancada teve como referência trabalhos da literatura que desenvolveram sistemas experimentais para a avaliação de revestimentos seletivos sob radiação solar natural (Gomes, 2001; Vieira, 2011).

A estrutura física foi confeccionada em madeira do tipo Pinus (espessura de 2 cm), escolhida pela viabilidade técnica e facilidade de usinagem. O interior do dispositivo foi revestido com superfícies refletoras (papel alumínio) para otimizar a distribuição da radiação incidente através de múltiplas reflexões, o que garantiu um ambiente radiativo mais homogêneo e minimizou zonas de sombra sobre as amostras.

As fontes de radiação utilizadas consistiram em quatro lâmpadas halógenas dicróicas (50 W/200 V) que emitem radiação infravermelha e calor. Essas lâmpadas possuem um IRC (Índice de Reprodução de Cor) igual a 100, considerado o nível mais alto e equivalente à luz do sol (Feldman, 2014). Para viabilizar a mobilidade e o direcionamento individual, o conjunto foi montado em um trilho eletrificado em PVC, onde cada lâmpada ocupou seu respectivo conector (slot), assegurando a uniformidade da radiação incidente, conforme apresentado na Figura 17.

A instalação elétrica foi projetada para permitir o acionamento individual de cada lâmpada por meio de chaves liga/desliga. Esse arranjo possibilitou que o sistema operasse em diferentes regimes de intensidade: baixa (uma ou duas lâmpadas), média (três lâmpadas) e alta (quatro lâmpadas simultâneas). Tal estratégia permitiu a modulação da carga fototérmica aplicada às amostras durante os ensaios.

O monitoramento térmico foi realizado por termopares do tipo K, integrados ao módulo MAX6675 para conversão analógico-digital (Silva; Freitas, 2018). A aquisição de dados foi centralizada em um microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, que operou em interface com o ambiente MATLAB/Simulink. Esta configuração permitiu a leitura simultânea de múltiplos sensores, a geração automatizada de curvas de temperatura e o armazenamento dos dados em

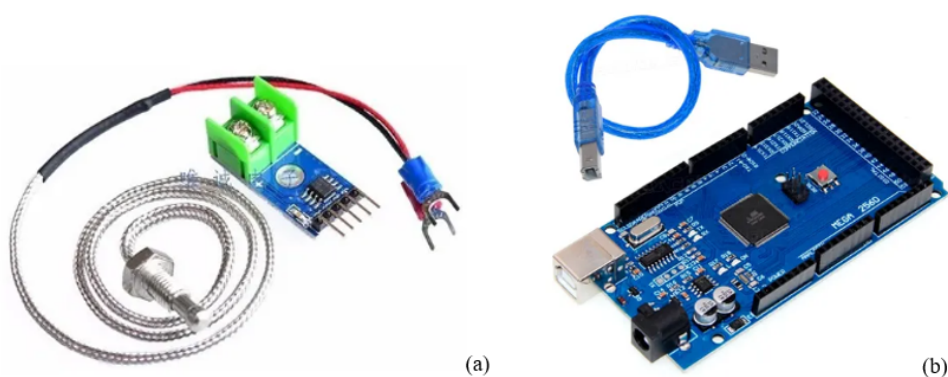
formato estruturado (.xlsx), o que conferiu rigor e repetibilidade ao processo de validação. Esses componentes foram apresentados na Figura 18.

Figura 17: Vista interna do sistema de iluminação do protótipo.



Fonte: Autor (2026)

Figura 18: Módulo MAX6675 + Termopar Tipo K (a) e Arduino Mega (b).



Fonte: Autor (2026)

3.2.1 FilmTAS: Sistema de Monitoramento e Aquisição de Dados de Temperatura

Para a viabilização dos ensaios de envelhecimento fototérmico, desenvolveu-se o software FilmTAS (Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura Aplicado a Filmes Finos),

devidamente registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). O sistema compreende desde a interface física de sensoriamento até o processamento em ambiente de supervisão, garantindo o rigor e a repetibilidade necessária à validação dos resultados.

O monitoramento térmico baseia-se na utilização do módulo MAX6675, que atua como um conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits com compensação de junção fria. Este componente é responsável por transformar o sinal de tensão gerado pelo termopar tipo K em uma representação digital com resolução de 0,25 °C. A comunicação entre o microcontrolador Arduino e o módulo MAX6675 é realizada via protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), empregando três linhas principais:

- SCK (Serial Clock): responsável pela sincronização da transferência;
- CS (Chip Select): utilizada para habilitar o módulo durante a leitura;
- SO (Serial Out): transmitir os bits de saída referentes ao valor de temperatura convertido.

No ambiente de programação do microcontrolador (Arduino IDE), foi integrada a biblioteca *MAX6675.h* para gerenciar essa comunicação, utilizando o método *readCelsius()* para a captura direta dos valores. Os dados resultantes são armazenados em variáveis do tipo *double*, assegurando a precisão necessária para a análise de variações térmicas sutis.

Após a aquisição local, o FilmTAS realiza a transmissão dos valores ao computador hospedeiro por meio da interface UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) utilizando a função *Serial.println()*. No ambiente de supervisão MATLAB/Simulink (versão R2021), os dados são extraídos pelo bloco *Serial Receive*, que interpreta os caracteres recebidos e os reconverte para o tipo de dado *double*, garantindo a compatibilidade com as rotinas de processamento.

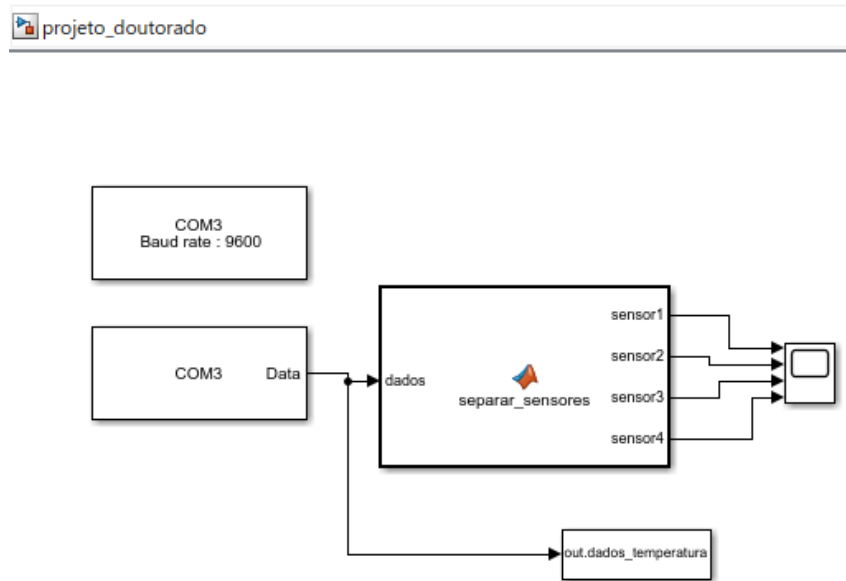
A Figura 19 apresenta o diagrama de blocos desenvolvido no Simulink para a lógica do FilmTAS. O bloco de comunicação serial realiza a interface de entrada, enquanto o subsistema *separar_sensores* distribui os valores individuais de cada sensor. Os sinais resultantes são simultaneamente direcionados aos blocos de visualização em tempo real e aos blocos de saída para exportação.

Em suma, a estrutura lógica do código desenvolvido permitiu as seguintes funcionalidades integradas:

- Leitura simultânea de múltiplos sensores de temperatura;
- Comunicação serial estável entre hardware e computador;

- Geração de gráficos comparativos em tempo real (.png);
- Exportação automática dos dados estruturados para planilhas (.xlsx).

Figura 19: Diagrama de blocos do software FilmTAS desenvolvido no Simulink para aquisição e processamento.



Fonte: Autor (2026)

Diante da flexibilidade do FilmTAS, diferentes configurações de monitoramento podem ser realizadas conforme o arranjo físico do protótipo. A Tabela 7 detalha o posicionamento dos sensores utilizado nas rodadas de teste, permitindo mapear o comportamento da radiação interna e a estabilidade térmica das amostras.

Tabela 7: Posicionamento dos sensores para captação da temperatura no protótipo.

Sensor	Finalidade
Sensor 1	Temperatura da amostra (Slot 1)
Sensor 2	Temperatura da amostra (Slot 2)
Sensor 3	Temperatura da amostra (Slot 3)
Sensor 4	Temperatura interna do dispositivo (Ar)

Fonte: Autor (2026)

3.3 CÂMARA COMERCIAL DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Além do protótipo desenvolvido, também foi empregada um dispositivo comercial do tipo Câmara Escura Ultravioleta modelo SP-204 fornecido pela empresa SPLabor (Figura 20).

Esse modelo é equipado com duas fontes de radiação ultravioleta. A primeira fonte é composta por lâmpadas germicidas do tipo UV-C ($\lambda = 254 \text{ nm}$) que emitem radiação de alta energia, capaz de induzir reações de quebra de ligações químicas e promover degradação acelerada em superfícies poliméricas e revestimentos finos (Medeiros, 2023).

Figura 20: Dispositivo comercial do tipo Câmara Escura Ultravioleta.



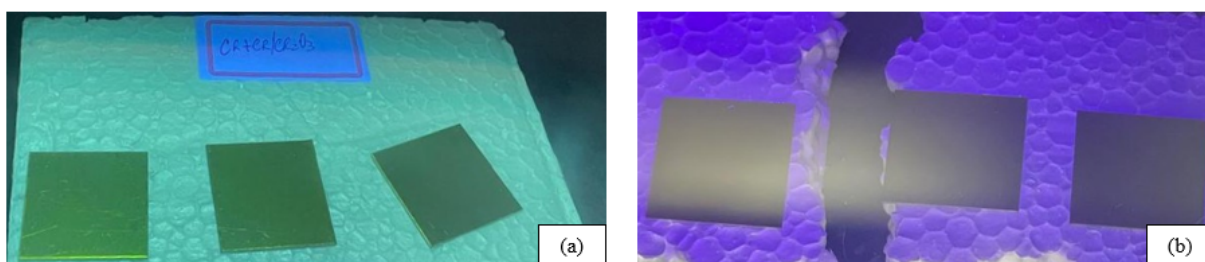
Fonte: Autor (2026)

A segunda fonte é composta por lâmpadas do tipo UV-A ($\lambda = 365 \text{ nm}$) que simulam a faixa de radiação mais próxima da exposição solar natural, sendo relevantes para análise da durabilidade de filmes seletivos em condições mais próximas do uso real (Romanhole, 2024). Diferentemente do protótipo desenvolvido, o dispositivo não dispõe de monitoramento térmico ativo volvido está na emissão térmica das lâmpadas ultravioleta, ou seja, a temperatura não é um fator relevante para o mecanismo de funcionamento desse equipamento.

As amostras foram posicionadas sobre plataformas em isopor e ajustadas na bandeja interna do equipamento, respeitando a distância fixa em relação às lâmpadas, de modo a garantir uniformidade da irradiância em toda a superfície exposta, conforme Figura 21. O tempo de exposição em ambas câmaras foi de 2h.

Portanto, o dispositivo comercial juntamente com o protótipo complementa os ensaios de cunho fototérmico, fornecendo condições experimentais padronizadas e comparáveis, além de ampliar a análise do desempenho dos filmes seletivos sob diferentes regimes de radiação ultravioleta, visível e infravermelho.

Figura 21: Exposição das amostras na Câmara Ultravioleta: radiação UV-C (a) e radiação UV-A (b).

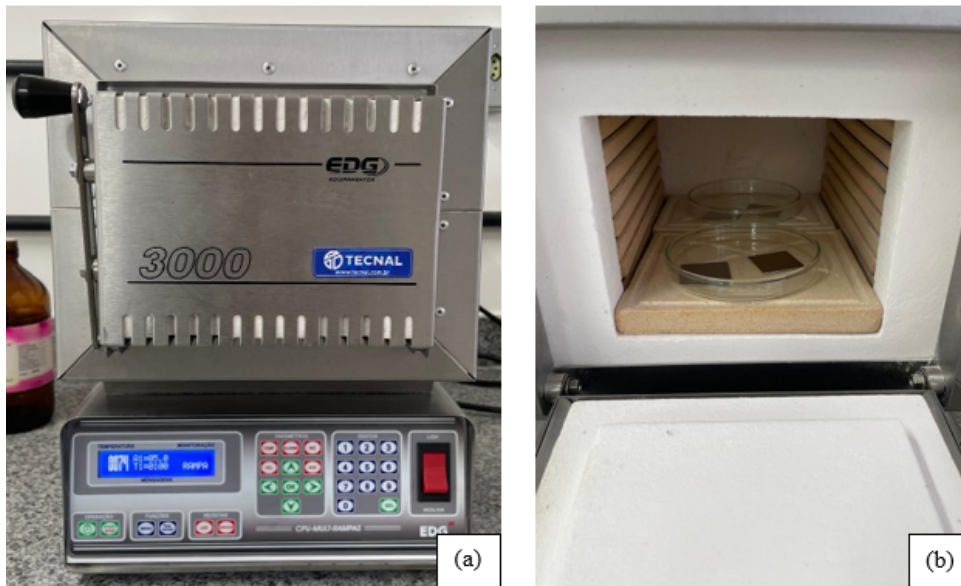


Fonte: Autor (2026)

3.4 ENVELHECIMENTO TÉRMICO ACELERADO

Para a realização do ensaio de envelhecimento térmico acelerado, utilizou-se um forno tipo mufla, modelo F-3000 da Edg (Figura 22), instalado nas dependências do Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm), pertencente ao Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR).

Figura 22: Forno Mufla F-3000 (a); Amostras posicionadas no interior do forno (b).



Fonte: Autor (2026)

Os parâmetros utilizados no ensaio seguiram a seguinte configuração: rampa de aquecimento de 5 °C/min até atingir a temperatura de operação, mantida em regime contínuo de 100 °C por 1h40min, totalizando 2 h de exposição térmica. As amostras foram acomodadas em recipientes de vidro e posicionadas no interior do forno, de modo a garantir aquecimento uniforme. Ao término do ensaio, o resfriamento das amostras ocorreu de forma natural, ainda

no interior da mufla, a fim de evitar choques térmicos.

3.5 DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS PARA OS TESTES

As amostras foram organizadas em grupos correspondentes aos diferentes ambientes de exposição: câmara UV-C, câmara UV-A, protótipo fototérmico e forno mufla F-3000. Para facilitar a identificação desses grupos e a compreensão das condições aplicadas, a Tabela 8 apresenta os parâmetros empregados, a configuração das amostras, o equipamento utilizado e o respectivo tempo de ensaio.

Tabela 8: Organização das amostras dispostas para os testes fototérmicos.

Nº	Amostra	Configuração	Teste	Tempo
1	S1.UVC	Cr	Câmara UV-C	2h
2	S2.UVC	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		
3	S3.UVC	Cr/Cr ₂ O ₃		
4	S1.UVA	Cr	Câmara UV-A	2h
5	S2.UVA	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		
6	S3.UVA	Cr/Cr ₂ O ₃		
7	S1.PRT	Cr	Protótipo	2h
8	S2.PRT	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		
9	S3.PRT	Cr/Cr ₂ O ₃		
10	S1.MFL	Cr	Mufla	2h
11	S2.MFL	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		
12	S3.MFL	Cr/Cr ₂ O ₃		

Fonte: Autor (2026)

3.6 CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA, FÍSICA E QUÍMICA

3.6.1 Espectrofotometria UV-Vis-NIR

Os filmes depositados em aço inoxidável foram submetidos à avaliação da sua refletividade nas faixas de radiação que corresponde as regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Os parâmetros mensurados de caracterização óptica da refletividade foi na faixa de radiação 220 nm a 1400 nm com o uso de uma esfera de integração para medição da radiação difusa. A partir dos valores da reflectância foi possível calcular os valores da absorptância das amostras. Os cálculos foram realizados através da Eq. (12).

$$\alpha = \frac{\int_{300}^{2500} \alpha_{\lambda} I_{sol} d\lambda}{\int_{300}^{2500} I_{sol} d\lambda} \quad (12)$$

onde α_{λ} é a absorptividade espectral do sólido, I_{sol} é a distribuição espectral da irradiação solar e α é a absorptividade hemisférica total.

Quando o sólido é considerado opaco, ou seja, não há transmissividade pelo mesmo ($\tau = 0$), a partir da substituição da Eq. (4) na Eq. (12), chega-se na Eq. (13):

$$\alpha = \frac{\int_{300}^{2500} (1 - \rho_{\lambda}) I_{sol} d\lambda}{\int_{300}^{2500} I_{sol} d\lambda} \quad (13)$$

onde ρ_{λ} é a refletividade espectral do sólido.

Para esta caracterização, foi utilizado um Espectrofotômetro UV–Vis modelo UV-2600, fabricado pela Shimadzu, localizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), utilizando-se de pastilhas de KBr.

3.6.2 Estimativa de *Bandgap*

A Teoria de Bandas de Energia define que os sólidos possuem duas bandas de energia, conhecidas como banda de valência e banda de condução (Oliveira, 2021; Correia; Dantas; Andrade, 2017). Portanto, definiu-se o *Bandgap* (bandas proibidas) como sendo a quantidade de energia necessária para a transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução (Callister JR; Rethwisch, 2016; Barros, 2018).

Sabendo que o *Bandgap* dos materiais está diretamente relacionado a sua capacidade de absorção de fótons, através da aplicação do Método de Tauc é possível determinar esses valores, através da Eq. (14).

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (14)$$

onde α é o coeficiente de absorção óptico, h é a constante de Plank, ν é a frequência do fóton, E_g é a energia do *band gap*, e A é uma constante de proporcionalidade.

O fator n depende da natureza das transições eletrônicas: assume o valor de 1/2 para transições diretas e 2 para transições indiretas no *bandgap* (Escobedo-Morales *et al.*, 2019).

Para determinar em qual comprimento de onda houve maior absorção de fótons pelo

material estudado, basta realizar a conversão da Energia do Fóton ($h\nu$) em comprimento de onda (nm) através da Eq. (7).

$$E_g \approx \frac{1240}{\lambda_g} \quad (7)$$

onde 1240 é o valor aproximado do produto das constantes físicas h (constante de Planck) e c (velocidade da luz) com resultado em elétron-volts (eV).

3.6.3 Difração de Raios-X

A caracterização por Difração de Raios-X (DRX) foi empregada para identificar a composição química dos revestimentos e verificar o grau de cristalinidade das amostras. Sua operacionalização baseia-se na Lei de Bragg (Eq. (15)), a qual estabelece a relação entre o ângulo de incidência (θ) e o espaçamento interplanar dos átomos (d), permitindo determinar a estrutura cristalina e a composição do material analisado.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (15)$$

As amostras em substratos de vidro foram caracterizadas através de um Difratorômetro de Raios-X modelo D8 Advance da Bruker, localizado no Núcleo de Estudos e Pesquisas em Materiais (Nepem) da UFPB. Os parâmetros utilizados foram: operação com radiação $K\alpha$ de Cobre (Cu), tensão de 25 kV, corrente de 25 mA, feixe incidente, não-rasante, com faixa de varredura entre 20° e 80° (2θ) com $0,02^\circ$ de incremento e medida durante $1^\circ/s$.

As análises dos difratogramas obtidos foram realizados utilizando o software *X'Pert High Score* (PANalytical) equipado com a biblioteca de dados *PDF-2 release 2003*, e para elaboração dos gráficos de resultados, utilizou-se um software de manipulação de dados.

