



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



ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE
FABRICAÇÃO DE FILMES FINOS A BASE DE Cr E Mo COM UMA
COMPOSIÇÃO GRADUAL DE Si PARA APLICAÇÕES EM ABSORVEDORES
SOLARES SELETIVOS

RAISSA VENÂNCIO

JOÃO PESSOA - PB

2022

RAISSA VENÂNCIO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE
FABRICAÇÃO DE FILMES FINOS A BASE DE Cr E Mo COM UMA
COMPOSIÇÃO GRADUAL DE Si PARA APLICAÇÕES EM ABSORVEDORES
SOLARES SELETIVOS**

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito à obtenção da aprovação do
projeto de dissertação a ser desenvolvido no
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica, na área de processos de
fabricação, da Universidade Federal da
Paraíba.

Orientação: Profa. Dra. Kelly Cristiane
Gomes

JOÃO PESSOA - PB

2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V448a Venâncio, Raissa.

Análise experimental comparativa dos parâmetros de fabricação de filmes finos a base de Cr e Mo com uma composição gradual de Si para aplicações em absorvedores solares seletivos / Raissa Venâncio. - João Pessoa, 2022.

128 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT/PPGEM.

1. Engenharia mecânica. 2. Superfície solar seletiva. 3. Magnetron sputtering. 4. Cromo. 5. Silício. 6. Molibdênio. I. Gomes, Kelly Cristiane. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621(043)

ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO DE FILMES FINOS A BASE DE Cr E Mo COM UMA COMPOSIÇÃO GRADUAL DE Si PARA APLICAÇÕES EM ABSORVEDORES SOLARES SELETIVOS

por

RAISSA VENÂNCIO

Dissertação aprovada em 28 de abril de 2022

Kelly Cristiane Gomes

Profa. Dra. **KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA**
Orientadora – UFPB

Danielle Guedes de Lima Cavalcante

Profa. Dra. **DANIELLE GUEDES DE LIMA CAVALCANTE**
Examinadora Interna – UFPB

Daniel Araújo de Macedo

Prof. Dr. **DANIEL ARAUJO DE MACEDO**
Examinador Externo – UFPB

Flávia de Medeiros Aquino

Profa. Dra. **FLÁVIA DE MEDEIROS AQUINO**
Examinadora Externa – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha sobrinha Lia
por trazer luz a minha vida me incentivando
a ultrapassar novos desafios.

AGRADECIMENTOS

Ao Thiago, pelo incentivo constante, parceria e amor dedicado.

À minha mãe Gilvânia, irmão Renê, avó Marilene, tia-avó Mércia e minha cunhada Ananda, por todo carinho e estímulo crítico.

A professora Dra. Kelly C. Gomes pela orientação, exemplo profissional, confiança, amizade, carinho e disponibilidade por toda minha jornada acadêmica.

À profa. Dra. Flávia de Medeiros Aquino, pela amizade, atenção e incentivo dedicado.

A minha querida amiga, Gabriela pela parceria, auxílio acadêmico e emocional.

Aos colegas, Aline, Mikaelly, Thais, Maycon, Raissa, Beatriz, Fábio, Rebeca e Manuel pelas análises realizadas e ajuda nas interpretações.

Aos professores pertencentes à banca examinadora.

AGRADEÇO.

VENÂNCIO, R. **Análise experimental comparativa dos parâmetros de fabricação de filmes finos a base de Cr e Mo com uma composição gradual de si para aplicações em absorvedores solares seletivos.** João Pessoa-PB, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, fevereiro de 2022. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Orientadora: Prof. Dra. Kelly Cristiane Gomes.

RESUMO

O aproveitamento da energia solar para aplicação em sistemas de aquecimento termosolar cresceu exponencialmente dado a inclusão das fontes renováveis na matriz energética tradicional. Mediante essa perspectiva, uma das vertentes de pesquisa visa a melhoria da eficiência desses sistemas através da otimização dos coletores solares. Neste trabalho, objetivava-se a otimização do processo de obtenção de superfícies seletivas para os coletores solares, comparando-se os parâmetros ópticos de revestimentos a base de Cr e Mo com uma camada gradual de Si fabricados pela técnica de pulverização catódica (*Magnetron Sputtering*) com diferentes parâmetros de deposição. Os revestimentos foram depositados em substratos de aço inoxidável AISI 304 com dois tipos de tratamento (limpeza com hexano e eletropolimento) e quatro composições distintas: Mo, Cr, Mo + Si e Cr + Si formados a partir de três tempos diferentes (10, 20 e 30 min) de pulverização, totalizando 24 amostras produzidas em triplicata. Os revestimentos foram submetidos a análises de Perfilometria Óptica, Espectrofotometria UV-Vis-NIR, Espectrofotometria de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raios-X (XPS), análise de variância estatística unidirecional (ANOVA) e ensaio de corrosão eletroquímica. Os resultados indicaram que a técnica de deposição por *Magnetron Sputtering* é eficaz na produção de filmes finos com extrema uniformidade e reprodutibilidade, o tempo de deposição, o tipo de material e o tratamento afetam a performance de absorção do filme. Todos os filmes produzidos apresentaram altos valores de absorvância média solar (acima de 87%) para serem considerados Superfícies Solar Seletivas (85%). O tratamento de eletropolimento apresentou o menor desvio padrão na produção dos filmes (entre 0,7 – 2,0) com resultados de absorção acima de 95%. Os filmes de Cr + Si e Mo + Si, sobre substratos eletropolidos, obtidos com 20 minutos de pulverização obtiveram a melhor performance de absorção com 98,7% e 98,4%, respectivamente. Pela análise da Perfilometria, pode-se observar que as superfícies menos rugosas favoreceram a propriedade absorvedora dos filmes e os perfis morfológicos mostraram superfícies bastante uniformes com espessura na ordem de micrometros. Através da análise de

FTIR e XPS foi possível identificar a oxidação dos compostos formadores dos filmes. A análise de variância destacou que o tratamento do substrato é o fator com maior relevância estatística para absorvância e rugosidade, enquanto o tempo de deposição afeta a espessura dos filmes. O ensaio corrosivo demonstrou que os filmes de Cr e Cr/Si apresentaram maiores resistências a polarização. O filme de Cr/Si com 20 minutos de deposição, sobre substrato eletropolido apresenta a melhor configuração para superfícies solares seletivas.

PALAVRAS-CHAVE: Superfície solar seletiva, *magnetron sputtering*, cromo, silício e molibdênio.

VENÂNCIO, R. **Comparative experimental analysis of the fabrication parameters of Cr and Mo-based thin films with a Si graded composition for selective solar absorbers applications.** João Pessoa-PB, Technology center, Federal University of Paraíba, april 2022. Dissertation. Postgraduate Program in Mechanical Engineering. Supervisor: Prof. Dra. Kelly Cristiane Gomes.

ABSTRACT

The use of solar energy for application in solar thermal heating systems has grown exponentially due to the inclusion of renewable sources in the traditional energy matrix. From this perspective, one of the research strands aims to improve the efficiency of these systems through the optimization of solar collectors. In this work, the objective is to optimize the process of obtaining selective surfaces for solar collectors, comparing the optical parameters of coatings based on Cr and Mo with a gradual layer of Si manufactured by the sputtering technique (Magnetron Sputtering). with different deposition parameters. The coatings were deposited on AISI 304 stainless steel substrates with two types of treatment (hexane cleaning and electropolishing) and four different compositions: Mo, Cr, Mo + Si and Cr + Si formed from three different times (10, 20 and 30 min) of sputtering, totaling 24 samples produced in triplicate. The coatings were submitted to Optical Profiling, UV-Vis-NIR Spectrophotometry, Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR), X-Ray Excited Photoelectron Spectroscopy (XPS), one-way statistical analysis of variance (ANOVA) and electrochemical corrosion. The results indicated that the *Magnetron Sputtering* deposition technique is effective in the production of thin films with extreme uniformity and reproducibility, the deposition time, the type of material and the treatment affect the absorption performance of the film. All films produced showed high values of mean solar absorbance (above 87%) to be considered Selective Solar Surfaces (85%). The electropolishing treatment showed the lowest standard deviation in film production (between 0.7 – 2.0) with absorption results above 95%. The Cr + Si and Mo + Si films, on electropolished substrates, obtained with 20 minutes of spraying obtained the best absorption performance with 98.7% and 98.4%, respectively. Through the Profilometry analysis, it can be observed that the less rough surfaces favored the absorbing property of the films and the morphological profiles showed very uniform surfaces with thickness in the order of micrometers. Through FTIR and XPS analysis, it was possible to identify the oxidation of

the film-forming compounds. The analysis of variance highlighted that the substrate treatment is the most statistically significant factor for absorbance and roughness, while the deposition time affects the thickness of the films. The corrosive test showed that the Cr and Cr/Si films showed higher polarization resistivities. The Cr/Si film with 20 minutes of deposition on electropolished substrate presents the best configuration for selective solar surfaces.

Keywords: Selective solar surface, magnetron sputtering, chromium, silicon and molybdenum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta de energia interna (a) por fonte 2021, ano base 2020 e (b) pela fonte solar nos últimos 11 anos.....	19
Figura 2 - Irradiação solar média anual no ano de 2017.	26
Figura 3 - Fenômenos físicos de interação da irradiação solar com superfícies solares seletivas.	27
Figura 4 - Espectro solar de uma SSS ideal.	28
Figura 5 - Classificação dos coletores solares.	30
Figura 6 - Diferentes concentradores solares.	32
Figura 7 – Esquemático de um <i>Magnetron Sputtering</i>	39
Figura 8 - Planejamento experimental.....	45
Figura 9 - Esquemático do processo de eletropolimento.....	46
Figura 10 - Esquemático dos filmes depositados.	47
Figura 11 - <i>Magnetron Sputtering</i> Orion 5.....	48
Figura 12 - Amostras tratadas com filmes depositados.....	49
Figura 13 - Codificação das amostras segundo o planejamento experimental.....	50
Figura 14 - Representação esquemática da determinação da altura de pico e vale dos filmes.....	52
Figura 15 - Representação esquemática da rugosidade média.	52
Figura 16 - Amplitude média da análise de topografia.	53
Figura 17 - Modelo do circuito equivalente para corrosão metálica.	56
Figura 18 - Coeficientes da curva de Tafel.....	57
Figura 19 - Espectros de absorvância total para os filmes depositados sobre substrato tratado por (a) hexano e (e) eletropolimento.....	59
Figura 20 - Absorvância hemisférica solar das amostras sobre substrato tratado com (a) hexano e (b) eletropolimento.	61
Figura 21 - Aproximação de Tauc para as amostras (a) H2, H4, H7 e H11 & (b) E2, E5, E8 e E11. Parâmetro de Urbach para região entre 0.9 - 1.1 eV e 4.15 - 4.75 eV para as amostras tratadas com (c & e) hexano e (d & f) eletropolimento.....	63
Figura 22 - Correlação entre a absorvância média e a rugosidade superficial.	68
Figura 23 - Correlação entre absorvância média e rugosidade superficial para as monocamadas de Cr e Mo.	69

Figura 24 - Correlação entre absorvância média e rugosidade superficial para os filmes de Cr/Si e Mo/Si.	70
Figura 25 - Perfil topográfico das amostras tratadas com hexano compostas de Cr para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Cr/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente...	71
Figura 26 - Perfil topográfico das amostras tratadas com polimento eletroquímico compostas de Cr para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Cr/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.	71
Figura 27 - Perfil topográfico das amostras tratadas com hexano compostas de Mo para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Mo/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.	72
Figura 28 - Perfil topográfico das amostras tratadas com polimento eletroquímico compostas de Mo para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Mo/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.	72
Figura 29 - Espectros de transmitância para as superfícies seletivas de Mo e Mo/Si.	77
Figura 30 - Espectros de transmitância para as superfícies seletivas de Cr e Cr/Si.	79
Figura 31 - Espectros de XPS do nível Cr 2p dos filmes (a) H2 e (b) E2.	81
Figura 32 - Espectros de XPS do nível Mo 3d dos filmes (a) H4 e (b) E5.	83
Figura 33 - Espectros de XPS do nível Si 2p dos filmes (a) H7 e (b) E8.....	85
Figura 34 - Espectros de XPS do nível (a) Mo 3d e (b) Si 2p do filme H11 e (b) Si 2p do E11.	86
Figura 35 - Gráfico de (a,b) Nyquist e (c,d) Bode para os filmes tratamento de hexano e eletropolimento, respectivamente.	89
Figura 36 - Resistência global pelo intervalo da frequência.	91
Figura 37 - Extrapolação das curvas de Tafel para superfícies de (a) hexano e (b) eletropolimento.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros gerais dos principais coletores solares.....	34
Tabela 2 - Tipos de absorvedores seletivos.	37
Tabela 3 - Métodos de fabricação de determinadas superfícies absorvedoras.	38
Tabela 4 - Principais diferenças entre DC e RF <i>Magnetron Sputtering</i>	40
Tabela 5 - Parâmetros de <i>Sputtering</i> do filme de NiCrOx.	40
Tabela 6 - Parâmetros de <i>Sputtering</i> do filme de (Cr _x O _y / Cr / Cr ₂ O ₃), depositados em um substrato de cobre.	41
Tabela 7 - Reagentes utilizados na solução de eletropolimento.	47
Tabela 8 - Especificações dos alvos utilizados.	47
Tabela 9 - Absortância hemisférica média e desvio padrão das amostras.	62
Tabela 10 - Comparativo entre os parâmetros de energia de banda e Urbach.	65
Tabela 11 - Parâmetros de rugosidade superficial das amostras.	66
Tabela 12 - Variáveis aplicadas no estudo estatístico.	73
Tabela 13 - Influência dos parâmetros de deposição por <i>magnetronsputtering</i> nas Propriedades absortivas resultantes dos SSS.	74
Tabela 14 - Influência dos parâmetros de deposição por <i>Magnetron Sputtering</i> na rugosidade superficial dos filmes.	75
Tabela 15 - Influência dos parâmetros de deposição por <i>magnetronsputtering</i> na espessura das SSS.	75
Tabela 16 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de cromo baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.	82
Tabela 17 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de molibdênio baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.	84
Tabela 18 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de Cr/Mo baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.	86
Tabela 19 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de Mo/Si baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.	87
Tabela 21 - Parâmetros de corrosão extraídos da curva de Tafel.	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância Unidimensional
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
ATR	Reflectância Total Atenuada
BEN	Balanco Energético Nacional
CEAR	Centro de Energia Alternativa e Renovável
CPC	Concentradores Parabólicos Compostos
CVD	Deposição a Vapor Química
DC	Corrente Direta
FTIR	Espectrofotometria na região de Infravermelho por Transformada de Fourier
LABFILM	Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos
LRAC	Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração
LRF	Refletor de Fresnel Linear
M	Material
MME	Ministério de Minas e Energia
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energéticos de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PVD	Deposição a Vapor Física
Ra	Rugosidade média
RF	Rádio Frequência
Rp	Altura de Pico Máximo
Rp	Resistência a Polarização
Rs	Resistência da Solução
Rv	Altura de Vale mínimo
Sa	Amplitude Média

SSS	Superfície Solar Seletiva
t	Tempo
Ts	Tratamento do Substrato
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
XPS	Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por Raios X

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	22
2.1. OBJETIVO GERAL.....	22
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. INOVAÇÃO CONCEITUAL DA PROPOSTA	22
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
4.1. ENERGIA SOLAR COMO FONTE DE ENERGIA	24
4.2. IRRADIAÇÃO E AS PROPRIEDADES ÓPTICAS DE SUPERFÍCIES SELETIVAS.....	26
4.3. TIPOS DE COLETORES SOLAR	29
4.3.1. Coletores estacionários	30
4.3.2. Coletores com concentração	31
4.4. DEPOSIÇÃO DE FILME VIA MAGNETRON SPUTTERING	37
5. MATERIAIS E METODOS	43
5.1 CONDIÇÕES APLICADAS	43
5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	44
5.3 TRATAMENTO DOS SUBSTRATOS.....	45
5.3.1 Limpeza por hexano	45
5.3.2 Eletropolimento	46
5.4 DEPOSIÇÃO DO FILME ABSORVEDOR	47
5.5 CARACTERIZAÇÕES DOS FILMES	51
5.5.1 Espectrofotometria UV-Vis-NIR.....	51
5.5.2 Perfilometria Óptica	52
5.5.3 Análise de variância unidimensional (ANOVA).....	53
5.5.4 Espectrofotometria de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	54
5.5.5 Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS).....	54
5.5.6 Análise de corrosão	55
6. RESULTADOS	59
6.1 Espectrofotometria UV-VIS-NIR.....	59
6.2 Perfilometria Óptica	65
6.3 Análise de variância (ANOVA)	73
6.4 Espectrofotometria de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) ..	76
6.5 Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por Raios X (XPS)	80

6.6	Ensaio de corrosão	88
7.	CONCLUSÃO.....	94
8.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	98

Capítulo I
Introdução & Objetivos

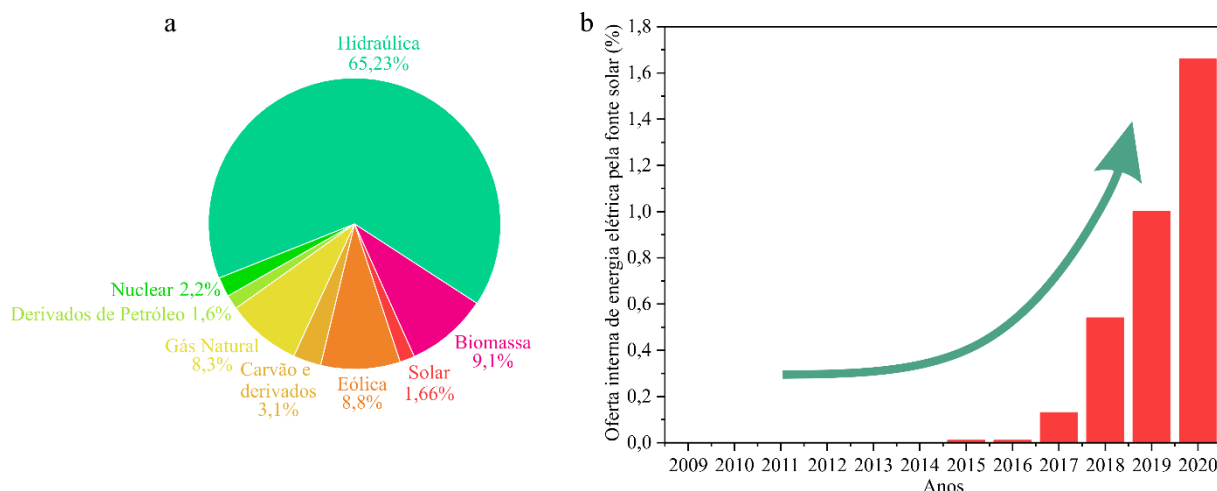
1. INTRODUÇÃO

O uso das matrizes fósseis de energia representou um fator essencial para o suprimento das necessidades básicas da sociedade, crescimento industrial e tecnológico nos últimos anos. No entanto, a exploração indiscriminada aliada ao aumento da emissão de poluentes e contaminação ambiental nocivos para saúde populacional impulsionaram o processo de diversificação das fontes de geração e conversão de energia. Dentro dessa nova perspectiva, as energias renováveis (biomassa, solar, eólica, maremotriz, ...) se estabeleceram como uma alternativa sustentável e eficiente, contribuindo com abertura de um novo modelo de mercado com maior oferta de emprego, demanda de uma mão-de-obra especializada e desenvolvimento tecnológico.

De acordo com essa perspectiva, vários países adotaram políticas de incentivo ao desenvolvimento sustentável, em 2015 mais de 190 membros da Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceram um plano de ação global integrado chamada Agenda 2030, com 17 objetivos de desenvolvimento (ODS) e 169 metas para alcançá-los nos 15 anos seguintes, dentre eles a ODS7 se destaca pela finalidade de promover a energia limpa, confiável e mais acessível (FUSO NERINI *et al.*, 2018). O Brasil, um dos países integrantes da Agenda 2030 adotou políticas sustentáveis, 80% de sua matriz energética é composta por energia renovável como demonstrado na Figura 1 (a).

Dentre tais fontes, a energia solar apresenta um dos maiores potenciais de desenvolvimento energético devido a abundância de radiação solar disponível no Brasil devido sua localização geográfica e clima, predominantemente, tropical. Conforme os dados do balanço energético nacional 2021 (ano base 2020), a energia solar como fonte de geração elétrica (fotovoltaica) representou 1,66% da oferta interna de energia no Brasil, atingindo 3.287 MW de capacidade instalada, é possível observar na Figura 2(b) que nos últimos 5 anos houve um aumento de aproximadamente 98% de oferta interna de tal fonte.

Figura 1 - Oferta de energia interna (a) por fonte 2021, ano base 2020 e (b) pela fonte solar nos últimos 11 anos.



Fonte: EPE (2009-2021).

Além da produção fotovoltaica, essa matriz é aplicada em sistemas termosolares, no qual se utiliza trocadores de calor (chamados coletores solar) afim de absorver a radiação solar incidente na forma de calor transferindo-o para fluídos específicos (KHAN *et al.*, 2018). Esse tipo de energia é aplicável para sistemas residenciais como aquecimento de águas (chuveiros, torneiras, piscinas, ...) e na geração de vapor para aplicação industrial.

Os coletores solares são classificados como sem ou com concentração, o primeiro subdivide-se de acordo com a geometria (planar ou parabólica), fluido de trabalho, aquecimento direto ou indireto. Os coletores sem concentração podem atingir uma temperatura de até 70 °C, enquanto os de concentração normalmente tem superfície refletora concavas focando a irradiação em áreas menores o que aumenta o fluxo de calor alcançando elevadas temperaturas (<70 °C)(TIAN; ZHAO, 2013). No entanto, quanto maior a temperatura de estagnação (temperatura limite de aquecimento do coletor), maiores as perdas térmicas devido ao aumento de emissividade dos materiais aquecidos que compõe o sistema.

Nesse cenário, o maior desafio de sistemas termosolares é a otimização do desempenho térmico dos coletores de forma a aproveitar a maior parte da irradiação solar absorvida (AHMADI *et al.*, 2021), reduzindo perdas térmicas. A configuração desse equipamento consiste em um filme depositado sobre um substrato metálico como alumínio, cobre ou aço inoxidável, que pode conter uma camada antioxidante/difusa/reflexiva (GOMES, 2001).

Sendo as propriedades ópticas (absortividade, emissividade e reflectância) e térmicas do material que reveste o coletor um dos principais fatores que afeta a eficiência desses dispositivos. Sakhaei e Valipour (2020) investigou o efeito de diferentes revestimentos na

eficiência de absorção térmica dos dispositivos, sua pesquisa demonstrou que um revestimento com tinta preta possui uma absorvidade de 85%, enquanto superfícies recobertas com cromo negro e carbono estão acima de 90%. De modo similar, Tulchinsky *et al.* (2014) analisou a performance de um novo material ($\text{Cu}_{0.44}\text{Ti}_{0.44}\text{Mn}_{0.84}\text{Fe}_{0.28}\text{O}_3$) produzido por uma reação térmica entre um espinélio de cobre/mangânese e um precursor de titânio atingindo uma absorvidade de ~97% após ser recozido por 2h à uma temperatura de 650 °C. Em um estudo diferente, Kholari, Ghorbani e Afshar, (2019) analisou um revestimento preto com tratamento eletroquímico de níquel/fósforo com ~99% de absorvidade média porém com uma perda por emissão de mais de 20%.