3.6.4 Perfilometria Óptica

A técnica de perfilometria é usada para realizar medições topográficas de uma superfície. Assim, permite identificar valores de rugosidade superficial. O equipamento utilizado foi um perfilômetro óptico 3D do fabricante Taylor Hobson, modelo CCI MP, localizado no Laboratório Integrado de Biomateriais (LABIO) do Centro de Ciências da Saúde (CCS) da UFPB. Foram realizadas três leituras em pontos distintos de uma mesma amostra para determinação da rugosidade média.

Pode-se dizer que a rugosidade é uma alteração morfológica que possui influência na seletividade da superfície, pois essa texturização forma microcavidades que age como armadilha óptica, ou seja, a radiação incidente é aprisionada refletindo a radiação possibilitando a emissão térmica (Lampert, 1979; Pellegrini, 1980).

Os valores de rugosidade superficiais das amostras são avaliados através do parâmetro Ra , denominado pela norma ISO 4287 de Desvio Médio Aritmético do Perfil de Aspereza, sendo o parâmetro mais utilizado quando se pretende avaliar a influência da rugosidade superficial na seletividade do filme. Esse parâmetro é calculado através da Eq. (16) (Sheu *et al.*, 2016).

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (16)$$

No entanto, é importante analisar o parâmetro Sa presente na Norma Internacional *ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*, que demonstra, em forma de valor absoluto, a altura média aritmética da superfície, através da Eq. (17) (ISO 25178-2, 2012).

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (17)$$

onde, A é a área da superfície analisada e $|Z(x, y)|$ é a função que define a altura absoluta de cada ponto na superfície analisada e expande o parâmetro de perfil (rugosidade da linha) Ra em três dimensões.

CAPÍTULO IV

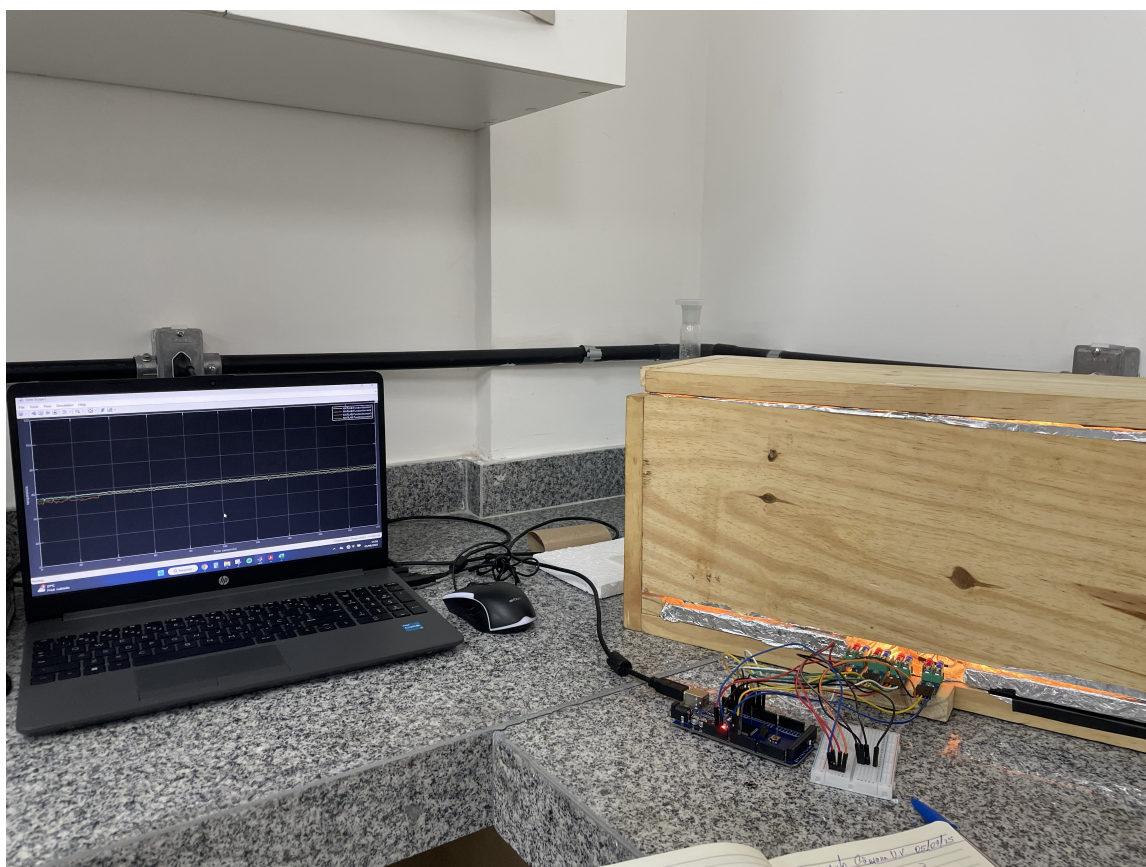
RESULTADOS

4.1 VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO FOTOTÉRMICO

O protótipo fototérmico desenvolvido foi avaliado em condições reais de operação por meio da exposição de filmes finos à base de cromo à radiação emitida pelas lâmpadas dicróicas integradas ao sistema. Esse procedimento teve como finalidade verificar a funcionalidade do dispositivo na indução de envelhecimento fototérmico controlado, assegurando que a metodologia proposta seria adequada para a caracterização dos materiais estudados.

A Figura 23 exibe o sistema em operação. Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) localizado no Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (CEAR/UFPB).

Figura 23: Vista do sistema em operação

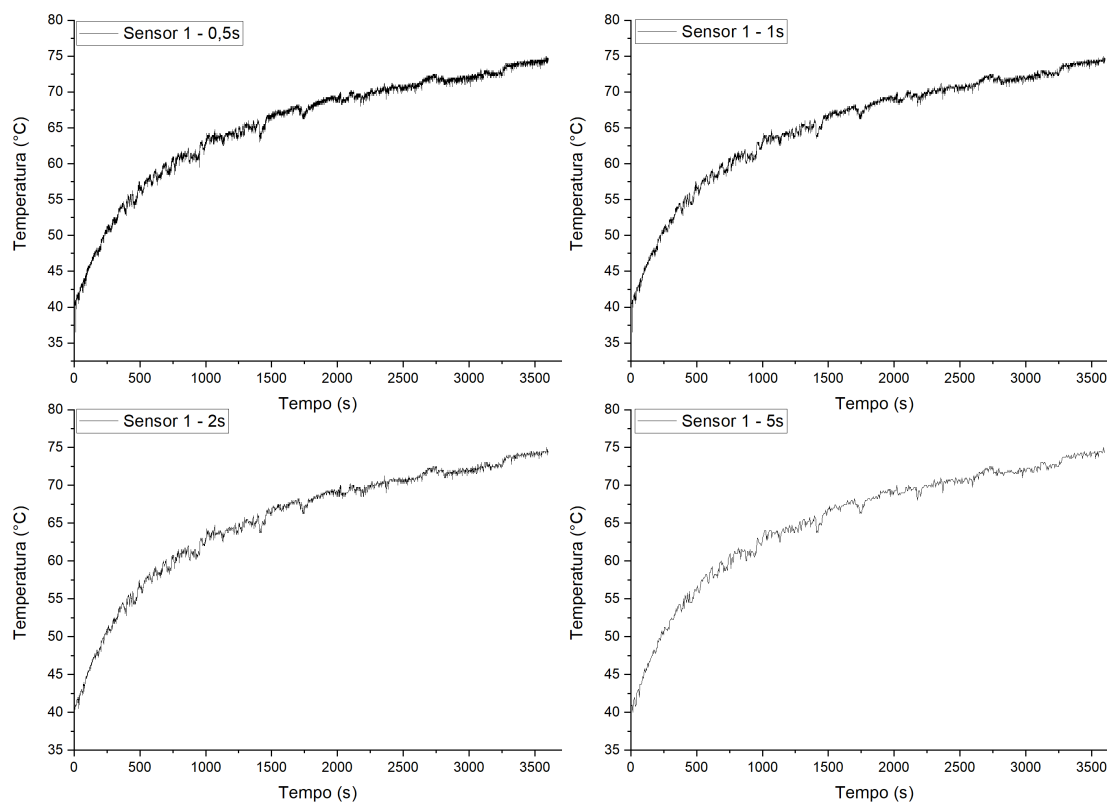


Fonte: Autor (2026)

Durante os ensaios, o protótipo apresentou comportamento estável, mantendo uniformidade na distribuição da radiação e assegurando condições reprodutíveis de exposição. O sistema de aquisição, baseado em microcontrolador e módulos termopares, garantiu a coleta contínua dos dados de temperatura, sem perdas significativas na comunicação serial. Além disso, a integração com o ambiente MATLAB/Simulink viabilizou a visualização em tempo real das variáveis monitoradas, facilitando o acompanhamento do experimento e a validação dos registros obtidos.

Inicialmente, o sistema de aquisição de dados foi configurado para registrar informações a cada 0,5 s. No entanto, observou-se que esse intervalo curto gerava sinais com elevado ruído, dificultando a interpretação das medições. Para melhorar a qualidade dos dados, o código de programação foi ajustado, permitindo aquisições em intervalos de 1s, 2s e 5s. Essa alteração foi testada experimentalmente, resultando em leituras mais estáveis e confiáveis, sem comprometer a capacidade de monitoramento em tempo real do protótipo (Figura 24).

Figura 24: Comparação do sinal de um sensor termopar em diferentes intervalos de aquisição.

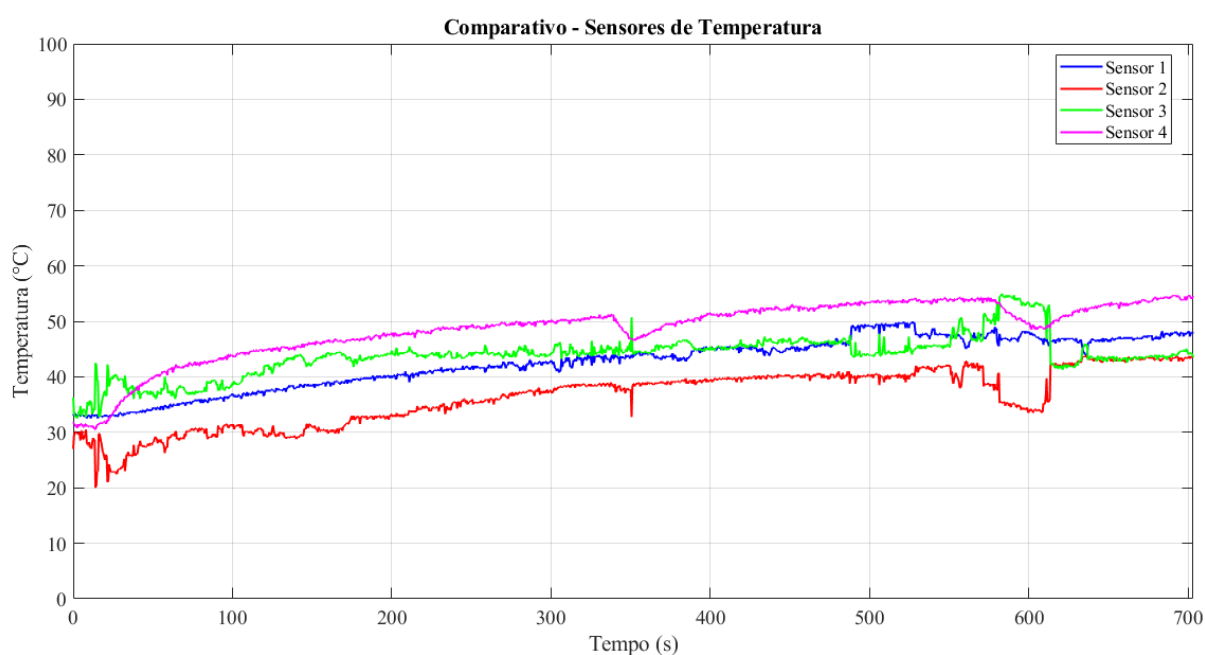


Observa-se que a redução do ruído ocorre progressivamente com o aumento do intervalo de aquisição, sendo 5s o tempo que proporciona melhor visualização e maior fidelidade dos dados. Esta comparação evidencia a importância da escolha do intervalo adequado para a confiabilidade das medições do protótipo fototérmico.

O procedimento de teste das amostras foi conduzido utilizando o protótipo fototérmico com tempo de exposição de 2h. Inicialmente, realizou-se uma rodada de testes com duração de 700s, com o objetivo de validar o código de aquisição e assegurar o correto funcionamento das rotinas de extração de dados e geração de gráficos no ambiente MATLAB/Simulink. Essa etapa preliminar permitiu identificar ajustes necessários no intervalo de aquisição e confirmar a confiabilidade do sistema antes da execução dos ensaios completos.

A Figura 25 exibe o exemplo de registro de temperatura obtido durante a rodada de validação do sistema com tempo de aquisição de 700s, demonstrando a funcionalidade da rotina de extração de dados e geração de gráficos no MATLAB/Simulink.

Figura 25: Registro de temperatura na validação do sistema (700s).



Fonte: Autor (2026)

Do ponto de vista funcional, o protótipo se destacou por sua simplicidade de operação, baixo custo de implementação e confiabilidade nos dados obtidos, apresentando-se como alternativa viável frente a sistemas comerciais de maior complexidade e custo elevado. A avaliação da funcionalidade do protótipo fototérmico demonstrou que o sistema atendeu plenamente aos objetivos propostos, sendo capaz de promover condições de envelhecimento controlado e

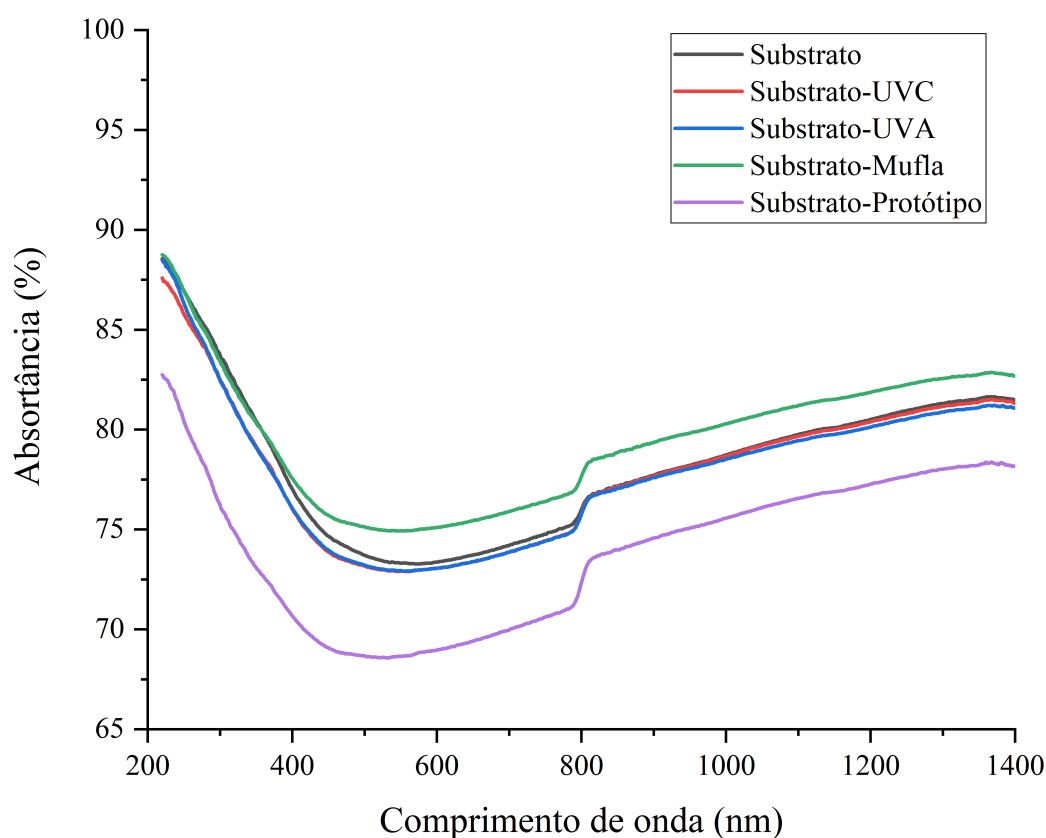
de fornecer dados confiáveis para a análise do comportamento de filmes finos. Dessa forma, confirma-se a adequação do dispositivo ao escopo desta pesquisa e seu potencial para futuras investigações em superfícies seletivas solares.

4.2 EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NA ABSORTIVIDADE DOS FILMES

4.2.1 AVALIAÇÃO DOS SUBSTRATOS

A espectrofotometria da absorptância dos substratos em aço inoxidável AISI 304 na região UV/Vis/NIR (220 a 1400 nm) do espectro eletromagnético pode ser observada na Figura 26. A conversão dos resultados de reflectância para absorptância, através da Equação 13, permitiu a obtenção das curvas apresentadas a seguir.

Figura 26: Espectros de absorptância do aço inoxidável AISI 304 submetidos à diferentes condições.



Fonte: Autor (2026)

As curvas correspondentes às exposições na câmara UV-C e UV-A apresentam sobreposição quase total em relação ao substrato que não foi exposto a nenhuma condição, indicando que, para os parâmetros adotados, a radiação ultravioleta isolada não promoveu alterações significativas nas propriedades ópticas, confirmando a estabilidade do aço inoxidável frente à radiação UV em condições laboratoriais controladas (Louzada, 2022).

Em contraste, a curva referente ao substrato submetido à mufla apresentou uma curva com valores superiores aos demais espectros, indicando que a exposição térmica isolada pode promover acréscimo no valor de absorvância média total. A curva referente ao substrato que foi submetido ao protótipo apresentou a maior redução entre as absorvâncias analisadas. O deslocamento da curva para valores mais baixos sugere alguma alteração das propriedades ópticas do substrato, possivelmente associada ao efeito combinado da radiação IR emitida com o aquecimento superficial gerado pelas lâmpadas halógenas. Esses fatores podem ter induzido modificações físico-químicas, como oxidação superficial ou variação na rugosidade, resultando em queda da absorvância.

Observa-se, também, uma pequena descontinuidade nas curvas de absorvância próxima a região de 800 nm. Esse efeito é compatível com o ponto de transição das lâmpadas do espectrofotômetro utilizado na medição quando a região do infravermelho é atingida. Complementando a análise espectral, a Tabela 9 apresenta os valores médios de absorvidade hemisférica total e seus respectivos desvios padrão para cada condição de exposição.

Tabela 9: Absorvidades hemisféricas totais obtidas para cada sistema de exposição

Nomenclatura	Exposição	Absorvidade (%)	Desvio Padrão (%)
Substrato	Sem Exposição	78,26	3,6172
Substrato-UV-C	Câmara Escura UV-C	77,88	3,5521
Substrato-UV-A	Câmara Escura UV-A	77,81	3,5525
Substrato-Mufla	Mufla F-3000	79,50	3,2683
Substrato-Protótipo	Protótipo Fototérmico	73,97	3,6877

Fonte: Autor (2026)

Os resultados quantitativos confirmam que as absorvidades do substrato não exposto (78,26%) e das amostras expostas às câmaras UV-C (77,88%) e UV-A (77,81%) são estatisticamente muito próximas, com diferenças dentro da margem de desvio padrão. Esse comportamento coincide com valores reportados na literatura, com absorvâncias típicas de 60–80% para substratos metálicos como o aço inoxidável AISI 304 (Kennedy, 2002). Além disso, Wu *et al.* (2015) evidenciou que a atuação do UV isolado exerce efeito limitado sobre metais.

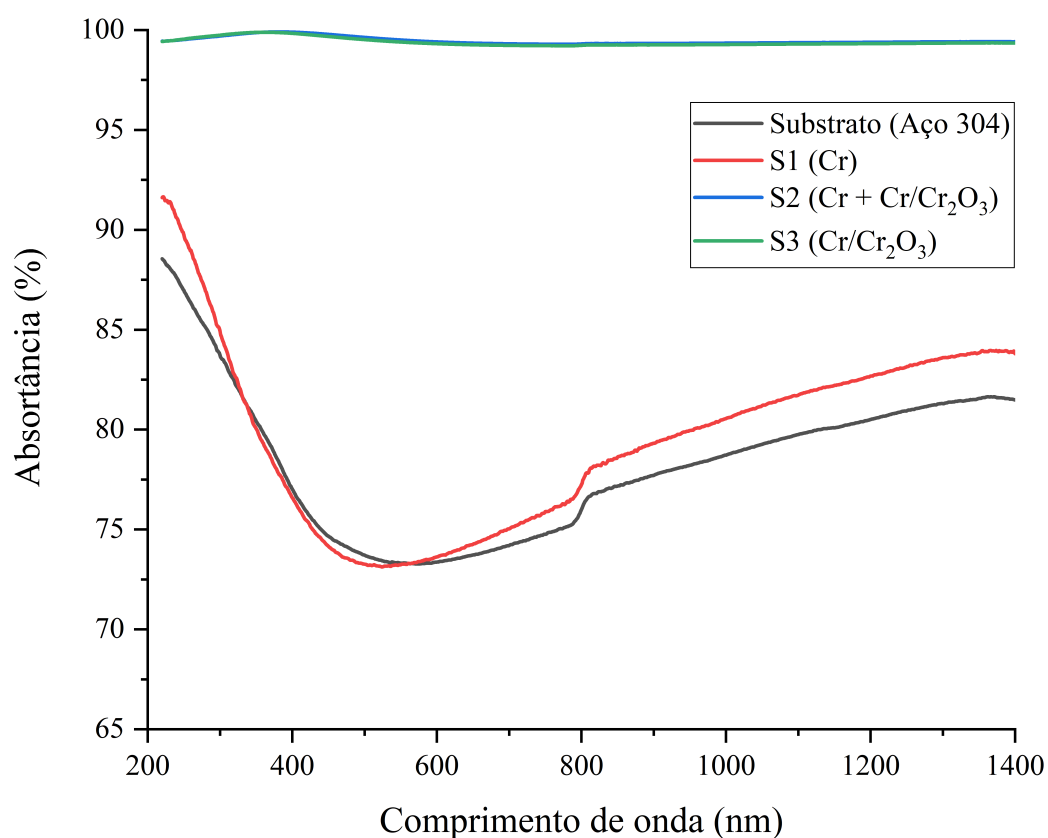
O substrato submetido à exposição a mufla obteve o maior valor de absorptância e o menor valor do desvio-padrão. Já o substrato submetido ao protótipo fototérmico apresentou o menor valor de absorptividade hemisférica, corroborando a alteração observada na curva espectral. A partir da (Eq. 9) calculou-se a variação da absorptividade dos substratos, sendo a maior redução atribuída ao substrato que foi exposto ao protótipo, -4,29%, evidenciando modificação nas propriedades ópticas, mas ainda assim dentro do parâmetro de estabilidade térmica (<5%).

4.2.2 AVALIAÇÃO DOS FILMES

4.2.2.a Depositados ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

A Figura 27 apresenta os espectros de absorptância dos filmes de cromo depositados em substrato metálico de aço inox 304. Os valores foram obtidos a partir dos dados de reflectância e calculados através da Equação 13.

Figura 27: Curvas de absorptância das amostras depositadas.



Fonte: Autor (2026)

As absorptâncias espectrais correspondentes aos filmes que possuem em sua configuração o Cermet, obtiveram altos valores médios – amostras S2 (Cr+Cr/Cr₂O₃) com 99,46% e S3 (Cr/Cr₂O₃) com 99,39%. Estes filmes também apresentaram boa homogeneidade ao longo de todo o espectro. O filme S1 (Cr) e Substrato (S) obtiveram valores de 79,49% e 78,26%, respectivamente.

Silva (2022) depositou filmes de Cermet à base de cromo com diferentes configurações em substrato de aço 304 tratados por eletropolimento, cujos valores de absorptividade hemisférica ficaram próximas de 99%. Embora a metodologia para tratamento superficial dos substratos utilizados nesta tese tenha sido diferente do utilizado no estudo supracitado, a composição dos filmes a base de cromo possuíram configurações similares, sugerindo que a composição dos filmes exerce papel preponderante sobre a absorptividade hemisférica, de modo que diferentes preparações superficiais pode conduzir a resultados convergentes em relação ao desempenho óptico.

A Tabela 10 sumariza as informações contidas no gráfico em uma análise comparativa dos resultados. Para cada filme é apresentado um desvio padrão, que sinaliza a dispersão estatística do processo.

Tabela 10: Absorptividades hemisféricas totais dos filmes depositados.

Amostra	Configuração	Absorptividade (%)	Desvio Padrão (%)
Substrato	Aço AISI 304	78,26	3,6172
S1	Cr	79,49	4,3943
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	99,46	0,1787
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	99,39	0,1951

Fonte: Autor (2026)

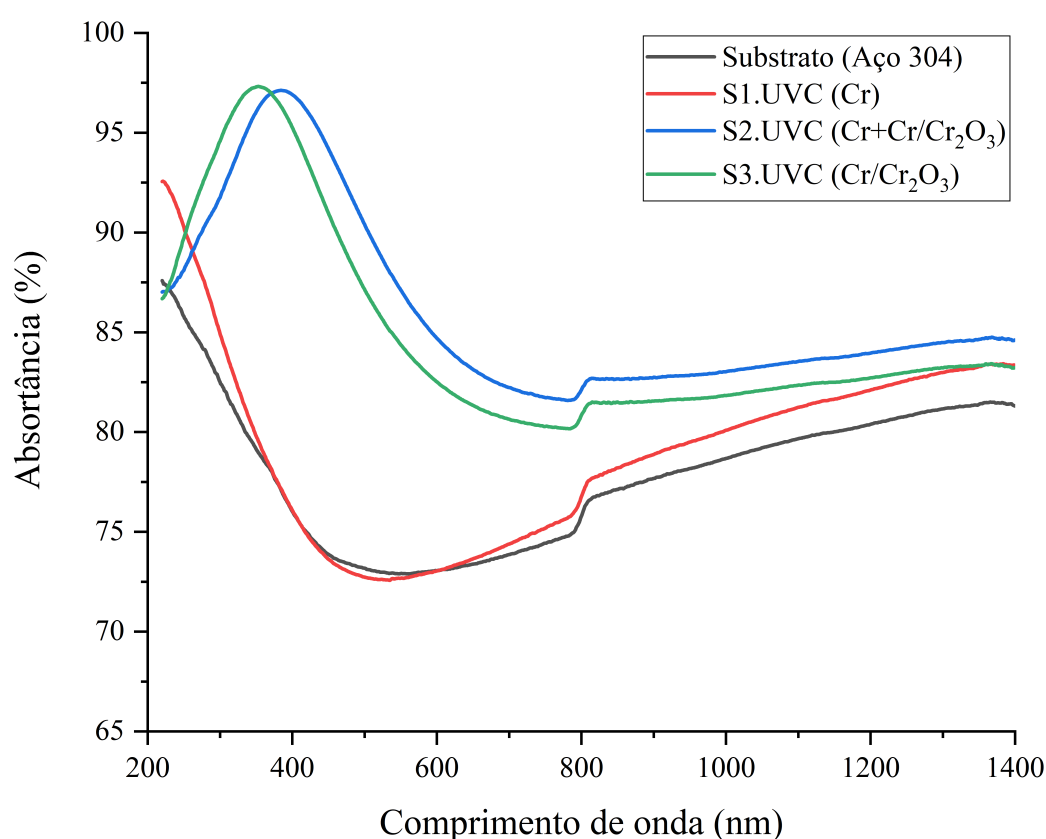
Os desvios padrão dos filmes depositados mostram contrastes importantes em termos de reprodutibilidade. O substrato (3,61%) e o filme S1 (Cr, 4,39%) apresentaram maior variabilidade. Por outro lado, tanto o filme S2 (Cr + Cr/Cr₂O₃, 0,1787%) quanto o filme S3 (Cr/Cr₂O₃, 0,1951%) exibiram desvios padrão extremamente baixos, revelando elevada uniformidade óptica e alta estabilidade do processo de deposição por *Sputtering*. Valores similares de desvios-padrão foram identificados por Silva (2022) ao depositar filmes de Cermet a base de cromo em substratos de aço 304.

A evidência desses resultados indica que a presença do Cr₂O₃ na matriz metal-óxido, possivelmente contribuiu para aumentar a absorptividade no processo de deposição, mas também para reduzir a dispersão estatística das medidas (Zahra *et al.*, 2021; Abed *et al.*, 2021).

4.2.2.b Exposição UV-C

A Figura 28 apresenta os espectros de absorvância dos filmes de cromo expostos à radiação UV-C. Nota-se que a curva do filme S1 (Cr) e do substrato se mantiveram semelhantes, quase que sobrepostas. Esse comportamento pode indicar que a radiação UV-C, apesar sua alta energia fotônica não provocou alterações expressivas na absorvância do revestimento de cromo. No entanto, para as configurações S2 (Cr + Cr₂O₃) e S3 (Cr/Cr₂O₃) a radiação provocou alterações visualmente expressivas quando comparados aos filmes em estado inicial. Embora seja nítido as mudanças causadas pela radiação UV-C, os filmes mantiveram valores médios de absorvância superior a 80%, com picos distintos em 97,11% para S2 e 97,37% para S3.

Figura 28: Curvas de absorvância das amostras expostas à radiação UV-C



Fonte: Autor (2026)

O substrato metálico (77,88%) apresentou o menor valor de absorvância, comportamento já esperado devido a ausência de revestimento. O filme S1 (Cr) obteve um ganho modesto de absorção (79,05%), confirmando as observações feitas nos espectros, mas consistente

com resultados encontrados na literatura.

O Filme S2 (Cr + Cr/Cr₂O₃, 85,97%) foi o que apresentou maior valor de absorvância para essa fase de teste, representando um incremento de +8,1% em relação ao substrato. Esse ganho pode ser associado ao efeito interferencial causado pela multicamada que melhora a absorção no visível. Outro ponto a mencionar é a presença do óxido (Cr₂O₃), que segundo Zahra *et al.* (2021) é um material possui ótimas propriedades ópticas.

O Filme S3 (Cr/Cr₂O₃, 84,78%) embora possua valor de absorvância inferior ao filme multicamada, o Cermet se caracteriza por boa estabilidade térmica e óptica, uma vez que compósitos metal/óxido são conhecidos por sua durabilidade (Jose; John; Menezes, 2022). Isso sugere que, mesmo com absorvância ligeiramente menor, o Cermet pode oferecer maior confiabilidade em longo prazo. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos para possibilitar uma análise comparativa entre os filmes.

Tabela 11: Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição à radiação UV-C

Amostra	Configuração	Absortividade (%)	Desvio Padrão (%)
Substrato	Aço AISI 304	77,88	3,5521
S1	Cr	79,05	4,5793
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	85,97	4,4905
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	84,78	4,9284

Fonte: Autor (2026)

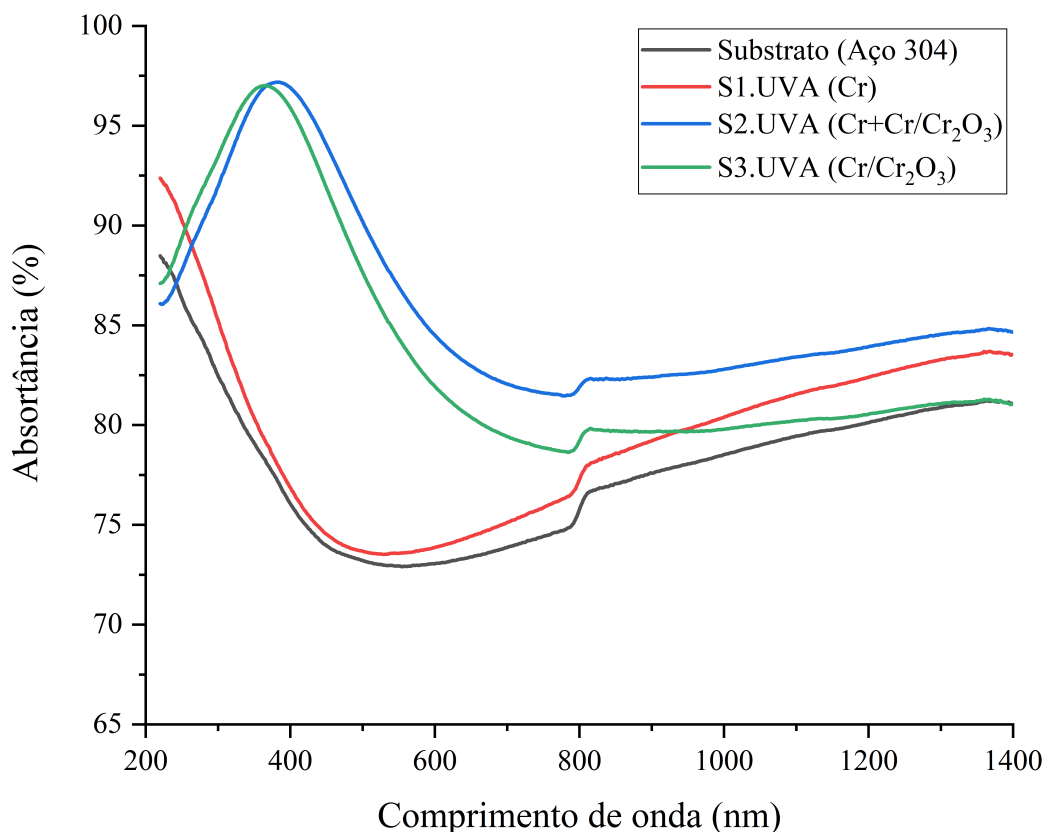
4.2.2.c Exposição UV-A

A Figura 29 apresenta os espectros de absorvância das amostras após exposição à radiação UV-A. Neste ambiente de exposição, as curvas do substrato e do filme S1 (Cr) mantêm comportamento semelhante, embora o substrato apresenta uma redução, a notar pelo comportamento da sua curva espectral. Já os espectros dos filmes S2 e S3 se mantiveram também semelhantes aos filmes expostos à radiação UV-C, com picos de absorção do filme S2 com 97,18% e S3, com 97,01%.

A comparação entre os resultados obtidos para as exposições em radiação UV-C e UV-A revela que, de forma geral, as amostras mantiveram absorvidades acima de 80% e estáveis, especialmente os sistemas multicamadas (S2) e Cermet (S3). Contudo, nota-se que a radiação UV-A provocou resposta ligeiramente mais intensa do que a UV-C, particularmente no filme Cermet (S3), em que a diferença foi mais perceptível. Para Koushik, Kalita & Mishra (2024)

apesar da radiação UV-C possuir maior energia fotônica ($\approx 4,9$ eV em 254 nm), sua interação não é tão efetiva com os estados eletrônicos do material quando comparada a radiação UV-A ($\approx 3,4$ eV em 365 nm).

Figura 29: Curvas de absorptância das amostras expostas à radiação UV-A



Fonte: Autor (2026)

A Tabela 12 sumariza os valores obtidos na etapa experimental, indicando uma redução de $-1,24\%$ na absorptividade, calculada conforme a Eq. 9. Embora as curvas apresentem comportamento visualmente semelhante, pequenas variações estatísticas são observadas entre as amostras. O filme S1 (Cr), por exemplo, apresenta um leve aumento ($+0,48\%$) na absorptividade quando comparado ao resultado obtido após a exposição UV-C. O maior ganho relativo foi identificado no filme S2, cuja variação média atingiu $85,83\%$, sugerindo uma resposta mais sensível às condições impostas pela radiação UV-A.

Tabela 12: Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição à radiação UV-A

Amostra	Configuração	Absortividade (%)	Desvio Padrão (%)
Substrato	Aço AISI 304	77,81	3,5525
S1	Cr	79,53	4,3229
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	85,83	4,5558
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	83,54	5,6077

Fonte: Autor (2026)

4.2.2.d Exposição ao Protótipo

A Figura 30 apresenta os espectros de absorvância das amostras após a exposição ao protótipo fototérmico ($\approx T = 80^{\circ}\text{C}$). Observa-se que a curva espectral do substrato difere de maneira expressiva em relação ao filme S1 ao longo de toda a faixa analisada. Os comportamentos espectrais dos filmes S2 e S3 mantêm o mesmo padrão observado nos ensaios UV-C e UV-A, ainda que o filme S3 tenha apresentado um leve ganho quando comparado especificamente à exposição UV-A, atingindo picos de 96,66% e 96,09%, respectivamente.

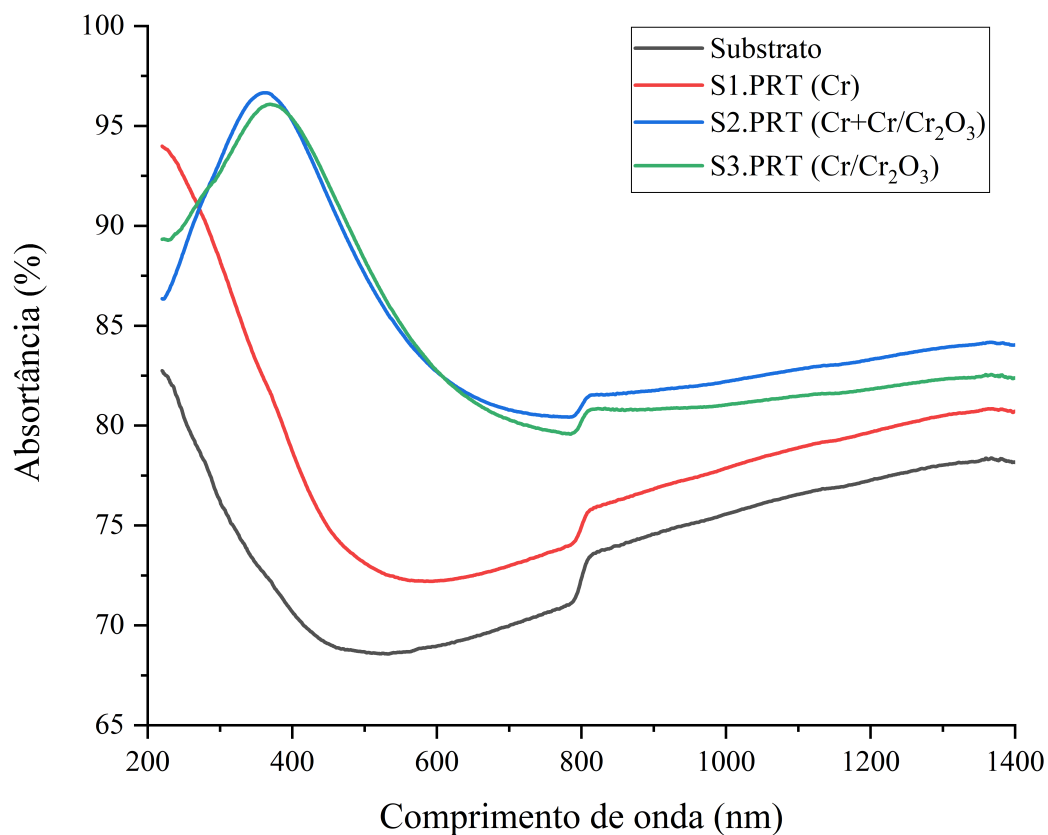
A Tabela 13 apresenta os valores de absorvidade hemisférica das amostras. O filme S3 apresentou maior valor de absorvância dentre todas amostras nesta fase. No caso do sistema multicamadas (S2), há uma ligeira redução da absorvidade observada após a exposição no protótipo (84,97%), em comparação aos valores sob UV-C e UV-A ($\approx 86\%$). Diferentemente do Cermet (S3), cuja composição mista metal-óxido tende a apresentar maior estabilidade frente a variações estruturais, a configuração multicamadas (S2) depende do bom desempenho da camada metálica para garantir a resposta óptica global, quando envolve aquecimento superficial, o que pode ter culminado para a redução da absorvidade neste teste (Jose; John; Menezes, 2022).