É perceptível a mudança nas propriedades diante do tipo de material, usualmente, nitretos metálicos de transição (Cr, Ti, V, Zr, Nb, Mo e W, ...) são aplicados nesses sistemas de aquecimento solar devido sua largura de “*bandgap*” ideal que permite que a energia dos fótons seja absorvida pelo sistema passando da banda de condução para a de valência (HUTCHINS, 1979; THOMAS *et al.*, 2017).

Dentro desse aspecto, uma forma de otimizar os parâmetros é a aplicação de revestimentos seletivos que atuam absorvendo seletivamente radiação solar com comprimentos de onda interessantes à conversão solar térmica e não absorvendo na faixa do espectro solar que provoca o fenômeno da emissão térmica (TIAN *et al.*, 2021). A maioria das superfícies seletivas são formadas de cermetes: $\text{ZrB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (GAO *et al.*, 2019b), NiCr-MgF_2 (NING *et al.*, 2020), $\text{Mo-Al}_2\text{O}_3$ (GAO *et al.*, 2017c), Ta-SiO_2 (BILOKUR *et al.*, 2020), $\text{TiN/Al}_2\text{O}_3$ (GAO *et al.*, 2017a), $\text{HfB}_2\text{-ZrB}_2/\text{ZrB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (QIU *et al.*, 2020) e $\text{TiC-WC/Al}_2\text{O}_3$ (GAO *et al.*, 2017b).

Dentre tais revestimentos, aqueles a base de cromo e molibdênio se destacam. Eles possuem diferentes níveis de oxidação, estabilidade química e térmica, sendo superfícies absorvedoras excelentes no espectro visível com baixas perdas térmicas (MOHAMMAD; SELIM, 2011; NUNES *et al.*, 2018; SOUZA; DE ANDRADE LIMA, 2016). O $\text{Cr-Cr}_2\text{O}_3$, conhecido como cromo negro, é amplamente utilizado em superfícies comerciais devido sua alta eficiência absorviva (> 90%), baixo custo de produção e emissividade (FAGNER *et al.*, 2020). Outro filme absorvedor comercial é o composto de Mo-SiO_2 é conhecido por sua alta estabilidade térmica que lhe confere uma alta resistências intempéries ambientais (SAKHAEI; VALIPOUR, 2020; SILVA NETO, 2017).

Além do tipo do material, é visto que a superfície pode ser recoberta com multicamadas de materiais ou com filmes antirreflexivos como Al_2O_3 e SiO_2 protegendo os dispositivos das ações corrosivas do ambiente e reduzindo perdas por emissividade. Outras condições que

afetam a performance do dispositivo é o método de síntese da matriz precursora dos filmes, a forma de deposição do filme absorvedor e a morfologia do substrato. Destacando-se o último fator, sendo a transferência de calor uma atividade afetada por fenômenos de superfícies (CAO *et al.*, 2014; DUFFIE; BECKMAN, 1974; LIPÍŃSKI *et al.*, 2021), a textura e rugosidade dos substratos podem aumentar ou reduzir as propriedades dos coletores solar.

Como citado anteriormente, as superfícies solares seletivas (SSS) também podem ser categorizadas de acordo com o método de revestimento, como: deposição a vapor química (CVD) (VÁZQUEZ-VARGAS *et al.*, 2020), deposição a vapor física (PVD) (BELLO; SHANMUGAN, 2020), anodização (SHAFFEI *et al.*, 2021), eletrodeposição (ESTRELLA-GUTIÉRREZ *et al.*, 2016), revestimento por pulverização (RUBIN; CHEN; CHEN, 2019) ou imersão (JOLY *et al.*, 2014), pirólise (HERNÁNDEZ-PÉREZ, CARLOS DAVID *et al.*, 2021), litografia (WANG *et al.*, 2018a), laser (PANG *et al.*, 2021).

Dentre essas técnicas, a de PVD por *Magnetron Sputtering* se destaca por suas vantagens de escalonamento industrial, homogeneidade de deposição, flexibilidade, redução na produção de resíduos tóxicos. A nível de produção dos coletores solares o método se torna pertinente pelo controle dos parâmetros físicos dos filmes seletivos que podem atingir espessuras nanométricas, distribuição regular das partículas depositadas, integração de diferentes camadas de materiais, alta pureza e aderência dos filmes resultantes no substrato (BAPTISTA *et al.*, 2018; GUDMUNDSSON, 2020; IBRAHIM *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2020).

Diante do exposto, o desenvolvimento de novas superfícies absorvedoras que venham a maximizar a eficiência dos coletores solares, se faz imprescindível para o desenvolvimento de novas tecnologias energéticas e de novas aplicações no setor produtivo. Assim, o presente trabalho desenvolveu filmes finos via a técnica de *magnetron sputtering* compostos por cromo e molibdênio metálico para aplicações em superfícies solares seletivas. A essência inovadora de tal pesquisa, consistiu na adição de um revestimento de silício puro como camada antirreflexiva de forma a reduzir a emissividade das superfícies.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

No presente trabalho objetiva-se a otimização no processo de obtenção de superfície seletiva de Cr e Mo com adição de uma camada de Si através de uma avaliação dos parâmetros de deposição para produção de revestimentos por *Magnetron Sputtering*.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aperfeiçoar a deposição de filmes finos de Cr, Mo e uma composição proporcional de Si por *Magnetron Sputtering* sobre substrato de aço inox AISI 304 com dois tipos de tratamento: limpeza desengordurante e eletropolimento.
- Avaliar as características físicas, químicas, topográficas, ópticas e microestrutural dos filmes obtidos e sua influência na seletividade das superfícies absorvedoras;
- Analisar a eficiência da superfície seletiva proposta com outras já comercializadas.

3. INOVAÇÃO CONCEITUAL DA PROPOSTA

A essência inovadora da pesquisa é a dopagem dos filmes finos de Cr e Mo com uma camada de Si afim de diminuir emissividade do absorvedor, através do método de deposição por *Magnetron Sputtering* sobre substratos com diferentes tipos de tratamento.

Capítulo II
Fundamentação Teórica

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. ENERGIA SOLAR COMO FONTE DE ENERGIA

A energia é um dos principais pilares de desenvolvimento socioeconômico mundial. Dentro da história da humanidade, a sua geração foram predominantemente correlacionada a disponibilidade de combustíveis a base de petróleo, ela movimentou todos os setores de base da sociedade, influenciando desde o funcionamento das indústrias e domicílios como na oferta de emprego e bem-estar social (SELVAKUMAR; BARSHILIA, 2012). No entanto, nos últimos anos, existe uma tendência de transição do uso de tais combustíveis para matrizes ambientalmente amigáveis.

Essa mudança está conectada com as variações climáticas, escassez das matrizes fósseis, o excesso de poluição, o constante avanço tecnológico e aumento populacional. Esses fatores acarretaram no aumento da demanda energética pressionando a sociedade quanto a necessidade de mudança de hábitos e a busca por fontes alternativas de energia. Porém, apesar dos esforços da comunidade, um dos maiores desafios da geração de energia é o uso de fontes que sejam eficientes, seguras e sejam escalonáveis para uso industrial, sendo necessário analisar a disponibilidade/aplicabilidade dos recursos naturais e tomar iniciativas que permitam o desenvolvimento das tecnologias e metodologias de aplicação destas fontes (VILLAVA; GAZOLI, 2012).

Seguindo essa perspectiva, as fontes de energia renováveis ganharam destaque mundial com a intenção de diversificação da matriz energética existente, de forma que o desenvolvimento da sociedade não dependa de um único combustível. Tais energias são definidas por terem um ciclo de renovação dentro da escala humana, podendo ser exploradas constantemente com impactos ambientais reduzidos. Nas quais estão incluídas as fontes hidrelétricas (OPAN *et al.*, 2019), eólicas (VARGAS *et al.*, 2019), biomassa (ANTAR *et al.*, 2021), geotérmica (LUND; TOTH, 2021), maremotriz (WINDT; DAVIDSON; RINGWOOD, 2018), do hidrogênio (MAGHAMI *et al.*, 2020) e solar (ALIRAHMI *et al.*, 2020; KUMAR; SHIVASHANKAR, 2021). Dentre essas a fonte solar é explorada desde os primórdios da humanidade como fonte de luz e calor, tendo como matéria-prima o sol, essa fonte é livre, de baixo custo, limpa, intermitente e acessível.

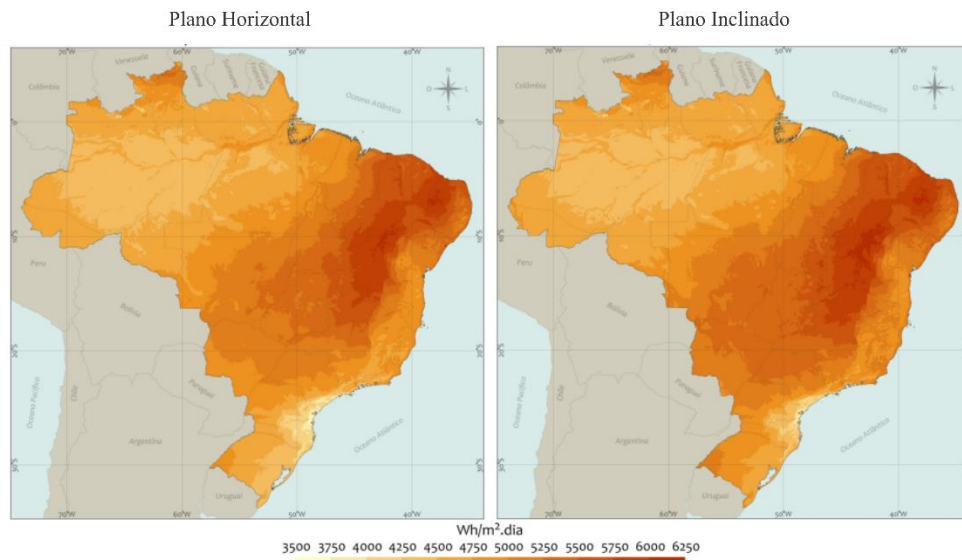
Ao longo dos anos, seu potencial global evoluiu junto com o desenvolvimento de novas tecnologias de aproveitamento solar tanto para geração de energia elétrica fotovoltaica

quanto para aquecimento térmico. No entanto, ainda existe alguns desafios de consistência dado que essa fonte é dependente das condições orográficas, latitude, horário, clima e tempo. Uma das vertentes de pesquisa que objetivam transcender essas desvantagens focam na adaptação dos sistemas de captação solar de forma a aproveitar a maior parte da irradiação incidente.

Dentro desse cenário, o Brasil é um dos países que adotou políticas de incentivo a utilização de energia solar. Em 1994, a Secretaria de Energia do Ministério de Minas e Energia – MME instituiu o Programa de Desenvolvimento Energéticos de Estados e Municípios (PRODEEM) com o objetivo de implantar sistemas de geração fotovoltaica para suprimento de energia em regiões isoladas. A partir de 2004, o Governo estabeleceu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA para o fomento de matrizes alternativas a vigente (STEFANELLO; MARANGONI; ZEFERINO, 2018). Já em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou as normas 481 e 482 que aplicavam descontos nas tarifas dos sistemas de transmissão de energia para projetos de baixa potência que utilizassem sistemas de energia renovável, bem como estabeleceram um sistema de compensação de energia de mini/micro-geração (PEREIRA, 2019b).

Dentre os objetivos da Secretaria de MME, estava a redução de mais de 1 GW de consumo de energia com a ampliação de sistemas de aquecimento de energia até 2015 (RAISUL ISLAM; SUMATHY; ULLAH KHAN, 2013), atualmente, o governo estima que até 2026 a capacidade de sistemas fotovoltaicos instalada alcançará 10 GW de potência (DE JONG *et al.*, 2019). Todas essas movimentações do Estado são justificadas considerando que aproximadamente 95% do território brasileiro é localizado na região intertropical do planeta e com suas dimensões continentais é considerado uma potência em energia solar, principalmente, o semiárido nordestino, como visto na Figura 2 é a região de maior incidência da radiação solar. No qual, esta fonte energética natural vem possibilitando a integração de considerável população, antes isolada e/ou impossibilitada de usufruir de qualquer outra fonte de energia, aos benefícios da vida (FERRAZ DE ANDRADE SANTOS *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2018).

Figura 2 - Irradiação solar média anual no ano de 2017.



Fonte: PEREIRA *et al.*(2017).

4.2. IRRADIAÇÃO E AS PROPRIEDADES ÓPTICAS DE SUPERFÍCIES SELETIVAS

As primeiras experiências na absorção da radiação estavam conectadas a aplicações arquitetônicas como aquecimento residencial e agrícola em estufas rudimentares, foi somente no século XVIII que surgiu o primeiro protótipo de um aquecedor solar, no qual um cientista suíço fabricou uma caixa com uma superfície pintada de preto e recoberta com vidro era utilizada para ferver água quando colocada sob a luz solar (SZABÓ, 2017). Ao longo dos anos, perceberam que a adição do vidro favorecia o fenômeno de absorção já que este permitia a passagem da radiação enquanto aprisionava o calor em seu interior. Assim, em 1955, Tabor, introduziu a ideia de usar uma superfície seletiva como absorvente solar pela primeira vez (CAO *et al.*, 2014). A superfície seletiva teria propriedades dependentes do comprimento de onda de tal forma que absorver fortemente no espectro solar, entre $0.3 - 2.5 \mu\text{m}$, emitindo muito pouco no infravermelho, $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$ (NING *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2021).

Tais ondas eletromagnéticas foram definidas em 1864 pelo físico James C. Maxwell que desenvolveu um conjunto de equações que descrevia como as partículas se movimentam no meio quando submetidas a um campo elétrico e/ou magnético, afirmando que a luz correspondia a uma parcela do espectro existente sendo definida pela frequência (ν), o comprimento de onda

(λ) e a velocidade de propagação da luz (c), correlatas pela Equação 1 (HON; GOLDSTEIN, 2020; MAXWELL, 1864):

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

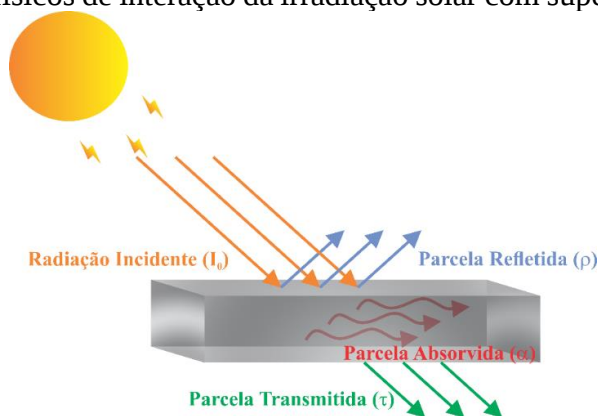
Dentro de tal espectro eletromagnético os comprimentos de onda na ordem de 0,1 μm até 100 μm e que inclui faixas do ultravioleta, luz visível (0,40 e 0,76 μm) e infravermelho (0,76 a 100) são interessantes para o estudo dos fenômenos termosolares de radiação térmica.

Compreendida nessa faixa espectral, os parâmetros ópticos dos materiais e as condições ambientais podem ser correlacionadas pela Equação 2. No qual E representa a intensidade do campo elétrico relacionado ao vetor solar, η_r a constante óptica, k_{exti} índice da absorptância dos materiais e λ o comprimento de onda (LIU *et al.*, 2021).

$$E = E_0 \exp\left(\frac{-2\pi k_{exti}}{\lambda} x\right) \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi \eta_r x}{\lambda}\right)\right] \quad (2)$$

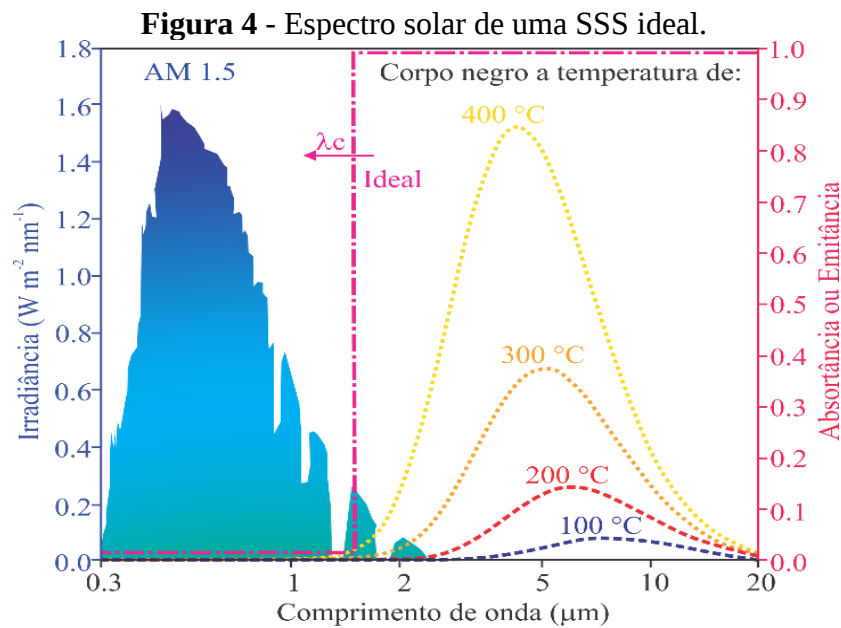
Quando tal radiação incide sobre uma superfície, ela poderá permear dentro da superfície, reverberar para o meio de origem e atravessá-la, como demonstrada na Figura 3 (MEDEIROS, 2016). Esse conjunto de interação da luz solar com um corpo pode ser mensurado em função de suas propriedades ópticas: absorptância (α), reflectância (ρ) e transmitância (τ) (ÇENGEL; GHAIAR, 2012). Quando uma superfície absorve a radiação solar ela pode perder parte de essa energia, dado que todo corpo emite radiação térmica. Tal propriedade é inerente a qualquer superfície e pode ser descrita como emissividade, em sistemas termosolares, sua quantificação representa as perdas térmicas da energia útil para o ambiente, ela é diretamente proporcional ao aumento de temperatura (ÇENGEL; GHAIAR, 2012; THOMAS *et al.*, 2017).

Figura 3 - Fenômenos físicos de interação da irradiação solar com superfícies solares seletivas.



Fonte: Autora (2022).

De forma a reduzir as perdas descritas e maximizar os ganhos energéticos, surgiram as superfícies seletiva, que consistem em absorver toda a radiação incidente abaixo de determinado comprimento de onda, tido como o *comprimento de onda de corte* (λ_c), e não emitir radiação acima deste comprimento de onda, comportando-se de modo seletivo em determinada temperatura. Este λ_c é característico para diferentes materiais e tipos de superfície, na Figura 4 é possível observar o espectro de uma SSS ideal (TIAN *et al.*, 2021). Ela ilustra a transição entre as regiões de alta e baixa absortividade, em torno de 1.8 μm , que é aproximadamente o limite superior do espectro solar (GOMES, 2001).



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

Ao observá-la, constata-se o comportamento exibido por um corpo negro (emissor ideal) sob diferentes temperaturas (entre 100 – 400 °C) ocorre na região do infravermelho médio e distante ($\sim 1,9 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 20 \mu\text{m}$), o que justifica a necessidade de a emitância da sua superfície ser mínima a partir do comprimento de onda de corte e, portanto, apresentar baixa absorptância nessa região. Juntamente, é visível a dependência das propriedades ópticas com a temperatura, visto que o aumento da temperatura de operação do coletor gera um deslocamento da curva de emissão para menores comprimentos de onda (CAO *et al.*, 2014; KENNEDY, 2002).

Esta variação está relacionada ao *band gap* do material que é função do tipo de ligações atômicas que este material apresenta e que determinará a quantidade de energia que poderá ser absorvida. Quando a energia de *band gap* é igual a energia do fóton incidente, a luz é absorvida

pelo material. A microestrutura do material também irá influenciar seu λc , visto materiais que possuem inclusão de partículas com diâmetro inferior a faixa de comprimento de onda da radiação incidente, terão suas propriedades ópticas afetadas, gerarão múltiplas reflexões internas ao material (KIM *et al.*, 2021; LIANG *et al.*, 2022; RAVICHANDRAN; PHILOMINATHAN, 2008; ZUO *et al.*, 2019).

Seguindo o princípio de conservação da energia é possível quantificar os parâmetros que avaliarão a eficiência do coletor solar, onde a soma das parcelas da irradiação incidente em um sólido deve ser igual a 1, essa função é descrita pela Equação 3.

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

Considerando o objeto de estudo como um material opaco e que apenas fenômenos de superfície estão ocorrendo, ou seja, não há alteração do material quando os fótons são absorvidos/refletidos pelo material, é possível aplicar a Lei de Kirchhoff que estabelece a igualdade entre a emissividade e a absortividade de uma superfície em equilíbrio termodinâmico, logo a Equação 3 é simplificada para Equação 4, no qual podemos definir a absorptância do material em função de sua reflectância (MARTINS, 2010). De forma similar, define-se a emissividade como a razão entre a radiação real de emissão e a ideal emitida por um corpo negro na mesma temperatura. Um corpo negro é um absorvedor e emissor ideal ($\alpha = \varepsilon = 1$), no qual se mede o percentual de emissão de uma superfície real (MARTINS, 2010).

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - \rho(T) \\ \varepsilon &= 1 - \alpha(T) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

$\rho(T)$ é a reflectância total hemisférica

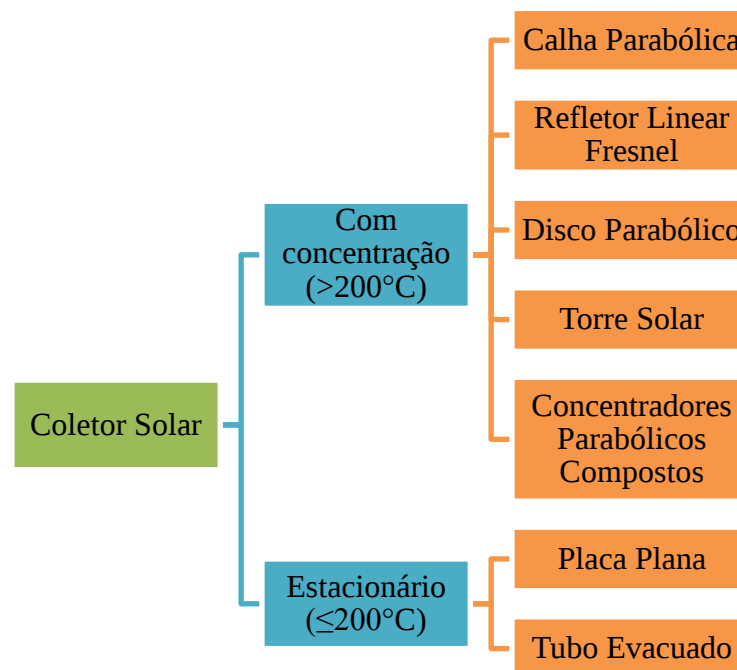
T é a temperatura da superfície.

4.3. TIPOS DE COLETORES SOLAR

O coletor solar é o principal componente de um sistema termosolar, ele funciona como um trocador de calor absorvendo a energia solar, transmitindo-a na forma de calor para um fluido de trabalho como água, ar ou óleo. Estes podem ser classificados de acordo com o limite de temperatura que operam, sendo de baixa ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$) (AHMADI *et al.*, 2021; GORJIAN *et al.*, 2020; MOHAMED; RIFFAT; OMER, 2017), média ($100 < T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) (BHUSAL *et al.*, 2020; SAID *et al.*, 2021) e alta ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) (HACHICHA *et al.*, 2019) temperatura. Os coletores

de baixa/média temperatura embora absorvam tanto a parcela da radiação direta e difusa, não possuem sistema de concentração focal no qual a área de intercepção solar é igual à da absorção, limitando sua operação. Já sistemas de alta temperatura são representados por coletores com concentração e rastreamento solar, eles interceptam apenas a radiação solar direta focando-a para uma área de absorção compacta, que permite o melhor aproveitamento da radiação aumentando o fluxo de calor, durante todo o dia. Na Figura 5 é possível ver a classificação desses sistemas e seus representantes.