Tabela 13: Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição ao Protótipo Fototérmico

Amostra	Configuração	Absortividade (%)	Desvio Padrão (%)
Substrato	Aço AISI 304	73,97	3,6877
S1	Cr	78,18	4,9063
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	84,97	4,9041
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	85,90	4,6314

Fonte: Autor (2026)

Figura 30: Curvas de absor ncia das amostras expostas ao protótipo fototérmico



Fonte: Autor (2026)

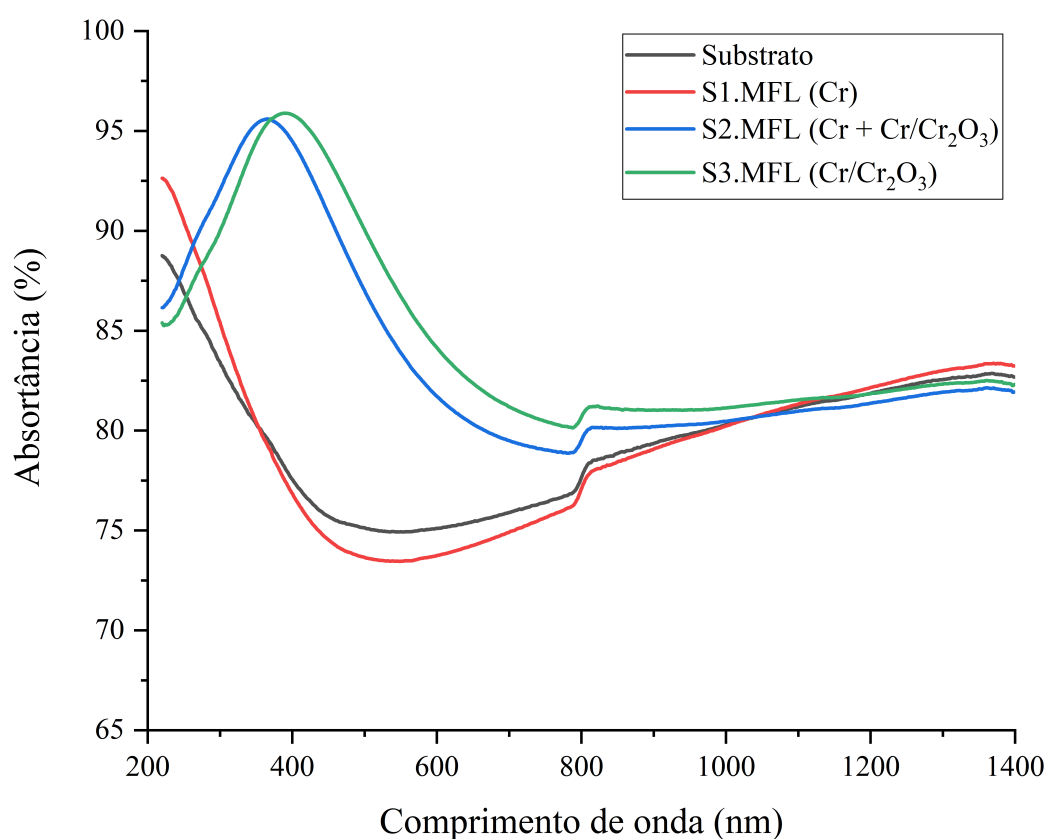
4.2.2.e Exposição ao Forno Mufla

A Figura 31 apresenta os espectros de absor ncia das amostras que foram submetidas ao envelhecimento térmico na mufla ($T = 100^{\circ}\text{C}$). Observa-se que, tanto o substrato de referência quanto o filme S1 (Cr), apresentaram comportamento semelhante e quase que sobrepostos quando comparado   exposição   radiação UV-C.

As curvas de absor ncia dos filmes S2 e S3 apresentaram comportamentos semelhantes em todos os ensaios realizados, ainda que tenham sido observadas reduções nos valores máximos dos picos — 95,60% e 95,88%, respectivamente — na faixa de comprimento de onda do visível. Esses resultados indicam que, embora a exposição às radiações UV-C, UV-A e infravermelha (protótipo) tenha provocado reduções na absorptividade e nos valores máximos de absorção, o envelhecimento térmico foi o fator que ocasionou a perda mais significativa nas propriedades ópticas dos filmes.

Estudos que investigaram o envelhecimento térmico em filmes de cromo corroboram esses resultados. Valença (2021) identificou perdas de 6,79% na absortividade em filmes com a configuração Cr+Cr₂O₃ submetidos ao envelhecimento térmico a 200°C. De modo semelhante, Gonçalves (2021) observou reduções de 2,45% em filmes com a configuração Cr/Cr₂O₃+Cr₂O₃ expostos a 350°C. A maior perda registrada nos filmes contendo a camada de Cr metálico evidencia a maior suscetibilidade desse material à degradação térmica, possivelmente associada à oxidação progressiva do cromo e à consequente alteração de suas propriedades ópticas.

Figura 31: Curvas de absorptância das amostras expostas à mufla.



Fonte: Autor (2026)

A Tabela 14 apresenta os valores de absortividade hemisférica das amostras, calculados pela Eq. 13. Observa-se que o filme composto pelo Cermet (S3) exibiu o maior valor de absorptância dentre todas as amostras nesta etapa de exposição, indicando melhor desempenho óptico após o envelhecimento térmico.

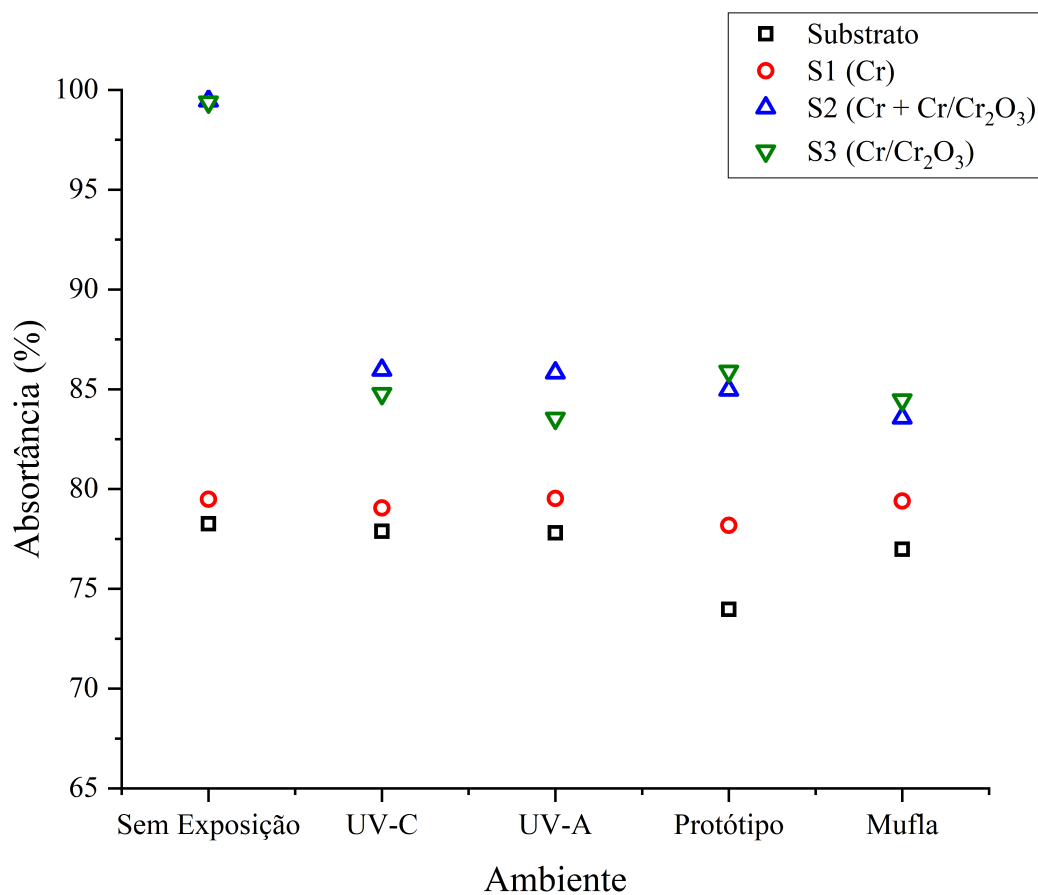
Tabela 14: Absortividades hemisféricas totais obtidas após exposição ao forno mufla.

Amostra	Configuração	Absortividade (%)	Desvio Padrão (%)
Substrato	Aço AISI 304	79,50	3,2683
S1	Cr	79,40	4,3559
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	83,57	4,8850
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	84,46	4,7166

Fonte: Autor (2026)

4.2.2.f Comparativo entre os ambientes de Exposição

A Figura 32 apresenta uma análise comparativa dos valores de absorptância solar dos filmes após as diferentes condições de exposição avaliadas.

Figura 32: Comportamento dos filmes de cromo submetidos à diferentes ambientes de exposição à radiação UV

Fonte: Autor (2026)

Com o objetivo de avaliar o impacto das condições de envelhecimento acelerado sobre o desempenho óptico dos filmes, a Tabela 15 apresenta um comparativo dos valores de absorptância

solar (α) das amostras após exposição a diferentes ambientes. Como referência, considerou-se o estado inicial (sem exposição). Os valores de absorptância foram obtidos por meio da Eq. 9, que expressa a diferença entre a absorptividade inicial e aquela medida após o processo de envelhecimento, permitindo quantificar as perdas decorrentes de cada condição de exposição.

Tabela 15: Análise comparativa das amostras em diferentes ambientes de exposição

Amostras	Configuração	Absortância Solar ($\alpha\%$)					$\Delta\alpha_s(\%)$
		Depositado	UV-C	UV-A	Protótipo	Mufla	
Substrato	Aço (AISI 304)	78,26	77,88 ↓	77,81 ↓	73,97 ↓	76,98 ↑	-1,28
S1	Cr	79,49	79,05 ↓	79,53 ↑	78,18 ↓	79,40 ↑	-0,09
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃	99,46	85,97 ↓	85,83 ↓	84,97 ↓	83,57 ↓	-15,89
S3	Cr/Cr ₂ O ₃	99,39	84,78 ↓	83,54 ↓	85,90 ↑	84,46 ↓	-14,93

Fonte: Autor (2026)

O substrato metálico apresentou uma redução contínua da absorptância até a exposição pelo protótipo, embora a exposição na mufla tenha causado aumento da propriedade, atingindo uma variação acumulada de -1,28%.

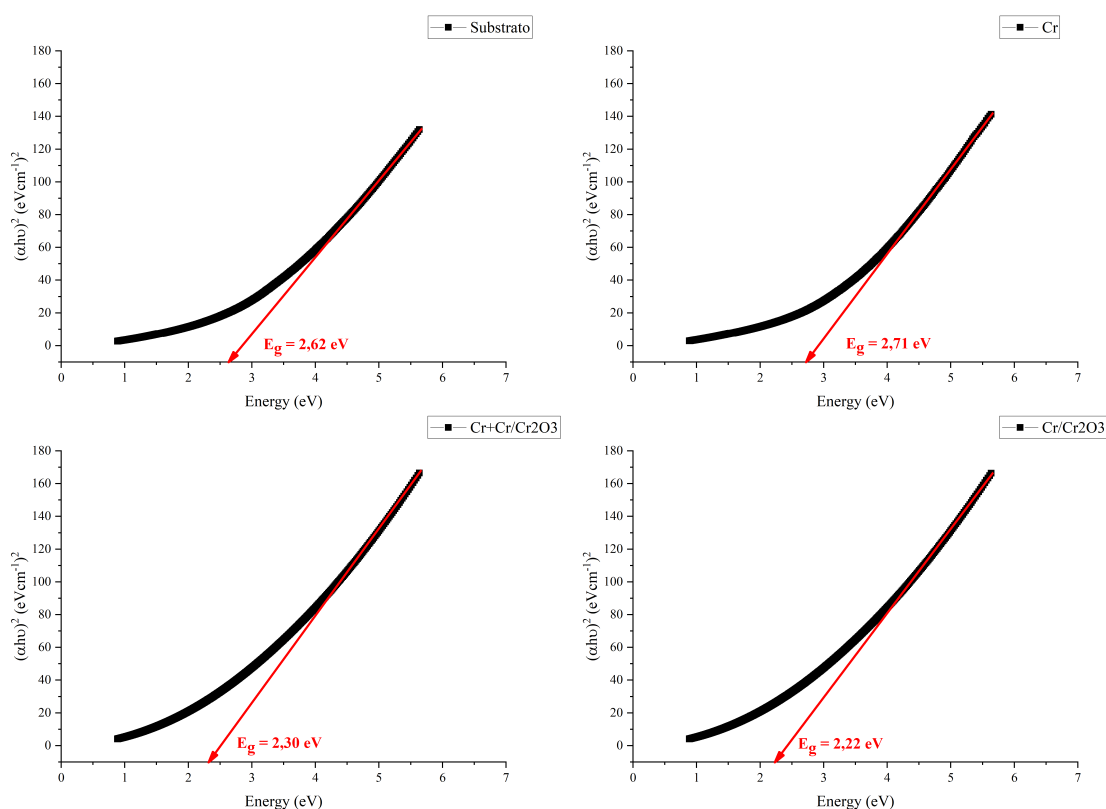
A amostra composta apenas por Cr (S1) apresentou a menor variação de absorptância solar após os diferentes ensaios de envelhecimento, indicando estabilidade óptica e térmica. Mesmo apresentando valores alternados de ganhos e perdas, esse comportamento sugere que o Cr metálico atua como uma camada protetora eficaz contra processos de oxidação ou degradação induzidos por radiação ultravioleta. O leve aumento da absorptância no substrato após o tratamento térmico na mufla pode estar associado à formação de óxidos superficiais finos, os quais elevam a rugosidade e alteram a refletância difusa (Wang *et al.*, 2025).

Em contraste, as amostras S2 (Cr+Cr/Cr₂O₃) e S3 (Cr/Cr₂O₃) exibiram reduções expressivas na absorptância (15,89% e 14,93%, respectivamente), em relação ao valor inicial, evidenciando uma menor estabilidade frente aos ambientes de exposição. O filme S2 (multicamada) apresentou redução de absorptância em todos os ambientes aos quais foi exposto, possivelmente essa degradação pode estar relacionada à instabilidade interfacial entre as camadas metal/cermet, favorecendo a difusão progressiva do Cr e a consequente alteração de sua estrutura óptica. Assim, embora essas configurações apresentem alta absorptância inicial, tornam-se mais suscetíveis a transformações causadas pelas condições combinadas entre radiação e temperatura.

4.3 EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NO *BANDGAP* DOS FILMES

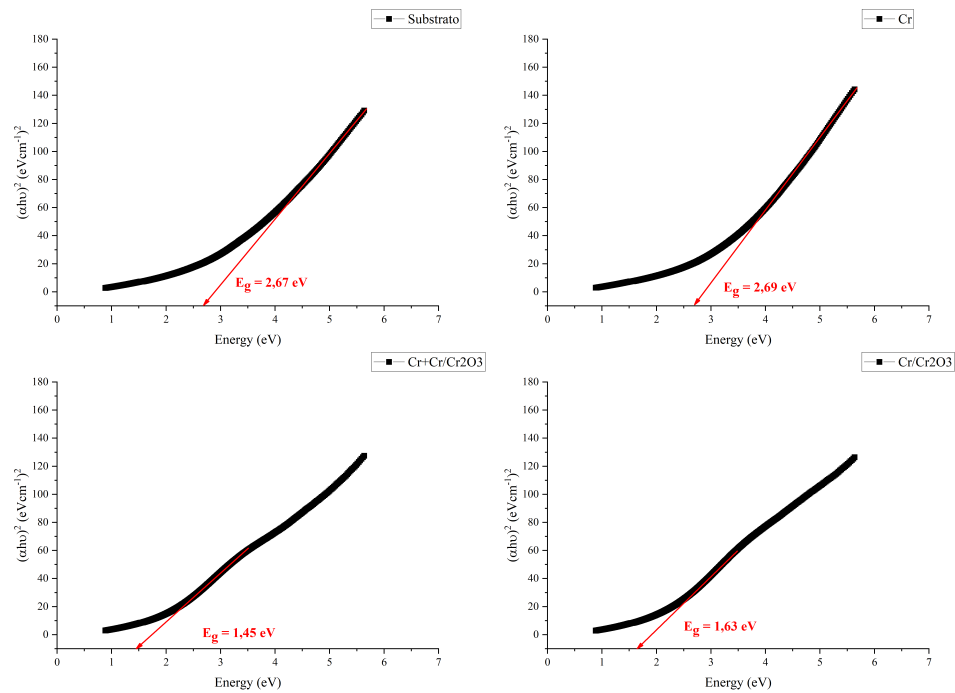
Os valores de *bandgap* foram calculados a partir dos resultados de reflectância obtidos espectrofotometria na região do UV-visível utilizando o método de Tauc descrito na seção 4.6.2 e expresso pela Equação 14. Foram estimados os valores extrapolando a parte reta da curva de $\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n$ e extraindo o valor a partir da reta tangente que intercepta a curva do espectro no eixo das abscissas, considerando transições diretas. Os resultados podem ser visualizados nas Figura 33 à Figura 37. Além disso, a Tabela 16 sumariza os valores para efeito comparativo.

Figura 33: *Bandgap* do substrato e dos filmes de Cromo depositados em Aço Inox 304.