Figura 5 - Classificação dos coletores solares.



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

4.3.1. Coletores estacionários

Os coletores de baixa temperatura não necessitam de rastreamento solar, eles são fixos ao sistema a que pertencem e normalmente designados à processos de aquecimento residencial (chuveiros, torneiras, piscinas, ...), instalações industriais de baixa demanda, processamentos de secagem e dessalinização. Estes são representados pelos coletores de placa plana ou tubo evacuado (SAKTHIVADIVEL *et al.*, 2021). O primeiro possui um método construtivo simples que permite fácil manutenção, no entanto existe alguns desafios relacionados a perda de calor por convecção que reduz sua eficiência. Um típico coletor de placa plana é constituído de um invólucro termicamente isolado com selantes, apresenta um condutor térmico sob um filme

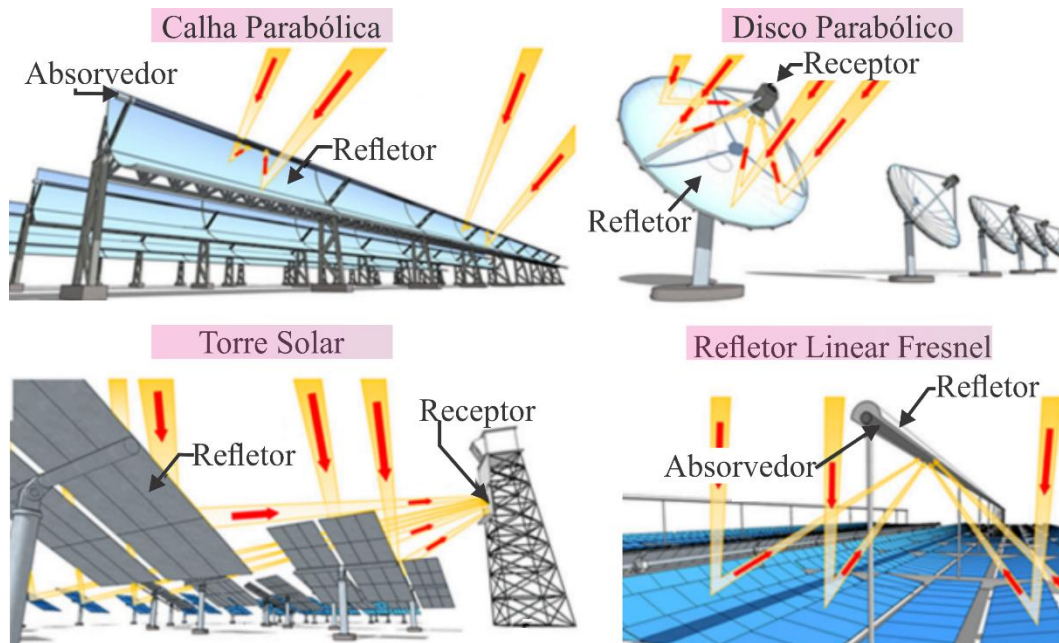
absorvedor, uma serpentina também absorvedora para fluxo do fluido de trabalho e na parte superior uma cobertura de vidro que provoca um efeito estufa dentro do coletor solar dificultando a saída da radiação do sistema (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2016).

Já os sistemas de tubo evacuado possuem uma configuração mais elaborada, consistindo em dois tubos de vidro concêntricos, o tubo interno possui um revestimento absorvedor enquanto o externo é transparente permitindo a passagem da radiação difusa e direta a ser coletada pelo primeiro citado, a perda térmica é reduzida devido a criação de vácuo entre os tubos impedindo a transferência de calor. Esse designe permite uma eficiência e vida útil elevada e a operação sob diversas condições climáticas. Além disso, eles são moduláveis, o que permite a fácil reposição de peças individuais danificadas, em contrapartida, o custo de produção desses dispositivos é elevado, seus constituintes são relativamente frágeis, há também a probabilidade de ocorrência de sobreaquecimento o que resulta em mais custos para manter o controle de temperatura e preservar os componentes do sistema, dependendo da aplicação (MEVADA *et al.*, 2022; SABIHA *et al.*, 2015).

4.3.2. Coletores com concentração

Os concentradores solares são denominados dessa forma devido a sua configuração que se resume a um concentrador e um receptor, o primeiro concentra a energia solar e a direciona para o segundo componente que possui uma área reduzida, permitindo maximizar a energia coletada e diminuir as perdas por emissividade, consequentemente, a temperatura que se atinge é mais alta que os sistemas estacionários (ISLAM *et al.*, 2018). Tal temperatura é dependente da razão de concentração (C) definido pela divisão entre o valor da área de abertura do concentrador e o da superfície do receptor, $C < 5$ apresentam temperaturas até 200 °C, enquanto $C \geq 10$ podem chegar a temperaturas acima de 500 °C (BELLOS; TZIVANIDIS, 2019a). Dentre os principais concentradores, a calha parabólica pode alcançar temperaturas de até 400 °C, enquanto o disco parabólico, a torre solar e o refletor linear Fresnel atingem ~1.500 °C, 2.000 °C e 250 °C, respectivamente. A configuração de tais dispositivos está descrita na Figura 6 (GHARAT *et al.*, 2021).

Figura 6 - Diferentes concentradores solares.



Fonte: Adaptado de Chamsa-ardet *al.*(2017).

Uma calha parabólica possui um desenho em parábola com uma concentração linear, um tubo absorvedor no centro do sistema, ele possui um sistema de rastreamento solar unidirecional, normalmente posicionado para acompanhar o nascer e pôr-do-sol na direção Leste-Oeste (BELLOS; TZIVANIDIS, 2019b; EVANGELISTI; DE LIETO VOLLARO; ASDRUBALI, 2019). Malan e Ravi Kumar (2021) elencaram em seu estudo bibliográfico que três fatores são cruciais para a eficácia de um sistema parabólico: parâmetros ópticos, térmicos e estruturais, eles afetam a distribuição de fluxo solar que definem a operação do dispositivo.

Assim como o último citado, o refletor de Fresnel (LRF) é designado como um concentrador solar de foco linear sendo composto por um conjunto de refletores (planos ou parabólicos) que direcionam a radiação solar para um receptor linear fixo que inclui uma série de tubos absorvedores, em alguns casos, existe um conjunto adicional de refletores secundários que aumentam a concentração. A principal diferença entre esse sistema e a calha parabólica é que a segunda possui o refletor e o receptor integrado. O LRF é considerado uma tecnologia promissora com excelente custo-benefício, a empresa Solar mundo construiu um protótipo Fresnel com área superficial de 2.500 m² com um custo de produção de 50% de área reduzida comparado a um sistema de calha parabólica (BELLOS; TZIVANIDIS, 2018; SUN et al., 2020a).

Diferente dos coletores acima, o disco parabólico possui um receptor volumétrico com foco pontual, é constituída de uma estrutura absorvedora no qual a radiação penetra dentro de seu volume sendo transferida para o fluído de trabalho gradativamente. Nesse tipo de configuração temperaturas mais altas são interceptadas pela ao longo do volume do poro do receptor (NAVALHO; PEREIRA, 2020). Esse tipo de concentrador pode conter um receptor do tipo externo ou de cavidade. O último é configurado para reduzir as perdas por emissão otimizando a eficiência da matriz absorvedora e normalmente aplicado em sistemas de multi-geração devido sua capacidade de transferência de calor em diferentes gradientes de temperatura (ABOELMAAREF *et al.*, 2020; ALSAGRI; ALROBAIAN; ALMOHAIMEED, 2020; LONI *et al.*, 2020).

A torre solar é mais uma representante dos concentradores de foco pontual, ela possui um conjunto de heliostatos com duplo eixo de rastreamento solar que foca a radiação em um receptor fixo em uma torre que absorve a energia e a transfere para um fluído térmico. A quantidade de energia transferida é limitada pela quantidade de heliostatos disponíveis na central de torre solar. Nesse caso, a razão de concentração (C) é definida como a razão entre a área do receptor e o total da área dos heliostatos (AHMADI *et al.*, 2018). Boretti; Castelletto; Al-zubaidy (2019) evidenciou em sua pesquisa que existem apenas 34 plantas de torre solar de potências significativas, três delas se destacam por operar com capacidade acima de 40 MW, principalmente a ISEGS que desde 2014 possui uma capacidade de 377 MW. Apesar de ser uma tecnologia promissora ainda necessita de amadurecimento no desenvolvimento de sistemas para aprimoração de sua eficiência térmica.

Além dos demais coletores elencados acima, existe os concentradores parabólicos compostos (CPC) eles objetivam maximizar a razão de concentração através de absorvedores que são capazes de coletar a radiação incidente com angulações diferentes. Sua geometria é condicionada para efetivar o método de *string*, no qual se assume que todos os raios que incidem no ângulo do receptor emergem pontual na borda de abertura de saída, logo sua curva parabólica é derivada como uma parte do refletor e o concentrador é obtido girando tal parábola no entorno do eixo do concentrador, aumentando sua eficiência de coleta. Como o ângulo de concentração é reduzido, esse sistema dispensa o uso de rastreamento solar elevando seu custo-benefício (JIANG *et al.*, 2020; LI, 2019; TIAN *et al.*, 2018).

Diante do exposto o tipo de coletor a ser aplicado em um sistema dependerá do tipo de aplicação, do custo-benefício e a demanda energética. Tais coletores estão em constante evolução, nos quais as pesquisas atuais focam em maximizar a eficiência térmica adaptando os

métodos construtivos e os tipos de materiais utilizados no absorvedor, na Tabela 1 é possível visualizar as características gerais dos principais coletores discutidos, o disco parabólico e torre solar são aplicados, majoritariamente, em sistemas de potência devido a sua elevada temperatura de operação, enquanto os demais são direcionados a aplicações domésticas ou industriais de baixa demanda.

Tabela 1 - Parâmetros gerais dos principais coletores solares.

Tecnologia	Foco	Eficiência máxima (%)	Eficiência média anual (%)	Temperatura de operação (°C)	Custo relativo	C
Placa plana	-	20-30	~20	30-90	Muito baixo	-
Tubo evacuado	-	~73	~50	50-200	Baixo	-
Calha parabólica	Linear	20-25	14-22	250-550	Baixo	30-80
Refletor Fresnel	Linear	18-20	13-18	150-550	Muito baixo	30-80
Disco parabólico	Pontual	28-32	18-25	600-1.500	Muito alto	1.000-3.000
Torre solar CPC	Pontual	22-24	15-23	500-1.200 60-240	Alto	200-1.000

Fonte: Alawiet *al.*, (2021); Fudholi e Sopian, (2019); Gaoet *al.*, (2020); Platzer e Wittwer, (1991); Sun *et al.*, (2020); Zhang e Yamaguchi, (2008).

4.4. TIPOS DE REVESTIMENTO PARA SSS

Como elencado anterior o revestimento dos coletores solares representa a maior fonte de eficiência do sistema termosolar e diante de todos os revestimentos existentes os materiais seletivos são mais apropriados para tal aplicação. O desenvolvimento de tais superfícies foram baseadas no tipo de material, o método de fabricação, a estabilidade termoquímica, resistência mecânica e estrutural. De acordo com essa dinâmica os filmes são classificados como cermets, absorvedores intrínsecos, semicondutores, multicamadas e de superfícies texturizadas (LIU *et al.*, 2021).

O tipo mais comum de absorvedor seletivo é o arranjo absorvedor-refletor que é obtido combinando duas superfícies, uma superfície que absorve fortemente na região solar e outra que emite fortemente na região do infravermelho (KOKOROPOULOS; SALAM; DANIELS, 1959). No entanto, para aplicações em coletores solares que operam em média e alta temperaturas, notadamente aqueles que dispõem de concentradores solares, foram alcançados

resultados promissores utilizando-se superfícies seletivas denominadas *cermets* (MARTINS, 2010; XU *et al.*, 2020).

Estas superfícies são compostas por uma matriz de material cerâmico contendo partículas finas de um metal depositadas sobre um substrato metálico onde a alta absortividade é alcançada pela inserção de níveis energéticos interbandas pela presença das partículas metálicas, ao mesmo tempo em que a emissividade da superfície decai pela presença destas mesmas partículas (KENNEDY, 2002). É importante observar que o gradiente de concentração de metal na matriz de cerâmica cresce a partir da superfície externa do revestimento na direção do metal de substrato (GALLO, 1985). Nesse caso, a constante da fase dielétrica e as nanopartículas metálicas são os fatores críticos para o material cermet.

Os materiais mais utilizados são compostos de cromo negro, níquel negro, ferro negro, dentre estas, a matriz cerâmica que se destaca é a de cromo negro e óxido de cromo (Cr_2O_3). Tsegayet *al.* (2022) reportou um absorvedor seletivo de Cr_2O_3 depositado em um substrato de cobre e fabricado por um processamento ecologicamente amigável que resultou em filmes monocristalinos de rugosidade $\sim 16,5\text{nm}$, e absorvância elevada e baixa emitância correspondente a 0,93 e 0,23, respectivamente. Em outro trabalho, Medeiros *et al.* (2019) produziu filmes de cromo negro eletrodepositados em substratos de aço inoxidável com absorvância médias próximas a 95%. Em uma abordagem diferente, Abed *et al.* (2020) preparou um compósito de $\text{Co}_3\text{O}_4:\text{Cr}_2\text{O}_3$ com diferentes concentrações atingindo uma absorvância máxima de 0,93.

Outro absorvedor conhecido é o de molibdênio, através de uma rota química assistida por ultrassom, Akoba *et al.* (2021) depositou Mo/MoO_3 em folha de Mo corroída atingindo uma absorvância de 0,91 e baixa emitância de 0,05. Qiu; Gao e Liu (2020) investigaram o efeito da adição de Mo em filmes de $\text{HfC}/\text{Al}_2\text{O}_3$, eles concluíram que sua adição possui um resultado positivo no qual a absorvância/emitância alcançou um valor de 0.92/0.11.

Já os absorvedores intrínsecos utilizam de um material com propriedades seletivas inerentes do material. Os materiais que ocorrem naturalmente não têm propriedades seletivas solares eles são estáveis mas com baixa efetividade óptica, alguns exemplos ideais são semicondutores e os metais de transição combinados com óxidos e nitrogênio alguns exemplos são W, HfC , V_2O_5 , SnO_2 , In_2O_3 , MoO_3 dopado com Mo e ZrB_2 (BELLO; SHANMUGAN, 2020; SALVI *et al.*, 2018).

Os revestimentos semicondutores possuem um *bandgap* entre 0,5 – 1,2 eV, o que lhes confere características condutoras e não condutoras dependendo da energia incidente. Esses

revestimentos são utilizados como camada antirreflexiva com o objetivo de maximizar a condução de luz na superfície do revestimento, dado que estes absorvem comprimentos de onda curtos e reduzem as emissões térmicas em regiões do infravermelho. Dentre os materiais mais comuns estão as camadas a base de Si, Al, Ge (MOON *et al.*, 2014).

Outro tipo de cobertura são os filmes multicamadas, no qual se aplica diferentes revestimentos afim de se obter maior eficiência. As camadas intercalam materiais metálicos que são excelentes absorvedores e dielétricos que otimizam a absorção na região do visível. Wang *et al.* (2018b) fabricou um conjunto multicamadas sobre um substrato de alumínio, a primeira camada de Tungstênio funciona como uma barreira de difusão e camada refletiva no IR, já a dupla camada de W-WOx com baixo e alta fração de metal volumétrica atua como absorvedores seletivos, e por fim, o WOx age como uma camada antirreflexiva. Essa configuração permitiu que o sistema atingisse uma absortância de 0,93 e perdas por emissão de 0,058 representando um aumento de 34,9% de um filme composto apenas de W. Outro exemplo é o sistema desenvolvido por Gao *et al.* (2019a) de dupla camada absortiva e uma camada antirreflexiva de óxido de alumínio com a seguinte configuração: TiC–ZrB₂/ZrB₂/Al₂O₃, permitindo uma razão de $\alpha/\varepsilon = 0,92/0,10$.

Por fim, tem-se os revestimentos texturizados que podem ser configurados nas camadas reflexivas criando um sistema de aprisionamento óptico, de forma que a radiação incidente reverbere na superfície absorvedora criando múltiplos efeitos de absorção e reflexão. No entanto, existe um critério para a texturização de uma superfície que é dependente da espessura do substrato. Quando a espessura do substrato é maior que o comprimento de onda da irradiação ocorre um aumento de sua absortância, porém se o comprimento de onda for maior que a espessura do metal absorvedor, a superfície deve ser lisa (PELENOVICH *et al.*, 2022).

Vale ressaltar que as categorias existentes são relativas à tipo de material, configuração e morfologia do absorvedor. Logo, um revestimento pode ter mais de uma classificação. A Tabela 2 descreve alguns exemplos de materiais utilizados como superfícies seletivas, todos com absortância acima de 80% e emissividade na faixa de 2-25 %, apesar dos materiais possuírem características definitivas na eficiência térmica, outros fatores podem afetar os sistemas termossolares como o método de deposição, tipo e tratamento do substrato e espessura do filme seletivo também pode gerar alterações, visto que este pode atuar como filtro a determinados comprimentos de onda de radiação incidente, dado que a espessura da superfície for elevada, a quantidade de energia emitida por radiação também será maior.

Tabela 2 - Tipos de absorvedores seletivos.

Material	Substrato	α	E	Método de deposição	Tratamento do substrato	Referência
Cr ₂ O ₃	Cu	0,93	0,23	<i>Spin Coating</i>	Polimento mecânico	(TSEGAY <i>et al.</i> , 2022)
Cr negro	Aço inoxidável	0,94	-	Eletrodeposição	Banho ácido	(MEDEIROS <i>et al.</i> , 2019)
Co ₃ O ₄ :Cr ₂ O ₃	Al e vidro	0,88-0,93	0,12-0,06	<i>Spin Coating</i>	Limpeza desengordurante	(ABED <i>et al.</i> , 2020)
Cr ₂ O ₃ /Cr/ Cr ₂ O ₃	Aço inoxidável e vidro	0,89	0,25	Vaporização e-beam	Limpeza desengordurante	(KHELIFA <i>et al.</i> , 2018a)
Mo/MoO ₃	Folha de Mo	0,91	0,05	Rota química assistida por ultrassom	Limpeza com H ₂ O ₂	(AKOBA <i>et al.</i> , 2021)
Mo- HfC/ Al ₂ O ₃	Aço inoxidável	0,92	0,11	<i>Magnetron Sputtering</i>	-	(QIU; GAO; LIU, 2020)
Mo/Al ₂ O ₃	Aço inoxidável	0,90	0,08	<i>Magnetron Sputtering</i>	Polimento mecânico	(GAO <i>et al.</i> , 2017c)
ZrOx/Zr/ZrOx/AlxOy	Aço inoxidável	0,93	0,11	Vaporização e-beam	Limpeza desengordurante	(KHOZA <i>et al.</i> , 2019)
W/W-WOx/W-WOx /WOx	Al	0,93	0,058	<i>Magnetron Sputtering</i>	Limpeza com álcool	(WANG <i>et al.</i> , 2018b)
TiC-ZrB ₂ /ZrB ₂ /Al ₂ O ₃	Aço inoxidável	0,92	0,10	<i>Magnetron Sputtering</i>	-	(GAO <i>et al.</i> , 2019a)
MoSi ₂ -Si ₃ N ₄	Aço inoxidável	0,88	0,02	<i>Magnetron Sputtering</i>	-	(HERNÁNDEZ-PINILLA <i>et al.</i> , 2016)
Co-WC-Al ₂ O ₃	Aço inoxidável	0,83	0,14	Pulverização	Limpeza desengordurante	(DUAN <i>et al.</i> , 2017)
TiN/TiNO/ZrO ₂ /SiO ₂	Si	0,92	0,17	<i>Magnetron Sputtering</i>	-	(LI <i>et al.</i> , 2019)
Cr/AlCrN/AlCrNO/AlCrO	Aço inoxidável	0,94	0,12	Deposição a vapor física	-	(WANG <i>et al.</i> , 2018c)
Zr _{0,3} A _{10,7} N/Zr _{0,2} A _{10,8} N/A ₁₃₄ O ₆₀ N ₆	Cu	0,95	0,08	Vaporização e-beam	Limpeza com álcool	(MENG <i>et al.</i> , 2018)

4.5. DEPOSIÇÃO DE FILME VIA MAGNETRON SPUTTERING

Além da busca pela melhor seletividade óptica possível, é fundamental também concluir qual a melhor maneira de realizar a deposição do material em forma de filme sobre o substrato. Para tanto, é necessário que o material apresente propriedades que permitam sua manipulação e se adequem a variedade de técnicas de deposição existente.

Desde que Tabor (1961) iniciou os estudos de sobre as superfícies seletivas várias técnicas de deposição se estabeleceram na literatura como formas eficientes de produção de filmes, como rotas químicas (SRIMARA *et al.*, 2020), Eletrodeposição (MEDEIROS *et al.*, 2022, 2019), *Spray* pirólise (HERNÁNDEZ-PÉREZ *et al.*, 2021), tintas seletivas oticamente (SOUSA *et al.*, 2018), etc.; pela técnica sol-gel (DING *et al.*, 2021), deposição química a vapor (CVD) (WANG *et al.*, 2018a), deposição física a vapor (PVD) como o *Sputtering* e o *Magnetron Sputtering* (SILVA NETO *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2020).

Dentre as diversas técnicas de deposição de materiais em substratos metálicos, a técnica de pulverização catódica (*Sputtering*) é uma das mais difundidas, como visto na Tabela 3 em um estudo conduzido por Kennedy (2002). Não obstante, de acordo com pesquisas de Wu *et*

al. (2013) o *sputtering* é uma técnica que tem o potencial de ser modelada ao mercado consumidor, podendo ser criada superfícies seletivas coloridas que atraem o público em questão de estética, sem perder suas principais funções, outra vantagem é sua rápida deposição que satisfaz a produção em massa. Além disso, é uma técnica limpa, flexível quanto aos materiais, possui um melhor controle de espessura e uniformidade, não requer elevadas temperaturas, pode produzir multicamadas sequenciais ou simultaneamente (BARSHILIA *et al.*, 2011). Entretanto, alguns desafios ainda devem ser suplantados já que o custo de produção é relativamente elevado.

Tabela 3 - Métodos de fabricação de determinadas superfícies absorvedoras.