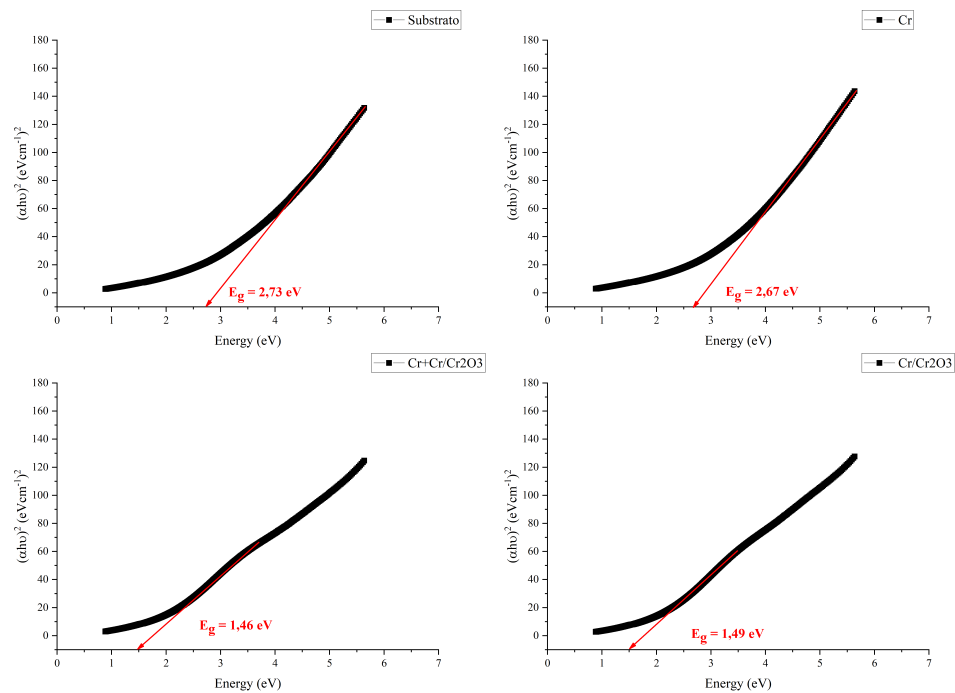
Fonte: Autor (2026)

Figura 34: *Bandgap* do substrato e dos filmes de Cromo expostos à radiação UV-C.



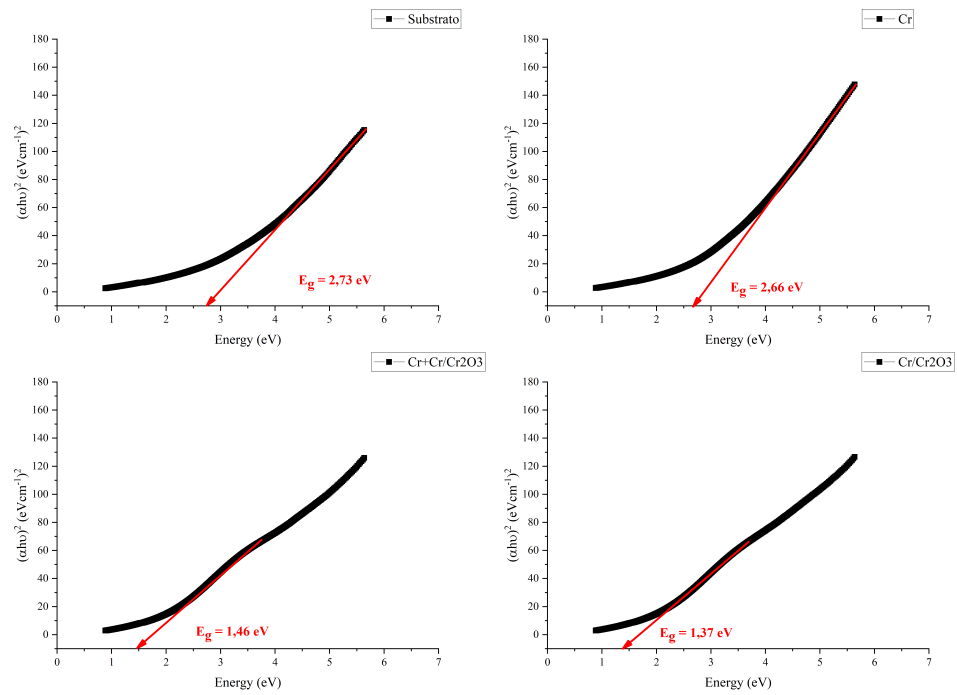
Fonte: Autor (2026)

Figura 35: *Bandgap* do substrato e dos filmes de Cromo expostos à radiação UV-A.



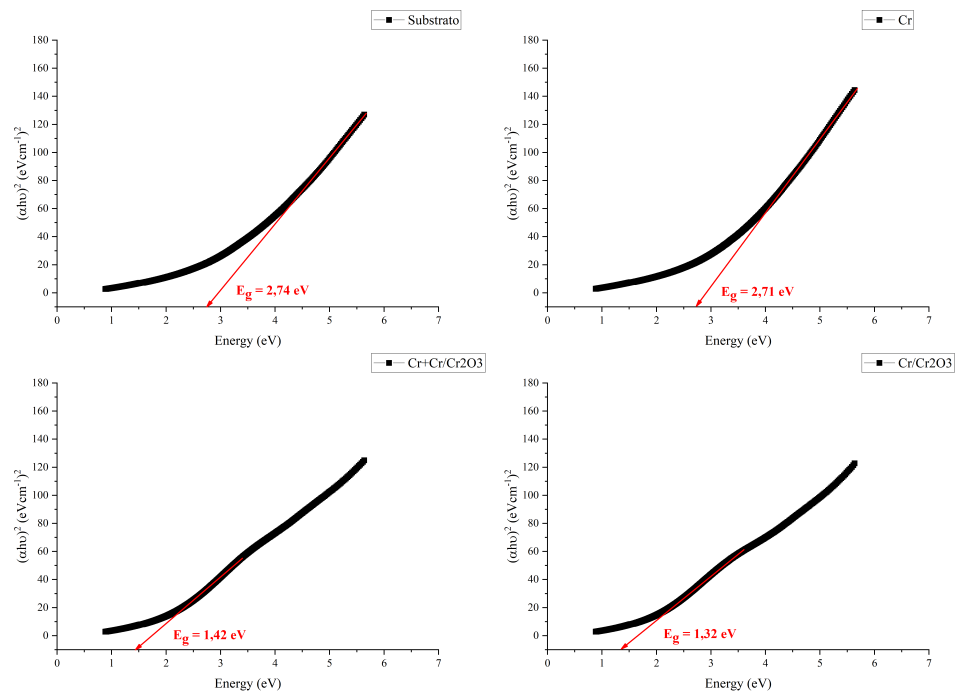
Fonte: Autor (2026)

Figura 36: Bandgap do substrato e dos filmes de Cromo expostos ao protótipo fototérmico.



Fonte: Autor (2026)

Figura 37: Bandgap do substrato e dos filmes de Cromo expostos ao forno mufla.



Fonte: Autor (2026)

Os valores de *bandgap* apresentados na Tabela 16 evidenciam variações significativas tanto em função da configuração estrutural dos filmes quanto do tipo de ambiente de exposição. Observa-se que os filmes depositados apresentaram *bandgap* inicial entre 2,22 e 2,71 eV, compatíveis com valores encontrados na literatura para estrutura pura e multicamadas (Hong *et al.*, 1997; Kaspar *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2019).

O valor mais elevado obtido para a amostra de S1 (2,71 eV), associada ao filme de Cromo puro, cuja estrutura condutiva não permite a formação de estados intermediários dentro da banda proibida (Bassalo, 1994). Em contraste, os filmes com a presença de óxidos, amostras S2 e S3, apresentaram *bandgap* de 2,30 e 2,22 eV, respectivamente, indicando maiores níveis de desordem em decorrência da heterogeneidade das interfaces.

Após a exposição às diferentes fontes de radiação, observa-se uma tendência consistente de redução do *bandgap* nas amostras contendo óxido (S2 e S3), enquanto o Substrato (S) e o filme metálico (S1) mantiveram valores praticamente inalterados (2,62 - 2,73 eV). Essa estabilidade do filme metálico reforça a natureza condutiva do Cr e sua resistência a alterações superficiais provocadas pela exposição à radiação ultravioleta ou aquecimento.

Nas amostras S2 e S3, a redução do *bandgap* é particularmente acentuada, atingindo valores entre 1,32 e 1,63 eV após exposição à radiação UV e ao aquecimento no protótipo e na mufla. Essa variação sugere a formação de estados de defeito e de subníveis eletrônicos dentro da banda proibida, originados possivelmente pela difusão do Cr_2O_3 . Tais fenômenos pode explicar a diminuição de E_g e o deslocamento do comprimento de onda de absorção (λ) para regiões do infravermelho.

Os menores valores de *bandgap* foram identificados no filme S3 ($\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$) submetido a exposição ao protótipo (1,37 eV) e ao forno mufla (1,32 eV). A literatura não apresenta registros diretos de reduções ($< 2,0$ eV) semelhantes em filmes de $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ sob condições experimentais equivalentes. Contudo, fenômenos análogos já foram relatados filmes a base de perovskita submetidos a envelhecimento (Yang *et al.*, 2023b), filmes de ZnO (Nowak *et al.*, 2024) e filmes de B_2O_4 dopados com Zr (Kayani *et al.*, 2024). Nesses casos, a diminuição do *bandgap* pode estar relacionada com defeitos microestruturais, vacâncias de oxigênio e desordem interfacial, que promovem estados intermediários dentro da banda proibida, facilitando transições ópticas de menor energia (Bassalo, 1994).

Tabela 16: *Bandgap* dos filmes de Cromo mediante todos os ambientes de exposição.

Amostra	Configuração	Exposição	E_g (eV)	α (%)	λ (nm)
S	Substrato	Depositado	2,62	78,26	473
S1	Cr		2,71	79,49	458
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		2,30	99,46	539
S3	Cr/Cr ₂ O ₃		2,22	99,39	559
S	Substrato	UV-C	2,67	77,88	464
S1	Cr		2,69	79,05	461
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		1,45	85,97	855
S3	Cr/Cr ₂ O ₃		1,63	84,78	761
S	Substrato	UV-A	2,73	77,81	454
S1	Cr		2,67	79,53	464
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		1,46	85,83	849
S3	Cr/Cr ₂ O ₃		1,49	83,54	832
S	Substrato	Protótipo	2,73	73,97	454
S1	Cr		2,66	78,18	466
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		1,46	84,97	849
S3	Cr/Cr ₂ O ₃		1,37	85,90	905
S	Substrato	Mufla	2,74	76,98	453
S1	Cr		2,71	79,40	458
S2	Cr + Cr/Cr ₂ O ₃		1,42	83,57	873
S3	Cr/Cr ₂ O ₃		1,32	84,46	939

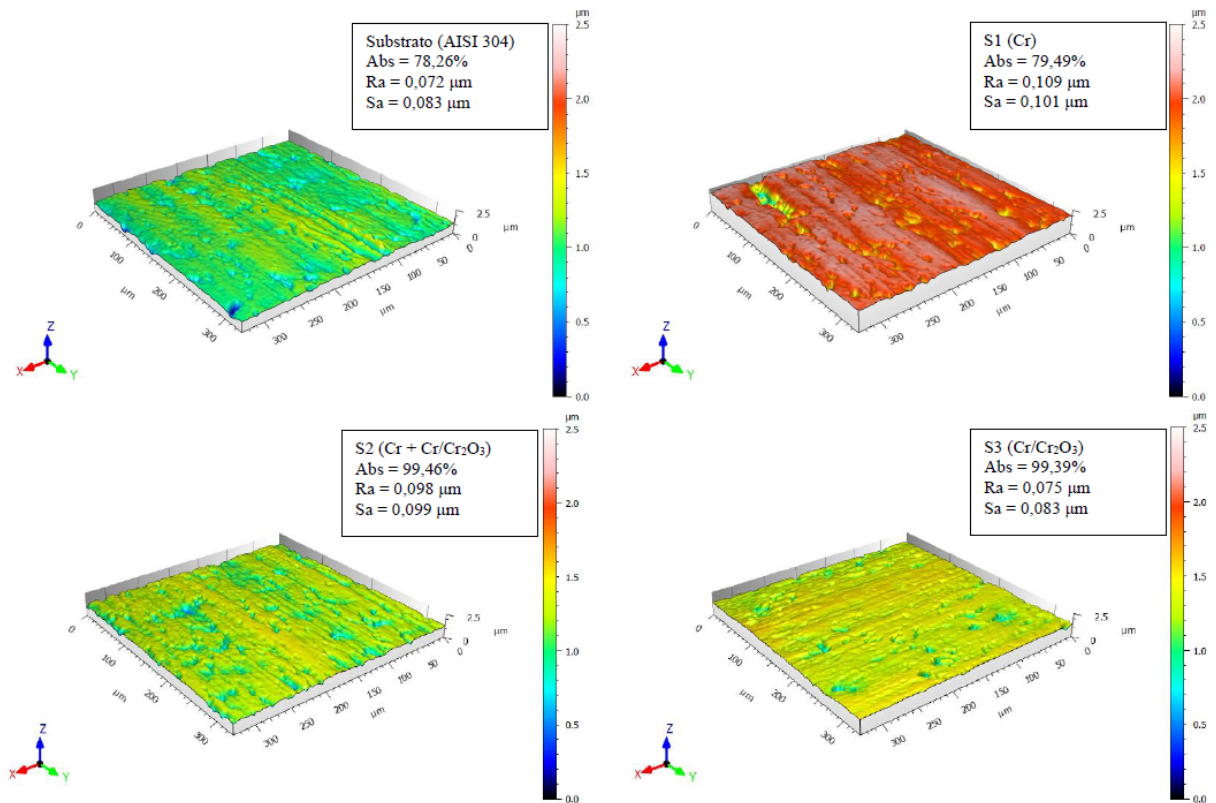
Fonte: Autor (2026)

4.4 EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NA RUGOSIDADE DOS FILMES

4.4.1 ANÁLISE DOS PERFIS TOPOGRÁFICOS

4.4.1.a Depositados ($T = 25^\circ\text{C}$)

A Figura 38 apresenta os resultados topográficos das amostras que não foram submetidas a nenhum ambiente de exposição. As escalas laterais foram normalizadas para permitir uma comparação direta entre todas as superfícies analisadas, e cada imagem inclui um box com informações referentes à identificação da amostra, valores de rugosidade e absorvância. Uma amostra do substrato também foi incluída no conjunto, de modo a permitir a avaliação do crescimento dos filmes em relação à superfície base. Complementarmente, abaixo da figura é apresentada a Tabela 17 que sumariza os principais parâmetros medidos, facilitando a interpretação e a análise conjunta dos dados obtidos.

Figura 38: Mapa 3D de perfilometria dos filmes depositadas.

Fonte: Autor (2026)

Tabela 17: Parâmetros de rugosidade superficial das amostras depositadas.

Amostras	Abs (%)	Ra (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Sa (μm)
Substrato	78,26	0,072	—	—	0,083
S1 (Cr)	79,49	0,109	0,277	0,758	0,101
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)	99,46	0,099	0,237	0,640	0,098
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)	99,39	0,075	0,194	0,547	0,083

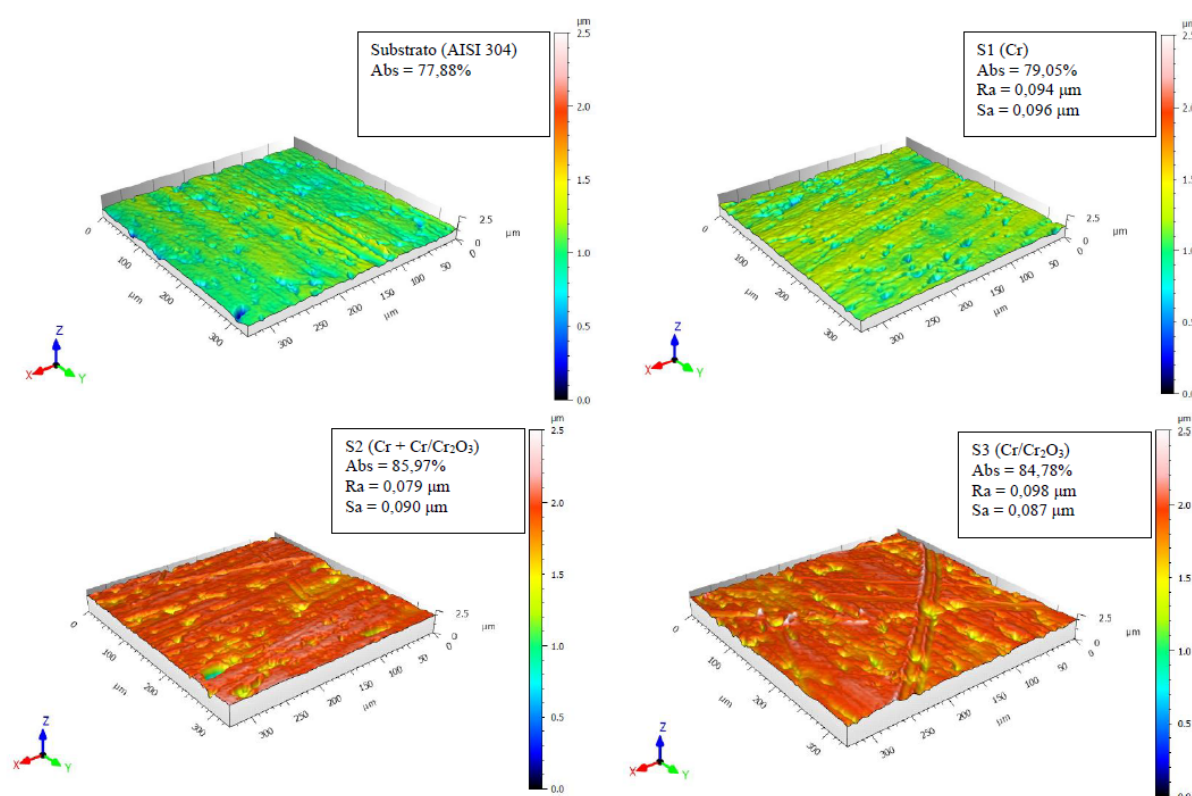
Fonte: Autor (2026)

As análises obtidas a partir dos mapas 3D possuem caráter qualitativo, baseando-se na escala de cores que varia do vermelho (regiões de maior relevo, indicando menor perda estrutural) ao azul escuro (regiões mais profundas, associadas à maior degradação da superfície) (Cuozzo *et al.*, 2022). Nesse contexto, a partir da observação dos mapas apresentados, a amostra S1 (Cr) exhibe predominantemente tonalidades avermelhadas, sugerindo baixa perda estrutural, além de apresentar os maiores valores entre os parâmetros de rugosidade (Ra e Sa). Embora as amostras S2 e S3 apresentem colorações intermediárias — variando entre tons de amarelo e verde, associados a regiões de relevo moderado — seus valores de absorvância são superiores aos observados para a amostra S1 e para o substrato.

4.4.1.b Exposição UV-C

A Figura 39 apresenta os resultados topográficos das amostras que foram submetidas à exposição UV-C. A radiação UV-C possui características extremamente energéticas, capazes de promover rupturas em ligações químicas superficiais e desencadear processos fotodegradativos mesmo em materiais relativamente estáveis. O substrato e a amostra S1 (Cr) apresentam mapas com colorações intermediárias – variando entre tons de verde e amarelo. Já as amostras S2 (Cr + Cr/Cr₂O₃) e S3 (Cr/Cr₂O₃) apresentam mapas com tonalidade predominantemente em tons avermelhados, indicando que mesmo havendo redução nos valores de rugosidade (Ra e Sa), não houve perda estrutural quando comparado aos filmes sem exposição.

Figura 39: Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição à radiação UV-C.



Fonte: Autor (2026)

A Tabela 18 reúne os principais parâmetros medidos. O menor valor de Ra é notado no filme com multicamada (Cr + Cr/Cr₂O₃), bem como o parâmetro Sa. O filme composto pelo Cermet (Cr/Cr₂O₃) apresentou a menor variação entre os valores de picos (Rp) e vales (Rv), o que pode indicar uma maior estabilidade morfológica frente ao processo de degradação fotoinduzida. Pode-se dizer que essa baixa discrepância entre o Rp e Rv sugere que a radiação UV-C não promoveu irregularidades significativas na superfície do Cermet.