Revestimento	Fabricação	α	ε (100°C)	Estabilidade térmica	Fabricante
Aço Inoxidável modificado	Conversão química	0,62-0,93	0,10	<200°C no ar	SEL, INCO
Níquel Negro (NiS-ZnS)	Eletrodeposição	0,88-0,96	0,03-0,10	<200°C no ar	Maxorb
Cromo Negro (Cr-Cr ₂ O ₃)	Eletrodeposição	0,97	0,09	400°C no vácuo e 350°C no ar	MTI, Chrome Coat, Energie Solaire
Ni-NiO _x	<i>Sputtering</i>	0,96	0,10	300°C no ar	Sunstrip
Mo-Al ₂ O ₃	<i>Sputtering</i>	0,96	0,16 (350°C)	350-500°C no vácuo	Solel
Mo-Al ₂ O ₃	<i>Sputtering</i>	0,96	0,06 (350°C)	350-500°C no vácuo	Turbo Sun
Mo-SiO ₂	<i>Sputtering</i>	0,94	0,13 (580°C)	580°C no vácuo	Angelanton i
W-Al ₂ O ₃	<i>Sputtering</i>	0,96	0,16 (350°C)	350-500°C no vácuo	Solel

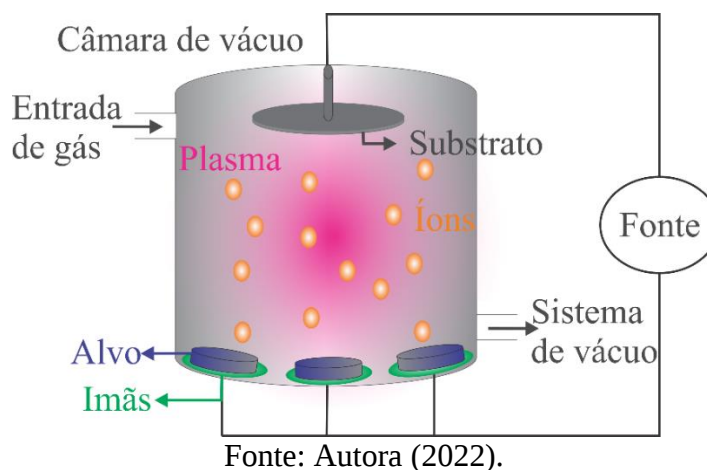
Fonte: Adaptado de Kennedy (2002).

O princípio de funcionamento desse PVD consiste no bombardeamento de um gás ionizado, em geral Argônio e Oxigênio, que sob a influência de um campo eletromagnético causa a erosão de um alvo (fornecedor do material precursor do filme) vaporizando-o, este se condensa ao entrar em contato com o substrato, sua configuração está descrita na Figura 7 (KIM; YEOM, 2019). Dessa forma, o processamento ocorre de acordo com as seguintes etapas descritas por Baptista *et al.* (2018b):

1. Posicionamento do substrato: O substrato é fixado na parte superior da câmara;

2. Preparação da câmara: A configuração da câmara normalmente conta com uma bomba mecânica e uma turbomolecular ou iônica. A primeira condiciona a câmara em um processo de pré-vácuo à uma pressão de 10^{-3} mbar, a segunda é responsável por alcançar pressões de ultra-alto vácuo (acima de 10^{-6} mbar), simultaneamente a temperatura do sistema aumenta gradualmente.
3. Preparação dos substratos: Um gás inerte é inserido na câmara fazendo a pressão aumentar, quando essa estabiliza em um nível de 10^{-3} - 10^{-1} mbar, o plasma é iniciado. Este causa a ionização do gás, ou seja, os átomos de Ar são excitados perdendo um elétron da camada de valência, tornando-se eletricamente positivos Ar^+ (GOMES, 2001). O plasma também é responsável pela remoção de impurezas que estão adsorvidas na superfície do substrato contribuindo para o aumento do percentual de adesão do filme a ser depositado.
4. Deposição do filme: o substrato é rotacionado a uma velocidade fixa, afim de se manter uniformidade do revestimento a se depositar. Dentro da câmara de vácuo, os ímãs estão fixos em volta dos alvos (precursor do filme), quando a fonte de tensão é acionada, um campo eletromagnético é gerado entre o eletrodo negativo (alvo) e o positivo (substrato), tal campo acelera os íons Ar^+ de forma a bombardear o alvo transferindo energia de forma a expulsar os átomos do alvo que vaporizam no sistema e se projetem abruptamente no substrato (depositando). Além disso, o campo eletromagnético mantém os íons em uma trajetória helicoidal definida que aumenta a probabilidade de colisão entre os íons e o alvo, elevando a taxa de deposição.
5. Resfriamento: Assim que o processamento finaliza, o sistema de resfriamento é acionado para o resfriamento das bombas e dos alvos. A câmara é ventilada e os substratos com filmes já depositados podem ser removidos do sistema.

Figura 7 – Esquemático de um *Magnetron Sputtering*.



O *Magnetron Sputtering* pode ser constituído de uma fonte de corrente direta (DC) ou de rádio frequência (RF), no qual se aplica uma tensão alternada. A primeira é exclusiva para sistemas cujo o alvo é um condutor elétrico, e o segundo permite a utilização de alvos metálicos e dielétricos. As principais diferenças desses sistemas são elencadas na Tabela 4 (GUDMUNDSSON, 2020).

Tabela 4 - Principais diferenças entre DC e RF *Magnetron Sputtering*.

	DC <i>Sputtering</i>	RF <i>Sputtering</i>
Alvo	Metais (Oxidação)	Cerâmicos (Bombardeamento)
Gás Oxigênio	Necessário	Opcional
Vantagens	- Alta taxa de deposição; - Área do alvo é grande; - Nível de composição elevado.	- Ausência de impurezas; - Fabricação do alvo é simples; - Elevada replicabilidade.
Desvantagens	- Fabricação do alvo é difícil; - Presença de impureza; - Baixa replicabilidade.	- Taxa de deposição limitada; - Baixo nível de composição; - Área do alvo é limitada.

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

Além do tipo de material e as características estruturais do sistema de pulverização catódica, os parâmetros de deposição também afetam o filme resultante. Dentre os mais importantes estão a velocidade de rotação do substrato, o tempo de pulverização, a potência aplicada e a distância entre substrato e alvo. Nos estudos de Cao e Hu (2000) foi observado que os filmes oriundos de Níquel e Cromo apresentaram uma superfície seletiva com uma absorbância de 0,8 e emissividade de 0,14 à 60°C, e uma reflectância próxima a zero no comprimento de onda de 0,8µm. As condições para a deposição por *Sputtering*, desse estudo está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de *Sputtering* do filme de NiCrOx.

Pressão (Ar+O ₂) (Pa)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Vazão de Ar (sccm)	Vazão de O ₂ (sccm)	Distância alvo (cm)
0,2	12	520	130	290	15

Fonte: Cao e Hu (2000).

Outro estudo (BARSHILIA *et al.*, 2008) avalia a deposição por *Sputtering* de 3 camadas, sendo acima do substrato uma camada de Cr_xO_y de 28 nm, uma camada intermediária

contendo Cr de 13 nm de espessura e no topo uma camada mais espessa de Cr_2O_3 contendo 64 nm. Essa deposição ocorreu em um substrato de cobre, que antes de ir para a câmara de baixa pressão foi polido e quimicamente tratado. O esquema final da superfície obteve um resultado alto de absorbância, na faixa de 0,899 - 0,912 e uma baixa emitância entre 0,05 - 0,05 à temperatura de 82°C. Os parâmetros para esse processo estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de *Sputtering* do filme de (Cr_xO_y / Cr / Cr_2O_3), depositados em um substrato de cobre.

Camada	Vazão de O_2 (sccm)	Potência (W)	Temperatura do substrato (°C)	Polarização Substrato (V)	Pressão (Pa)	Espessura (nm)
Cr_xO_y	15	100	150	-90	0,1	28
Cr	...	100	150	-90	0,1	13
Cr_2O_3	16	500	150	-90	0,1	64

Fonte: Barshilia *et al.* (2008).

Capítulo III
Materiais e Métodos

5. MATERIAIS E METODOS

5.1 CONDIÇÕES APLICADAS

Diante do estudo bibliográfico realizado, foram escolhidos dois tipos de materiais absorvedores: Cr e Mo metálico, ambos são metais de transição da família 6B da tabela periódica, bem estabelecidos na literatura atual e promissores em aplicações comerciais. A Tabela 2-3 é um exemplo da gama de aplicações de tais sistemas com desempenhos extraordinários, demonstrando um alto grau de absorvância (acima de 90%) e baixa emissividade (abaixo de 20%) com estabilidade térmica dentre as temperaturas aplicadas.

Em específico, o cromo é um elemento abundante, possui diversos estágios oxidativos, elevado ponto de fusão (1.890°) o que lhes confere estabilidade térmica, sendo um ótimo absorvedor no espectro visível e baixo emissor no espectro do infravermelho (NUNES *et al.*, 2018), ele é duro, frágil e apresenta uma resistência natural a corrosão devido a formação de uma camada passivadora extremamente estável (MOURA, 2010). Sua estrutura cristalina é definida como cúbica de corpo centrado em temperatura ambiente (CALLISTER; OTHERS, 2000; SNAVELY; VAUGHAN, 1949).

Enquanto o molibdênio possui elevada temperatura de fusão (acima de 2.000°C), alta estabilidade termoquímica, boa condutividade específica (MOHAMMAD; SELIM, 2011; SOUZA; DE ANDRADE LIMA, 2016). Suas características favorecem aplicações em elevadas temperaturas não sofrendo deformações significativas quando submetidos à trocas térmicas rápidas (OLIVEIRA, 2021).

Diante do proposto, também foi avaliado o efeito de uma camada de silício com mesma espessura que a camada absorvedora. O silício é um material semicondutor abundante com diversas aplicações optoeletrônicas. Sua energia de superfície são dependentes da orientação, simetria, deformação, potencial de energia livre das ligações Si-Si, tipo de *bandgap* que está diretamente relacionada a densidade atômica do material, cuja dinâmica pode ser controlada através do método de síntese e deposição da camada absorvedora (KUMAR *et al.*, 2020; RACHMAN, 2018).

As ligações Mo-Si e Cr-Si são comprovadamente benéficas, a introdução do silício nos revestimentos de Mo e Cr podem diminuir a refletividade do material, aumentar a resistência a oxidação, dureza do material e estabilidade térmica, vale salientar que a proporção aplicada também é importante visto um alta concentração de metal pode aumentar a excitação dos fótons que passam da banda de valência para condução, no nível de Fermi favorecendo as

propriedades eletrônicas ou ópticas dos materiais. Estudos anteriores confirmaram que adição de uma camada de silício promoveu a passivação superficial que incrementou a resistência do dispositivo solar e reduziu sua reflexão (KIRYUKHANTSEV-KORNEEV et al., 2015; PAN; PU; YU, 2021; TAO et al., 2017)

Além da seleção dos materiais os parâmetros de deposição exercem uma extrema influência na estrutura cristalina e resposta óptica dos filmes, como demonstrado no tópico anterior. Visto que potências entre 10 e 100W são suficientes para ejetar as moléculas de alvos metálicos, foram escolhidos potenciais fixos de 60 W para os alvos de Mo e Cr (LANDI, 2009). Já para o material a base de silício faz-se necessário uma maior excitação das moléculas de forma que sejam ejetadas de seu substrato original, logo foi aplicado uma potência de 200 W como utilizado no trabalho de Silva Neto *et al.* (2019).

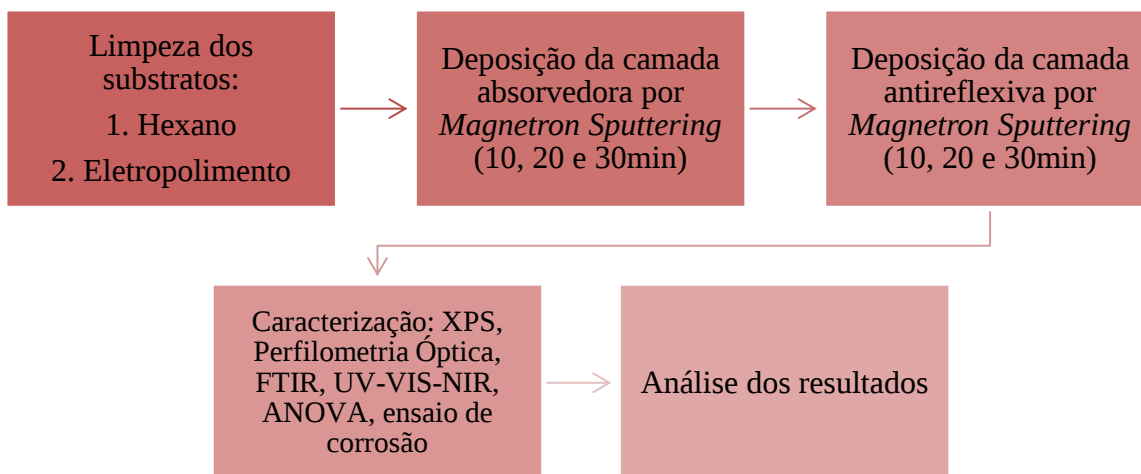
Os demais parâmetros (tipo e vazão do gás, pressão, rotação do substrato, distância alvo-substrato) foram mantidos os mesmos para todos os materiais, seus valores foram baseados nos trabalhos de Oliveira (2021) e Silva Neto (2017).