Tabela 18: Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas à exposição UV-C.

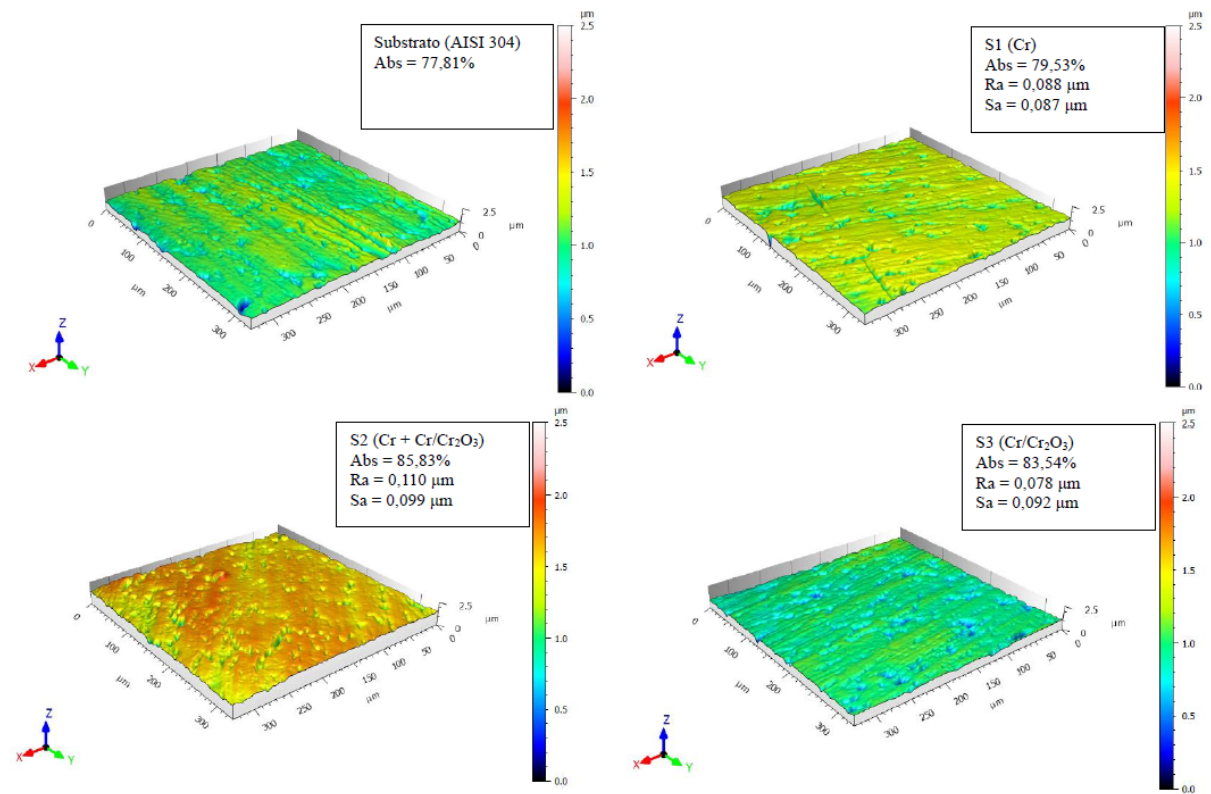
Amostras	Abs (%)	Ra (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Sa (μm)
Substrato	77,88	—	—	—	—
S1 (Cr)	79,05	0,094	0,284	0,751	0,096
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)	85,97	0,079	0,183	0,576	0,090
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)	84,78	0,087	0,402	0,587	0,098

Fonte: Autor (2026)

4.4.1.c *Exposição UV-A*

A Figura 40 apresenta os resultados topográficos das amostras que foram submetidas à exposição UV-A. Embora possua menor energia fotônica quando comparado ao UV-C, tende a promover mecanismos de degradação mais lentos e progressivos, frequentemente associados à oxidação superficial e rearranjo morfológico.

Figura 40: Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição à radiação UV-A.



Fonte: Autor (2026)

De acordo com os mapas topográficos, o substrato e o filme de Cromo apresentaram morfologias semelhantes às amostras que foram expostas a radiação UV-C. No entanto, o filme com multicamada apresentou perfil com tonalidade entre o vermelho e amarelo, indicando baixa

perda estrutural, corroborando com o maior valor de absorvência e parâmetros de rugosidade (Ra e Sa). Já o filme composto pelo Cermet apresentou perfil topográfico na coloração azulada, indicando alta perda estrutural, sendo evidenciado através do menor valor de absorvência e parâmetro Ra. A Tabela 19 apresenta os resultados dos principais parâmetros medidos.

Tabela 19: Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas à exposição UV-A.

Amostras	Abs (%)	Ra (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Sa (μm)
Substrato	77,81	–	–	–	–
S1 (Cr)	79,53	0,088	0,342	0,739	0,087
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)	85,83	0,110	0,382	0,864	0,099
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)	83,54	0,078	0,211	0,468	0,092

Fonte: Autor (2026)

4.4.1.d Exposição ao Protótipo

A Figura 41 apresenta os resultados topográficos das amostras submetidas à exposição à radiação infravermelha gerada pelo protótipo fototérmico. Esse tipo de radiação, induz aquecimento localizado e gradientes térmicos mais pronunciados, tendendo a acelerar mecanismos de difusão, oxidação e relaxamento de tensões residuais nos filmes.

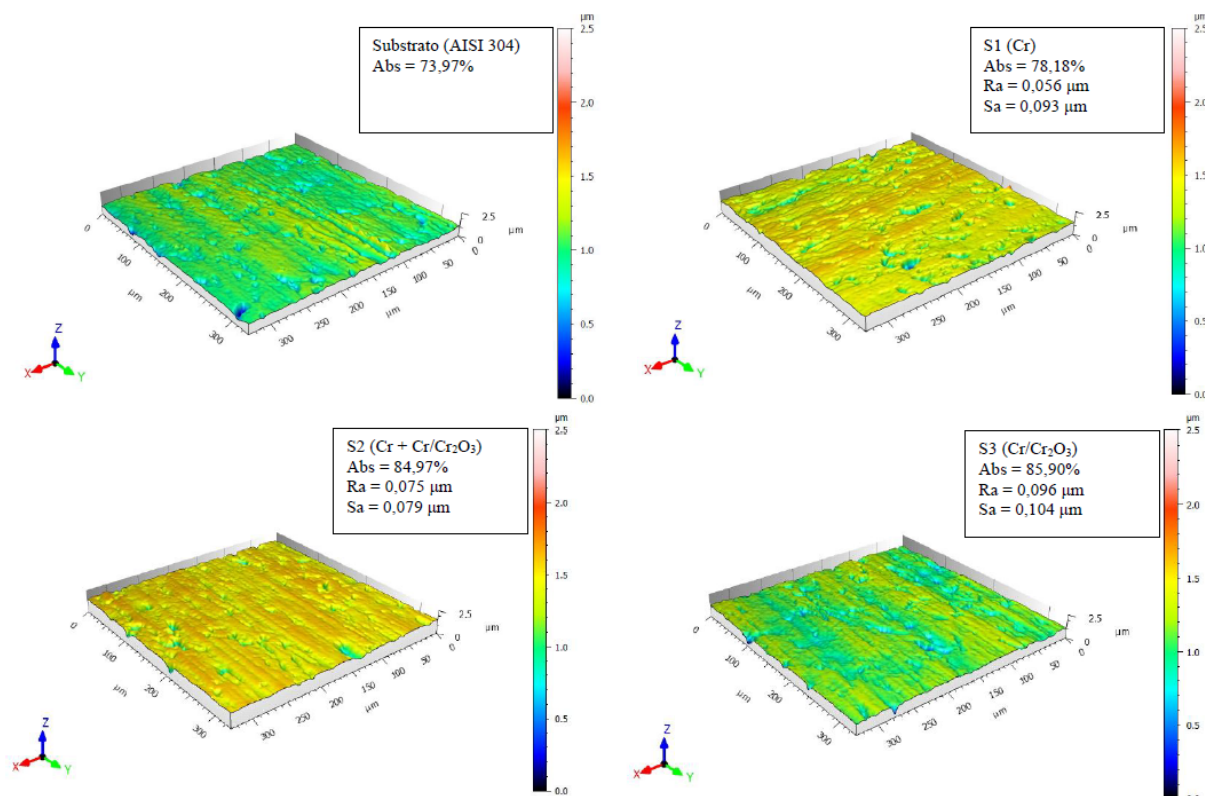
Conforme os mapas topográficos, o substrato e o filme de Cromo apresentaram morfologias semelhantes à exposição UV-C e UV-A, com tonalidade verde e o amarelo. O filme composto pelo Cermet foi o que apresentou maior valor de absorvência e parâmetro Sa, e valor intermediário de Ra. A Tabela 20 apresenta os resultados dos principais parâmetros medidos.

Tabela 20: Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas à exposição Infravermelha do protótipo.

Amostras	Abs (%)	Ra (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Sa (μm)
Substrato	73,97	–	–	–	–
S1 (Cr)	78,18	0,056	0,197	0,575	0,093
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)	84,97	0,075	0,183	0,616	0,079
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)	85,90	0,096	0,209	0,619	0,104

Fonte: Autor (2026)

Figura 41: Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição ao protótipo fototérmico.



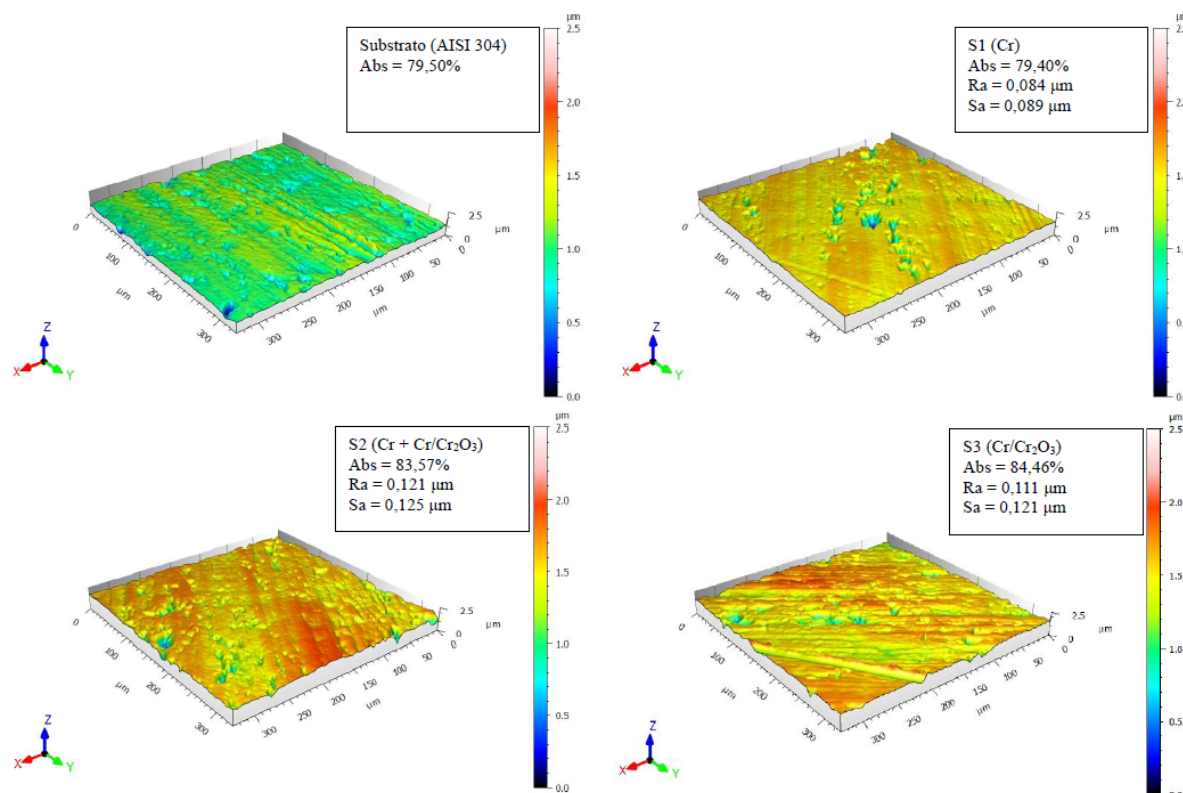
Fonte: Autor (2026)

4.4.1.e Exposição ao Forno Mufla

A Figura 42 apresenta os resultados topográficos das amostras submetidas ao envelhecimento térmico em forno mufla. Pode-se observar que o mapa topográfico do substrato permanece praticamente inalterado em todos os ambientes de exposição, indicando que, independentemente das condições aplicadas, o aço inoxidável AISI 304 não apresentou perdas estruturais significativas. Esse comportamento reforça sua estabilidade superficial e resistência intrínseca aos mecanismos de degradação envolvidos nos diferentes ciclos de envelhecimento.

Já os demais filmes – Cr, Cermet e multicamada – apresentaram mapas topográficos bem semelhantes, tendo o filme S2 com o menor valor de absorvância e maiores valores do parâmetro de rugosidade (Ra e Sa). Esse comportamento de rugosidade crescente no filme S3 após exposição a temperatura está em conformidade com estudos anteriores que apontam que a oxidação superficial tende a induzir rearranjos morfológicos e crescimento de grãos (Lee; Jung; Kim, 2000). Tais alterações modificam o padrão de espalhamento óptico e explicam a leve variação na absorvância observada nas amostras S2 e S3.

Figura 42: Mapa 3D de perfilometria dos filmes após exposição ao forno mufla.



Fonte: Autor (2026)

Tabela 21: Parâmetros de rugosidade superficial das amostras submetidas ao forno mufla.

Amostras	Abs (%)	Ra (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Sa (μm)
Substrato	79,50	—	—	—	—
S1 (Cr)	79,40	0,084	0,203	0,363	0,089
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)	83,57	0,121	0,329	0,735	0,125
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)	84,46	0,111	0,291	0,681	0,121

Fonte: Autor (2026)

4.4.1.f Avaliação da Espessura e Comparativo entre os ambientes de Exposição

A Tabela 22 apresenta um resumo comparativo entre os filmes depositados, expostos em ambientes fototérmico e térmico, de modo a evidenciar as variações nos parâmetros de rugosidade e da espessura estimada (experimental e calculada) decorrentes de cada condição de envelhecimento.

A espessura foi estimada experimentalmente por meio da técnica de batente, na qual se realiza uma marcação no substrato para gerar uma descontinuidade na superfície, permitindo medir a diferença de altura entre o filme e o material base (Legenda *). Além da abordagem

experimental, a espessura dos filmes também foi estimada por meio de modelagem matemática a partir dos espectros de reflectância, utilizando duas abordagens complementares (Legenda **).

Tabela 22: Parâmetros de rugosidade superficial média e estimativa das espessuras, experimental e calculada.

Amostras	Exposição	Abs %	Ra (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Sa (μm)	Espessura (nm)
S1 (Cr)	Depositado*	79,49	0,109	0,277	0,758	0,101	619
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)		99,46	0,099	0,237	0,640	0,098	735
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)		99,39	0,075	0,194	0,547	0,083	674
S1 (Cr)	Depositado**	79,49	0,109	0,277	0,758	0,101	468
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)		99,46	0,099	0,237	0,640	0,098	330
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)		99,39	0,075	0,194	0,547	0,083	254
S1 (Cr)	UV-C**	79,05	0,094	0,284	0,751	0,096	414
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)		85,97	0,079	0,183	0,576	0,090	318
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)		84,78	0,087	0,402	0,587	0,098	483
S1 (Cr)	UV-A**	79,53	0,088	0,342	0,739	0,087	540
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)		85,83	0,110	0,382	0,864	0,099	342
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)		83,54	0,078	0,211	0,468	0,092	413
S1 (Cr)	Protótipo**	78,18	0,056	0,197	0,575	0,093	294
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)		84,97	0,075	0,183	0,616	0,079	294
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)		85,90	0,118	0,209	0,619	0,104	253
S1 (Cr)	Mufla**	79,40	0,084	0,203	0,363	0,089	345
S2 (Cr + Cr/Cr ₂ O ₃)		83,57	0,121	0,329	0,735	0,125	301
S3 (Cr/Cr ₂ O ₃)		84,46	0,111	0,291	0,681	0,121	292

* Espessura Experimental

** Espessura Calculada

Fonte: Autor (2026)

Na primeira, o índice de refração n foi calculado adotando-se o valor de reflectância associado à região de maior absorção óptica do filme, utilizando o comprimento de onda correspondente ao ponto de máxima resposta espectral. Essa escolha se justifica pelo fato de tal região representar o comportamento óptico mais sensível à interação luz-material.

Na segunda abordagem, empregou-se o comprimento de onda correspondente à energia de bandgap óptico, determinado previamente pela construção da curva de Tauc. Nessa faixa espectral, a transição eletrônica do material tende a produzir respostas ópticas mais estáveis e representativas da estrutura eletrônica, favorecendo a determinação de n em condições fisicamente bem definidas (Victoria; Raj; Ravidhas, 2015). Em ambos os procedimentos, os valores

de reflectância selecionados foram aplicados às relações analíticas propostas por Sousa *et al.* (2024) através da Eq. 10, possibilitando a obtenção das espessuras dos filmes pelo método da interferência proposto por Swanepoel (1983) por meio da Eq. 11.

Com base nos cálculos efetuados, foi possível realizar a comparação entre as espessuras experimentais e aquelas obtidas por modelagem óptica para os diferentes filmes, tanto no estado depositado quanto após os ensaios de envelhecimento. Os valores experimentais obtidos pela técnica de batente situam-se na faixa de 619–735 nm, refletindo a espessura efetivamente depositada e servindo como referência para a análise subsequente.

Já as espessuras calculadas, obtidas a partir dos espectros de refletância, resultaram em valores os experimentais, variando tipicamente entre 250 e 540 nm nas diferentes condições de exposição. Essa redução pode ser atribuída às simplificações necessárias do modelo óptico empregado e às mudanças induzidas nos parâmetros ópticos dos filmes, que alteram a solução matemática do problema. Ainda assim, os valores obtidos matematicamente permanecem em coerência com achados da literatura para o sistema utilizado (Cr/Cr₂O₃), evidenciando que a modelagem captura adequadamente as tendências gerais, mesmo quando há desvios absolutos em relação ao valor experimental.

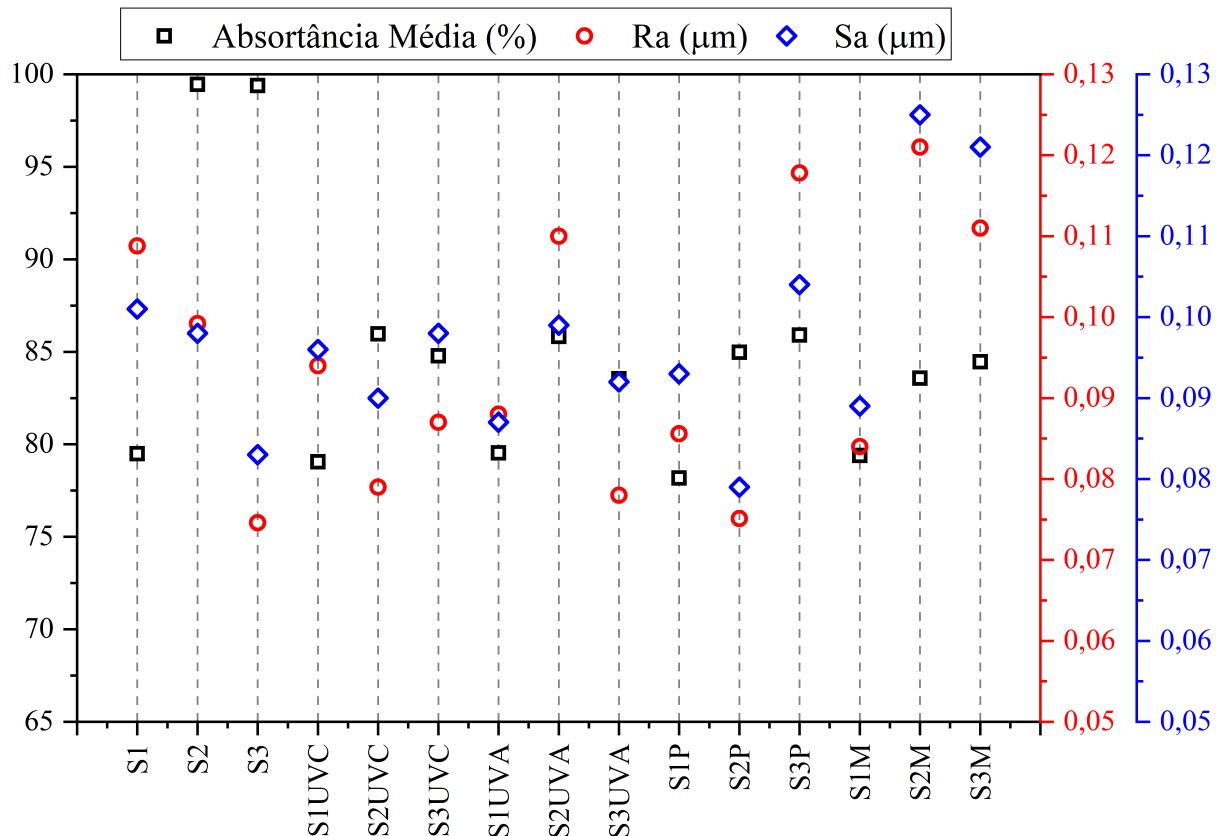
Fazendo uma análise comparativa entre as condições de exposição, observa-se que os filmes submetidos à radiação UV-C, UV-A e ao protótipo fototérmico apresentaram espessuras calculadas semelhantes às do estado depositado**, indicando que os tratamentos não induziram remoção significativa de material ou colapso estrutural detectável pelo método óptico. Por outro lado, os filmes expostos ao forno mufla exibiram espessuras calculadas ligeiramente inferiores, especialmente para o S1 (Cr) e S3 (Cr/Cr₂O₃).

Entre os materiais estudados, o filme S3 (Cr/Cr₂O₃) mostrou maior estabilidade, apresentando variações menores e comportamento mais consistente entre os diferentes ambientes de exposição, o que é coerente com sua natureza cerâmica e maior resistência térmica. Assim, embora as espessuras calculadas não representem diretamente a espessura física, elas fornecem informações complementares sobre como cada condição de envelhecimento altera o comportamento óptico e a interação da luz com as camadas depositadas.

A relação entre a absorvância média (α) e os parâmetros de rugosidade (Ra e Sa) evidencia que o controle topográfico exerce papel crucial no desempenho final dos filmes seletivos, conforme Figura 43. Observa-se que superfícies mais uniformes e compactas (menores Ra e Sa) tendem a apresentar maior α , devido à redução das perdas por reflexão especular e ao me-

lhora acoplamento da radiação incidente. Entretanto, após a exposição ao protótipo fototérmico, a amostra S3 apresentou aumento simultâneo de Ra, Sa e α , sugerindo que a oxidação superficial pode ter ocasionado a geração de microestruturas capazes de aprisionar a luz e aumentar a absorção – quando comparado aos outros regimes de exposição.

Figura 43: Relação entre a absorvância média e a rugosidade superficial.



Fonte: Autor (2026)

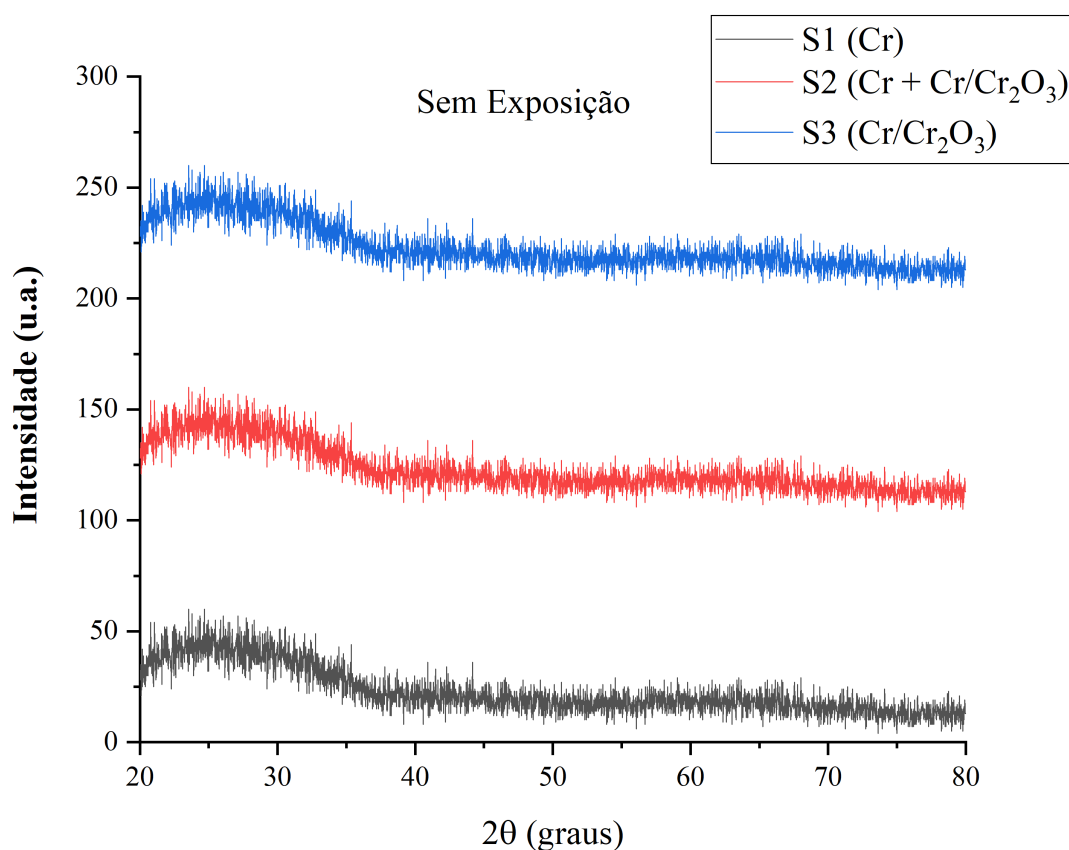
4.5 EFEITO DO TRATAMENTO FOTOTÉRMICO E TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS FILMES

4.5.1 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Os resultados obtidos a partir das análises por difração de Raios-X dos filmes fabricados são apresentados a seguir. A Figura 44 exibe os resultados para os filmes depositados, ou seja, aqueles filmes que não foram submetidos a algum tipo de exposição ou tratamento térmico. De maneira geral, observou-se que em todos os filmes nesta condição exibiram um perfil amorfo, caracterizado pela presença de um halo difuso entre 20° e 30°.

A presença de um halo amorfo é um fenômeno característico de materiais vítreos, que carecem de periodicidade em sua estrutura atômica ou molecular de longo alcance. Esse comportamento indica a ausência de cristalinidade ou de picos de difração bem definidos (Strachan *et al.*, 2021). No trabalho de Silva Neto *et al.* (2019), foi detectada a existência de halos amorfos em filmes de Cr/SiO_2 depositados tanto em substratos de aço quanto de cobre. Segundo os autores, tal fenômeno decorreu, provavelmente, da presença de SiO_2 na amostra associada ao aumento do ângulo de incidência. No entanto, como os filmes desenvolvidos nesta tese não contêm SiO_2 , conclui-se que a característica amorfa observada nos difratogramas é atribuída exclusivamente ao substrato de vidro utilizado nas amostras de referência.

Figura 44: Análises por Difração de Raios-X nas amostras em estado inicial.

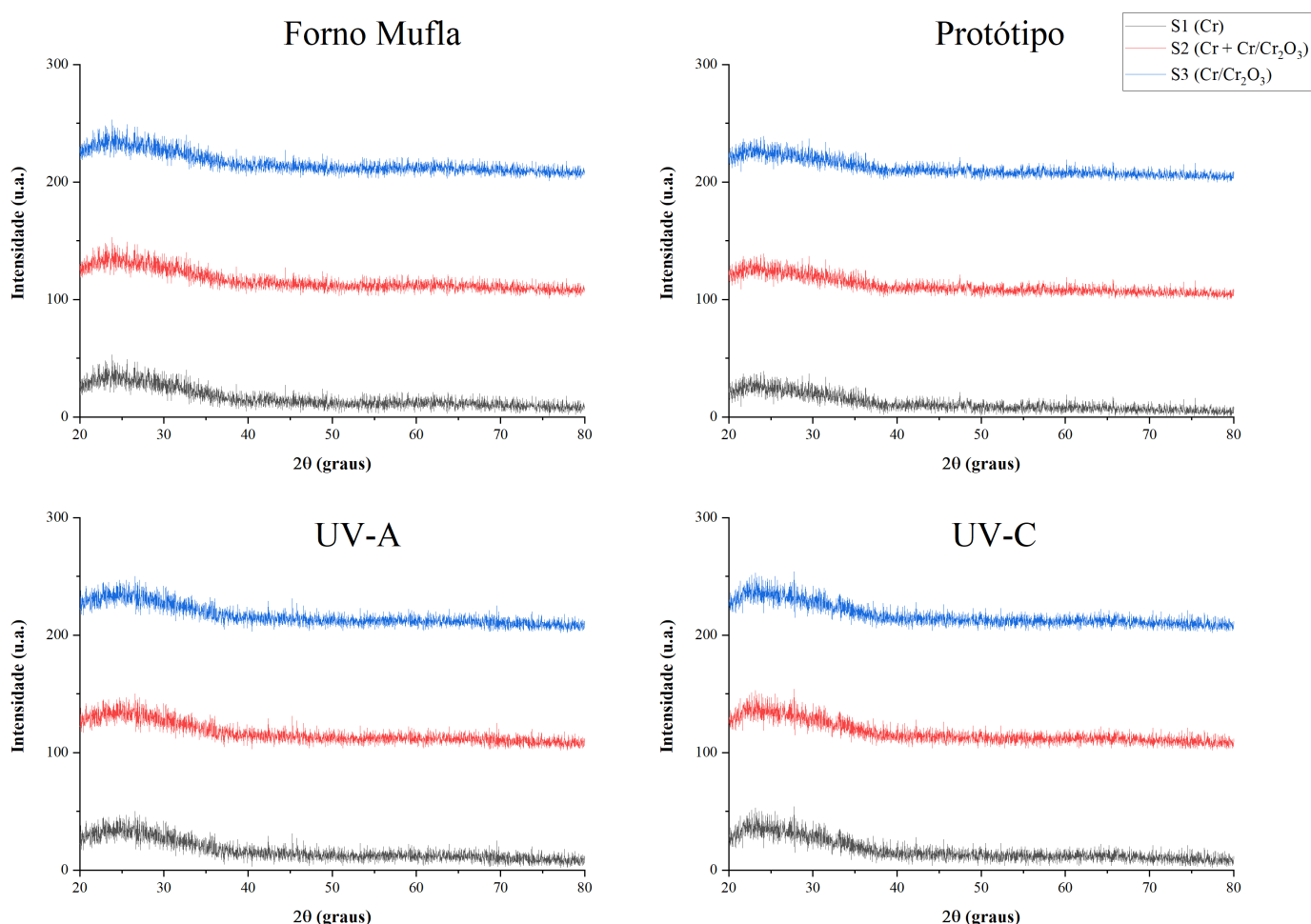


Fonte: Autor (2026)

Comportamentos similares foram identificados nos filmes submetidos à exposição fotocatalítica (UV-C e UV-A) e aos tratamentos térmicos e fototérmicos. As amostras expostas à radiação UV-C (Figura 45) e UV-A mantiveram perfis estritamente amorfos, indicando que a radiação ultravioleta, isoladamente, não foi capaz de alterar a organização atômica de longo

alcance das camadas. Da mesma forma, os filmes envelhecidos no protótipo fototérmico conservaram integralmente essa característica, sem quaisquer evidências de cristalização induzida. Tal resultado valida a estabilidade estrutural dos revestimentos frente à ação simultânea de radiação e temperatura ($\approx 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) no dispositivo desenvolvido, demonstrando que tais condições não atingiram o limiar energético necessário para promover mudanças de fases. Por fim, os ensaios conduzidos em forno mufla confirmaram a manutenção do caráter amorfo em todas as configurações. Em conjunto, os resultados de DRX ratificam a robustez estrutural das superfícies seletivas produzidas, as quais preservaram sua natureza desordenada independentemente do regime de envelhecimento aplicado.

Figura 45: Análises por Difração de Raios-X nas amostras em estado de exposição.



Fonte: Autor (2026)

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

5.1 ABSORTIVIDADE DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS

A análise da absorptividade hemisférica total revelou distinções fundamentais no comportamento das superfícies seletivas frente aos diferentes mecanismos de degradação. O substrato de aço inoxidável AISI 304, embora estável sob radiação ultravioleta isolada (UV-C e UV-A), apresentou um decréscimo acentuado de desempenho quando submetido ao protótipo fototérmico. Este fenômeno evidencia o efeito sinérgico entre radiação e gradiente térmico, confirmando que o calor atua como catalisador em processos de oxidação e reestruturação morfológica da superfície metálica.

Quanto aos revestimentos depositados, a monocamada de cromo (S1) apresentou propriedades ópticas limitadas, sem incrementos expressivos na absorção solar em relação ao substrato. Em contrapartida, as arquiteturas baseadas em Cermet demonstraram desempenho superior e maior resiliência. A configuração em multicamada (Cr + Cr/Cr₂O₃) manteve absorptividades em patamares elevados, enquanto o Cermet Cr/Cr₂O₃ (S3) consolidou-se como o sistema de maior eficiência global, atingindo 85,90% de absorptividade pós-exposição no protótipo. Estes resultados validam a incorporação de camadas dielétricas/compósitas como estratégia essencial para a obtenção de absorvedores estáveis e de alto desempenho.

5.2 ANÁLISE MORFOLÓGICAS DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS

As análises topográficas revelaram que os filmes, em seu estado inicial, possuem superfícies homogêneas e baixa rugosidade, atestando a qualidade e a uniformidade do processo de deposição via *Magnetron Sputtering*.

Enquanto a radiação UV-C e UV-A promoveu alterações discretas nos parâmetros de rugosidade, as condições de estresse térmico foram as principais responsáveis pelas modificações texturais. O protótipo fototérmico induziu uma suavização moderada dos picos, ao passo que o tratamento em forno mufla (100 °C) resultou no aumento mais expressivo da rugosidade superficial (S_a), particularmente nas amostras contendo óxidos. Conclui-se, portanto, que os

filmes apresentam notável estabilidade morfológica, mantendo a continuidade física e a ausência de danos estruturais severos (como delaminação ou trincas) mesmo sob condições térmicas intensas.

5.3 ANÁLISE ESTRUTURAL E QUÍMICA DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS

Em todas as amostras avaliadas, as análises indicam que o caráter amorfo observado nos difratogramas é uma resposta característica da interação entre os filmes finos e o substrato de vidro, o qual não possui periodicidade atômica de longo alcance. Diferente de sistemas que utilizam camadas de SiO_2 na composição do filme, as superfícies seletivas desenvolvidas nesta tese baseiam-se estritamente em camadas de cromo e seus óxidos ($\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$), mantendo-se estruturalmente estáveis e desordenadas após todos os ensaios. Em síntese, os resultados corroboram a elevada estabilidade química das superfícies seletivas produzidas por Magnetron Sputtering, fornecendo suporte para a discussão integrada das propriedades ópticas e funcionais, além de validar o protótipo como um ambiente de teste que preserva a integridade dos materiais enquanto acelera sua avaliação fototérmica.

5.4 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO PROTÓTIPO

A avaliação funcional do protótipo fototérmico demonstrou que o sistema atende aos objetivos propostos para a pesquisa. Os testes realizados com diferentes intervalos de aquisição de dados evidenciaram a importância de ajustes no tempo de coleta, sendo que intervalos maiores reduziram significativamente o ruído e melhoraram a confiabilidade das medições. A rodada preliminar de validação permitiu confirmar o correto funcionamento do código de aquisição, bem como a eficiência das rotinas de extração e geração de gráficos no ambiente MATLAB/Simulink.

A exposição de filmes finos à base de cromo comprovou que o protótipo é capaz de promover condições controladas de envelhecimento fototérmico, gerando dados estáveis e adequados para análises subsequentes de propriedades ópticas e morfológicas. Apesar de limitações observadas, como a intensidade máxima da radiação e a sensibilidade dos sensores, o dispositivo se mostrou robusto, de baixo custo e facilmente operável, confirmando sua aplicabilidade como ferramenta experimental confiável para estudos de superfícies seletivas solares.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de melhorias para versões futuras do protótipo, destaca-se:

- **Monitoramento "Offshore"(IoT):** Desenvolver um sistema *web* para acompanhamento em tempo real do "Protótipo 2.0", permitindo a aquisição de dados remota e análise de desempenho em nuvem;
- **Ensaio de Emissividade:** Medir a emissividade térmica (ε) pós-envelhecimento para calcular a seletividade global (α/ε);
- **Estudo de Corrosão:** Realizar ensaios de névoa salina (*Salt Spray*) para avaliar a resistência das camadas em ambientes corrosivos;
- **Simulação Computacional:** Utilizar modelagem numérica para prever o tempo de vida útil do seletor solar com base nos dados de degradação obtidos;
- **Estrutura física:** Aperfeiçoar o design termomecânico do protótipo para garantir maior uniformidade de temperatura na placa absorvedora;
- **Materiais:** Investigar a deposição de camadas antirreflexo (como SiO_2 ou Al_2O_3) e a dopagem da matriz de *cermet* com elementos de transição para elevar a estabilidade química frente à radiação UV e oxidação térmica.

Referências Bibliográficas

- ABED, R. N. *et al.* Enhancing optical properties of modified PVC and Cr₂O₃ nanocomposite. **Transactions on Electrical and Electronic Materials**, Springer, v. 22, n. 3, p. 317–327, 2021.
- AGNIHOTRI, O.; GUPTA, B. K. Solar selective surfaces. **New York**, 1981.
- ALENCASTRO, F. S. **Filmes finos de Ti/SiO₂ produzidos por Magnetron Sputtering para aplicação em coletores solares**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- ARAÚJO, F. A. A. *et al.* Study of surfaces, produced with the use of granite and titanium, for applications with solar thermal collectors. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 60, n. 1, p. 47–56, 2021.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of informetrics**, Elsevier, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- ASAAD YASSEEN, A.-R.; ISTVAN, S.; ISTVAN, F. Selective absorber coatings and technological advancements in performance enhancement for parabolic trough solar collector. **Journal of Thermal Science**, Springer, v. 31, n. 6, p. 1990–2008, 2022.
- BARROS, H. W. S. **Crescimento de Subóxidos de Ti por Grid-Assisted Magnetron Sputtering Reativo: Modificações das Propriedades Elétricas e Ópticas Através da Inserção de Oxigênio**. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.
- BARSHILIA, H. C. *et al.* Spectrally selective NbAlN/NbAlON/Si₃N₄ tandem absorber for high-temperature solar applications. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 92, n. 4, p. 495–504, 2008.
- BARSHILIA, H. C. *et al.* Structure and optical properties of pulsed sputter deposited Cr_xO_y/Cr/Cr₂O₃ solar selective coatings. **Journal of applied physics**, American Institute of Physics, v. 103, n. 2, p. 023507, 2008.
- BASSALO, J. M. F. A crônica da física do estado sólido: III teoria de bandas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 16, p. 1–4, 1994.
- BOUBAULT, A. *et al.* Durability of solar absorber coatings and their cost-effectiveness. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 166, p. 176–184, 2017.
- BRASIL. Portaria n° 465, de 03 de outubro de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/habita/mcmv/Portaria_465_2011_FAR.pdf>
- BRUNOLD, S. *et al.* Accelerated life testing of solar absorber coatings: Testing procedure and results. **Solar Energy**, Elsevier, v. 68, n. 4, p. 313–323, 2000.
- CALLISTER JR, W.; RETHWISCH, D. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAO, F. *et al.* A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers. **Energy & Environmental Science**, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 5, p. 1615–1627, 2014.

CAO, Y.; HU, X. Absorbing film on metal for solar selective surface. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 375, n. 1-2, p. 155–158, 2000.

CARLSSON, B. *et al.* Accelerated life testing of solar energy materials: Case study of some selective solar absorber coating materials for DHW systems. a report of task 10 solar materials research and development. **NASA STI/Recon Technical Report N**, v. 95, p. 22362, 1994.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2012.

CONG, W. *et al.* Preparation and optical properties of Nb-NbN multilayer films as solar selective absorptive coatings. **Rare Metals**, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 355–359, 2006.

CORREIA, E. d. S.; DANTAS, J. d. M.; ANDRADE, J. E. d. Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de ensino médio sob um olhar da teoria de bandas de energia. **Scientia Plena**, v. 13, n. 1, 2017.

CUOZZO, N. S. *et al.* Avaliação de adaptação e molhamento de resinas de diferentes viscosidades à parede de fundo de cavidades classe i. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 5, n. 2, p. 4990–5000, 2022.

DUTRA, K. H. *et al.* Characterization of a selective surface based on chromium, iron and aluminum oxides for application in solar-thermal collectors. **Materials Research**, SciELO Brasil, v. 25, p. e20210489, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **EPE: Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro, 2022. 292 p.

ESCOBEDO-MORALES, A. *et al.* Automated method for the determination of the band gap energy of pure and mixed powder samples using diffuse reflectance spectroscopy. **Heliyon**, Elsevier, v. 5, n. 4, 2019.

FARCHADO, M. *et al.* High performance selective solar absorber stable in air for high temperature applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 271, p. 112849, 2024.

FELDMAN, D. C. Índice de reprodução de cor. **Lume Arquitetura**, n. 70, p. 66–71, 2014.

FOX, M. **Optical properties of solids**. New York: Oxford university press, 2010. v. 3.

FRAIDENRAICH, N. *et al.* **Ciência e Tecnologia Solar no Brasil: 60 anos**. Porto Alegre, RS: AGE, 2023. ISBN 978-65-5863-164-4.

GALVÃO, G. O. **Avaliação da influência dos parâmetros de fabricação e da adição de camadas antirreflexivas em filmes absorvedores de Cr-Cr₂O₃ obtidos via Magnetron Sputtering**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

GOMES, C. A. S. **Estudo Comparativo de Superfícies Seletivas para Coletores Solares**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) — Universidade Federal da Ceará, Fortaleza, 2001.

GOMES, K. C. *et al.* Superfície seletiva solar a base de cinza do bagaço da cana-de-açúcar via deposição por pintura. **Revista InterScientia**, v. 5, n. 1, p. 64–74, 2017.

GONÇALVES, K. d. S. **Efeito do Envelhecimento Acelerado nas Propriedades Ópticas, Morfológicas e Microestruturais de superfícies absorvedoras multicamadas a base de Cromo e Sílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Renováveis) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

GONÇALVES, R. P. d. N. **Avaliação dos efeitos do envelhecimento em superfícies seletivas solares de Cromo (Cr_xO_y) a partir do processo de eletrodeposição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

HARDCASTLE, H. K.; JORGENSEN, G. J.; BINGHAM, C. E. Ultra-accelerated weathering system i: Design and functional. 2010.

HOLLANDS, K. *et al.* Effect of selective surface degradation on the performance of solar water heating systems. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 25, n. 1-2, p. 125–141, 1992.

HONG, S. *et al.* On measurement of optical band gap of chromium oxide films containing both amorphous and crystalline phases. **Journal of non-crystalline solids**, Elsevier, v. 221, n. 2-3, p. 245–254, 1997.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos da transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos da transferência de Calor e Massa**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12952,2**: Solar energy - materials for flat-plate collector - qualification test procedures for solar surface durability. Genebra, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 25178**: Geometrical product specifications (gps) — surface texture: Areal — part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. Genebra, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22975**: Solar energy - collector components and materials – part 3: Absorber surface durability. Genebra, 2014. 34 p.

JAFARI, S.; ROZATI, S. Characterization of black chrome films prepared by electroplating technique. In: **Proceedings of the World Renewable Energy Congress**. Linköping: Citeseer, 2011. p. 3999–4005.

JANICKI, V. *et al.* Optical and structural properties of Nb₂O₅-SiO₂ mixtures in thin films. **Surface and Coatings Technology**, Elsevier, v. 206, n. 17, p. 3650–3657, 2012.

JORGENSEN, G. *et al.* **Use of uniformly distributed concentrated sunlight for highly accelerated testing of coatings**. Golden, CO, 2000.

JOSE, S. A.; JOHN, M.; MENEZES, P. L. Cermet systems: synthesis, properties, and applications. **Ceramics**, MDPI, v. 5, n. 2, p. 210–236, 2022.

KASPAR, T. C. *et al.* Impact of lattice mismatch and stoichiometry on the structure and bandgap of (Fe, Cr)₂O₃ epitaxial thin films. **Journal of Physics: Condensed Matter**, IOP Publishing, v. 26, n. 13, p. 135005, 2014.

KAYANI, Z. N. *et al.* Optimization of nanostructured Zr doped bismuth oxide (Bi₂O₄) thin films for physical and biological properties. **Ceramics International**, Elsevier, v. 50, n. 4, p. 6854–6869, 2024.

KEMPE, M. D. Accelerated UV test methods and selection criteria for encapsulants of photovoltaic modules. In: **33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. San Diego, CA: IEEE, 2008. p. 1–6.

KENNEDY, C. E. Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials. **National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US)**, 2002.

KIZILDAG, D. *et al.* First test field performance of highly efficient flat plate solar collectors with transparent insulation and low-cost overheating protection. **Solar Energy**, Elsevier, v. 236, p. 239–248, 2022.

KÖHL, M. *et al.* Accelerated ageing test procedures for selective absorber coatings including lifetime estimation and comparison with outdoor test results. **Solar energy materials**, Elsevier, v. 19, n. 3-5, p. 257–313, 1989.

KOKOROPOULOS, P.; SALAM, E.; DANIELS, F. Selective radiation coatings. preparation and high temperature stability. **Solar Energy**, Elsevier, v. 3, n. 4, p. 19–23, 1959.

KOUSHIK, R. P.; KALITA, J.; MISHRA, R. Facile assembly of SnO₂ thin film-based Al/SnO₂/Al device for sensing of 260 nm UVC and 365 nm UVA radiation. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 379, p. 115991, 2024.

KUMAR, K. P. *et al.* Review on selective absorber coatings: A catalyst for enhanced solar energy conversion efficiency. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 277, p. 113080, 2024.

LAMPERT, C. M. Coatings for enhanced photothermal energy collection i. selective absorbers. **Solar Energy Materials**, Elsevier, v. 1, n. 5-6, p. 319–341, 1979.

LEE, K. D.; JUNG, W. C.; KIM, J. H. Thermal degradation of black chrome coatings. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 63, n. 2, p. 125–137, 2000.

LIU, B. *et al.* Optical properties and thermal stability evaluation of solar absorbers enhanced by nanostructured selective coating films. **Powder Technology**, Elsevier, v. 377, p. 939–957, 2021.

LIU, G. *et al.* Preparation and tunable optical properties of ion beam sputtered SiAlON thin films. **Vacuum**, Elsevier, v. 101, p. 1–5, 2014.

LIU, H. *et al.* Uv aging resistance improvement of SBS modified asphalt binder by organic layered double hydroxide and naphthenic oil: Its preparation, properties and mechanism. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 449, p. 138404, 2024.

LIU, J.; SUN, Z.-Q.; WANG, H. Design and characterization of solar absorbing multilayer stack based on Al/Cr-NO/SiO₂ layers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 188, p. 18–26, 2018.

LOUZADA, M. Z. **Viabilidade do uso do ensaio não destrutivo de correntes parasitas para caracterização da sensitização de aços inoxidáveis AISI 304**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

MADHUKESHWARA, N.; PRAKASH, E. An investigation on the performance characteristics of solar flat plate collector with different selective surface coatings. **International Journal of Energy & Environment**, v. 3, n. 1, 2012.

MAIA, D. S.; LIMA, Y. S.; GOMES, L. d. C. Energia solar em habitações populares: uma experiência na política habitacional brasileira. In: **Simposio Internacional de la Historia de la Electrificación, 5º**. Évora: GEO Crítica, 2019.

MAKA, A. O.; ALABID, J. M. Solar energy technology and its roles in sustainable development. **Clean Energy**, Oxford University Press UK, v. 6, n. 3, p. 476–483, 2022.

MEDEIROS, F. C. d. **Uma Revisão Sistêmica sobre a eficácia da Radiação Ultravioleta como agente germicida**. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

MEDEIROS, I. D. M. *et al.* Selective solar surface solar based on black chromium: influence of electrodeposition parameters in the absorption of surfaces. **Materials Research**, SciELO Brasil, v. 22, 2019.

MEDEIROS, I. D. M. *et al.* Characterization of sugarcane bagasse ash under different beneficiation processes for application as solar selective surfaces. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 53, p. 124–130, 2021.

NOWAK, E. *et al.* Spectroscopic study on the influence of post-processing annealing on ZnO films produced with a sol-gel method. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 788, p. 140154, 2024.

OLIVEIRA, A. d. S. **Avaliação da influência de tratamentos superficiais na absorptância e morfologia de filmes absorvedores de Mo/SiO₂ obtidos via Sputtering**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Renováveis) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

OLIVEIRA, A. S. *et al.* Effect of surface treatments on absorptance and morphology of molybdenum and silica absorbing thin films. **Solar Energy**, Elsevier, v. 254, p. 158–167, 2023.

PARAÍBA. **Atlas solarimétrico da Paraíba**. Cachoeira Paulista, SP: Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – CGPDI, 2023. Secretaria de Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos. ISBN 978-65-980791-0-9.

PELLEGRINI, G. Experimental methods for the preparation of selectively absorbing textured surfaces for photothermal solar conversion. **Solar Energy Materials**, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 391–404, 1980.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PETITJEAN, J.; POORTEN, H. V. Les revêtements sélectifs et leur rôle dans l'amélioration des performances des collecteurs solaires. **Surface Technology**, Elsevier, v. 11, n. 4, p. 229–258, 1980.

PETTIT, R. Accelerated temperature aging of black chrome solar selective coatings. **Solar Energy Materials**, Elsevier, v. 8, n. 4, p. 349–361, 1983.

PINHO, D. C. *et al.* Characterization and application of a selective coating for solar collectors from of the cashew nut shell liquid. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 234, n. 1, p. 167–174, 2020.

RACCURT, O. *et al.* Study of the stability of a selective solar absorber coating under air and high temperature conditions. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 69, p. 1551–1557, 2015.

RANDICH, E.; PETTIT, R. Solar selective properties and high temperature stability of CVD ZrB_2 . **Solar Energy Materials**, Elsevier, v. 5, n. 4, p. 425–435, 1981.

REDDY, R. *et al.* Optical electronegativity and refractive index of materials. **Optical materials**, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 95–100, 1998.

RODRIGUES, F. P. **Obtenção e Estudo de uma Superfície Seletiva para Coletores Solares Térmicos a partir de resíduos de granito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ROMANHOLE, R. C. **Estudo da Fotoestabilidade de Filtros Solares comerciais quando expostos a Radiação UV artificial, Lâmpadas Fluorescentes Comerciais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Médicas) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024.

SADE, W. *et al.* Produção de superfícies seletivas por magnetron sputtering para aplicações fototérmicas. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 27, n. 3, p. 125–131, 2008.

SAVELLI, M.; BOUGNOT, J. Problems of the $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ cell. **Solar Energy Conversion: Solid-State Physics Aspects**, Springer, p. 213–256, 2005.

SELVAKUMAR, N.; BARSHILIA, H. C. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid-and high-temperature solar thermal applications. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 98, p. 1–23, 2012.

SELVAKUMAR, N. *et al.* Structure, optical properties and thermal stability of pulsed sputter deposited high temperature $\text{HfOx}/\text{Mo}/\text{HfO}_2$ solar selective absorbers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 94, n. 8, p. 1412–1420, 2010.

SENA, A. C. d. **Estudo e caracterização de uma superfície seletiva para coletores solares planos à base do Líquido da Casca da Castanha de Caju**. Monografia (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SERAPHIN, B. Chemical vapor deposition of thin semiconductor films for solar energy conversion. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 39, p. 87–94, 1976.

SHAFFER, L. Wavelength-dependent (selective) processes for the utilization of solar energy. **Solar Energy**, Elsevier, v. 2, n. 3-4, p. 21–26, 1958.

SHEU, H.-H. *et al.* Electrodeposition of black chromium–cobalt alloy based on trivalent sulfate electrolyte. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Elsevier, v. 59, p. 496–505, 2016.

SILVA, D. d.; FREITAS, B. J. M. Desenvolvimento de uma sonda para controle e monitoramento de temperatura utilizando a plataforma arduino. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 10, n. 1, p. áginas–268, 2018.

SILVA, M. R. C. d. **Infuência dos tipo de camadas e variações de temperatura nas propriedades ópticas de superfícies absorvedoras solares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Renováveis) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

SILVA NETO, J. F. **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas para Coletores Solares com Deposição Multicamadas de Cr e SiO₂**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SILVA NETO, J. F. *et al.* Chromium silica co-sputtered graded cermet for solar thermal collectors. **Solar Energy**, Elsevier, v. 193, p. 212–219, 2019.

SINGH, J. *et al.* Effect of structural and thermal disorder on the optical band gap energy of Cr₂O₃ nanoparticles. **Materials Research Express**, IOP Publishing, v. 6, n. 8, p. 085039, 2019.

SOUSA, G. C. P. d. *et al.* Mathematical modeling study to optimize the production of molybdenum and silica absorbing thin films. **Solar Energy**, v. 282, p. 112962, 2024.

STRACHAN, C. *et al.* Spectroscopic methods in solid-state characterization. **Characterization of Pharmaceutical Nano and Microsystems**, Wiley Online Library, p. 27–95, 2021.

SWANEPOEL, R. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, IOP Publishing, v. 16, n. 12, p. 1214, 1983.

TABOR, H. Solar collectors, selective surfaces, and heat engines. **Proceeding of the National Academy of Sciences**, v. 47, n. 8, p. 1271–1278, 1961.

TATSCH, P. J. V **Oficina de Microeletrônica**. São Paulo: UNICAMP, 2000.

TEIXEIRA, V. *et al.* Spectrally selective composite coatings of Cr-Cr₂O₃ and Mo-Al₂O₃ for solar energy applications. **Thin solid films**, Elsevier, v. 392, n. 2, p. 320–326, 2001.

VALENÇA, A. K. A. **Efeitos do envelhecimento sobre a absortividade de superfícies seletivas solares à base de Cromo (Cr_xO_y) depositadas via Magnetron Sputtering**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

VALENÇA, A. K. A. Panorama da produção científica nacional da pós-graduação acerca dos estudos sobre coletores solares. In: **XXV Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. São Paulo: FEA/USP, 2023.

VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **scientometrics**, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+Business Media BV, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VICTORIA, S. G.; RAJ, A. M. E.; RAVIDHAS, C. An insight in the structural, morphological, electrical and optical properties of spray pyrolysed Co₃O₄ thin films. **Materials Chemistry and Physics**, Elsevier, v. 162, p. 852–859, 2015.

VIEIRA, S. G. **Obtenção, caracterização e aplicação de uma nova superfície seletiva para coletores solares térmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

- WANG, X. *et al.* Spectral properties of AlCrNO-based multi-layer solar selective absorbing coating during the initial stage of thermal aging upon exposure to air. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 188, p. 81–92, 2018.
- WANG, Y. *et al.* Aging-induced microstructural transformations and performance enhancement of Cr/DLC coatings on ECAP-7075 aluminum alloy. **Coatings**, MDPI, v. 15, n. 9, p. 1017, 2025.
- WASA, K.; KANNO, I.; KOTERA, H. **Handbook of Sputter Deposition Technology**. 2. ed. Reino Unido: Elsevier, 2012.
- WU, S. *et al.* Fe₂O₃ films on stainless steel for solar absorbers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 58, p. 574–580, 2016.
- WU, Y. *et al.* Study on the thermal stability of Al/NbTiSiN/NbTiSiON/SiO₂ solar selective absorbing coating. **Solar Energy**, Elsevier, v. 119, p. 18–28, 2015.
- XIAO, X. *et al.* A facile process to prepare copper oxide thin films as solar selective absorbers. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 257, n. 24, p. 10729–10736, 2011.
- YANG, Y. *et al.* Effect of ultraviolet aging of backsheet on electrical performance of silicon photovoltaic module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 262, p. 112558, 2023.
- YANG, Y. *et al.* Ambient-aging process enables enhanced efficiency for wide-bandgap perovskite solar cells. **Nano Energy**, Elsevier, v. 109, p. 108288, 2023.
- YIN, Y. *et al.* Direct current reactive sputtering Cr-Cr₂O₃ cermet solar selective surfaces for solar hot water applications. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 517, n. 5, p. 1601–1606, 2009.
- YU, D.-M. *et al.* A novel multilayer high temperature solar absorber coating based on high-entropy alloy nbmotaw: optical properties, thermal stability and corrosion properties. **Journal of Materiomics**, Elsevier, v. 7, n. 5, p. 895–903, 2021.
- ZAHRA, S. t. *et al.* On structural, optical, and electrical properties of chromium oxide Cr₂O₃ thin film for applications. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces**, Springer, v. 57, n. 2, p. 321–328, 2021.
- ZAYED, M. E. Recent advances in solar thermal selective coatings for solar power applications: Technology categorization, preparation methods, and induced aging mechanisms. **Applied Sciences**, MDPI, v. 14, n. 18, p. 8438, 2024.
- ZHAI, H.-J. *et al.* Probing the electronic and structural properties of chromium oxide clusters (CrO₃)_n- and (CrO₃)_n (n= 1–5): photoelectron spectroscopy and density functional calculations. **Journal of the American Chemical Society**, ACS Publications, v. 130, n. 15, p. 5167–5177, 2008.
- ZHANG, K. *et al.* A review on thermal stability and high temperature induced ageing mechanisms of solar absorber coatings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 67, p. 1282–1299, 2017.