5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Dado que as propriedades dos filmes resultantes estão relacionadas com as características inerentes aos materiais, as condições de preparo de substrato, método e parâmetros de deposição, foram escolhidos três variáveis para deposição do filme: material, limpeza de substrato e tempo de deposição do revestimento, como demonstrado na Figura 8. Logo, foi realizada a seguinte metodologia:

1. Tratamento de substrato: Eletropolimento e limpeza com álcool hexano.
2. Obtenção de filmes de molibdênio e cromo.
3. Variação de parâmetros de deposição: tempo.
4. Obtenção da camada antirreflexiva com mesma espessura do filme absorvedor.
5. Caracterização óptica, química, morfológica, estatística e de corrosão.

Figura 8 - Planejamento experimental.



Fonte: Autora (2022).

5.3 TRATAMENTO DOS SUBSTRATOS

A preparação do substrato interfere no comportamento das superfícies solares seletivas, além de remover impurezas o tipo de tratamento pode modificar a morfologia da amostra contribuindo/prejudicando a aderência do filme absorvedor. Ao total, foram utilizados 72 substratos de aço inoxidável AISI 304 com dimensões de 30 x 30 x 0,5 mm, todo o procedimento foi realizado em triplicata para fins estatísticos. Antes da deposição, os substratos foram separados na metade para o tratamento individual de: eletropolimento e limpeza com álcool hexano. Tal processo objetivou a remoção de impurezas do substrato que possam vir a prejudicar ou reduzir a eficiência de operação do filme.

5.3.1 Limpeza por hexano

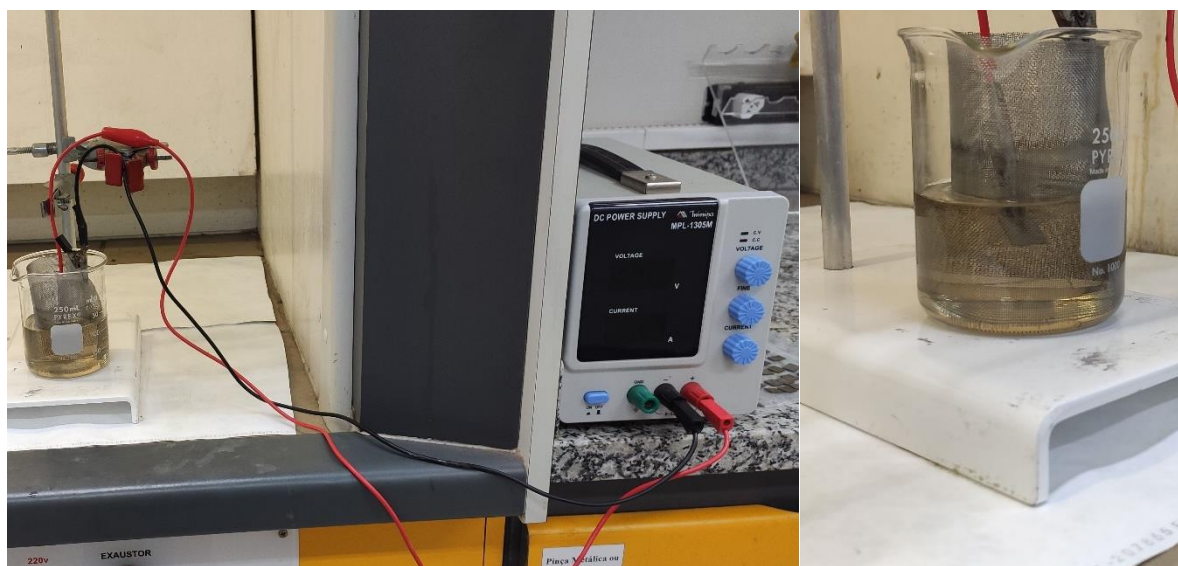
Foram imersos no desengordurante de hexano (Dinâmica, 99%) 36 substratos por 15 minutos. Em seguida, o excesso do álcool foi removido com água destilada e secos com papel absorvedor. Em sequência, as amostras foram submetidas a banho ultrassônico em imersão de álcool isopropílico (Dinâmica, 70%) por mais 15 minutos. Finalizado o processo, o excedente de álcool foi removido com água destilada e seco com papel absorvedor. Tal processo foi baseado na metodologia proposta por Vilela (1985).

5.3.2 Eletropolimento

O processo de polimento eletroquímico consiste com o nivelamento de uma superfície metálica, quando esta é convertida em um elemento anódico através de sua imersão em uma solução ácida quando aplicada uma corrente positiva (LANDOLT, 1987; LEE; LAI, 2003).

A solução eletrolítica foi preparada seguindo a ordem de reatividade dos reagentes descritos na Tabela 7. Em um béquer de vidro de 500 mL foi acrescentado 150 mL de ácido fosfórico, 75 mL do sulfúrico e 75 mL de glicerol, respectivamente, seguindo a proporção 2:1:1. Após estabilizada a temperatura do sistema, uma malha de aço inoxidável AISI 304 foi parcialmente introduzida no béquer submergindo na solução ácida. Em seguida, o substrato foi mergulhado no centro da malha, estando totalmente imersa na solução e conectada ao polo positivo de uma fonte de tensão enquanto o polo negativo estava conectado no polo negativo, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquemático do processo de eletropolimento.



Fonte: Autora (2022).

Em sequência, foi aplicada uma tensão de 10 V e 3 A na fonte DC (Minipa MPL-1305M) durante 5 min. Após isso, os resquícios da solução foram removidos com água deionizada e submetidos a 30 min de banho ultrassônico com álcool isopropílico. Por fim, as amostras foram secas com papel absorvedor.

Tabela 7 - Reagentes utilizados na solução de eletropolimento.

Reagente	Fabricante	Composição Química	Pureza (%)	Massa Molecular (g/mol)
Ácido Fosfórico	Synth	H ₃ PO ₄	85,0	97,994
Ácido Sulfúrico	Synth	H ₂ SO ₄	98,0	98,079
Glicerol	Dinâmica	C ₃ H ₈ O ₃	99,5	92,090

Fonte: Autora (2022).

5.4 DEPOSIÇÃO DO FILME ABSORVEDOR

No processo de deposição por *Magnetron Sputtering*, foi empregada uma fonte RF para os alvos elementares de molibdênio, cromo e silício, cujo as especificações estão descritas na tabela 8.

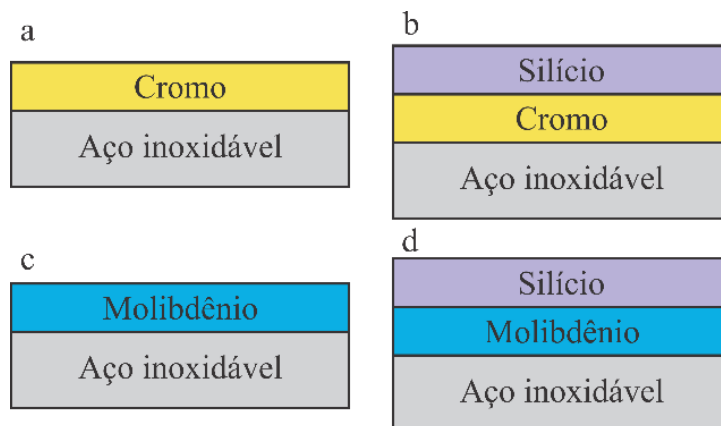
Tabela 8 - Especificações dos alvos utilizados.

Alvo	Fabricante	Pureza (%)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
Molibdênio	AJA <i>International Inc.</i>	99,97	50,8	6,350
Cromo	Kurt J. Lesker	99,95	50,8	3,175
Silício	Macashew Tecnologias LTDA	99,99	50,8	0,460

Fonte: Autora (2022).

Foram realizadas 12 deposições para cada tipo de limpeza, 3 tempos de deposição (10, 20 e 30 min), em triplicatas que totalizaram 72 amostras. Assim, obteve-se filmes de cromo, de molibdênio, cromo + silício e molibdênio + silício, esquematizados na Figura 10.

Figura 10 - Esquemático dos filmes depositados.



Fonte: Autora (2022).

Nessa técnica, a taxa de deposição ($\text{\AA}/\text{s}$) e a espessura do filme (nm) foram controladas pela fixação de uma distância de 106 mm do alvo para o substrato que rotacionou a uma velocidade de 20 rpm. Em função disso, os parâmetros analisados foram: tempo de deposição (10, 20 e 30 minutos) e tipo de limpeza do substrato (hexano e eletropolimento).

Foi fixado uma fita no substrato afim de preservar parte da amostra para análise da diferença de altura do filme para o substrato. Cada deposição foi feita com 3 substratos fixados no porta-amostra, aplicada uma potência de 60 W para Molibdênio e Cromo e 200 W para o silício. O equipamento utilizado foi o *Magnetron Sputtering Orion 5* (AJA International Inc.), visto na Figura 11, pertence ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LABFILM) no Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da UFPB.

Figura11 - *Magnetron Sputtering Orion 5*.

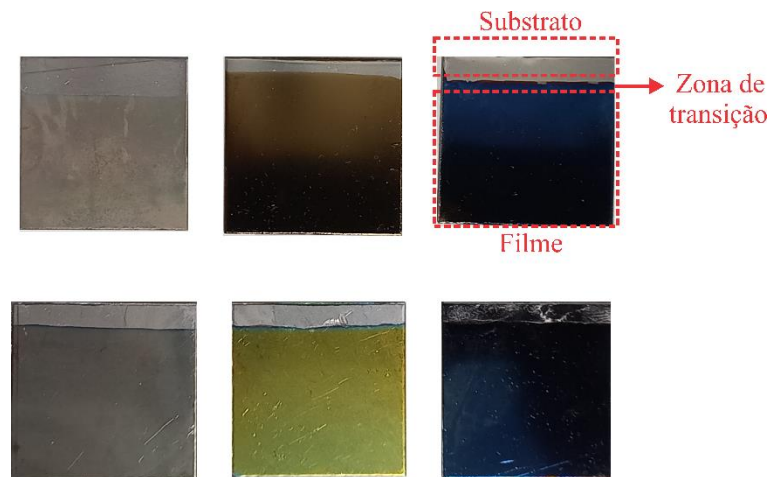


Fonte: Autora (2022).

Após posicionado o porta amostra na câmara de vácuo e os alvos de Mo, Cr e Si, a bomba de vácuo é acionada até o sistema atingir uma pressão de aproximadamente 1×10^{-5} Torr. Em seguida, o gás Argônio é injetado e a pressão é aumentada para cerca de 1×10^{-2} Torr. A fonte RF é ativada, na potência correspondente a cada alvo, para abertura do plasma. Dando sequência, a pressão é ajustada de forma a diminuir a potência refletida. Quando o sistema é estabilizado, o experimento é iniciado dentro do tempo determinado.

Finalizado o processo as amostras estão prontas para serem analisadas, alguns exemplares de filmes de Cr, Mo e com o revestimento de silício estão dispostos na Figura 12, respectivamente.

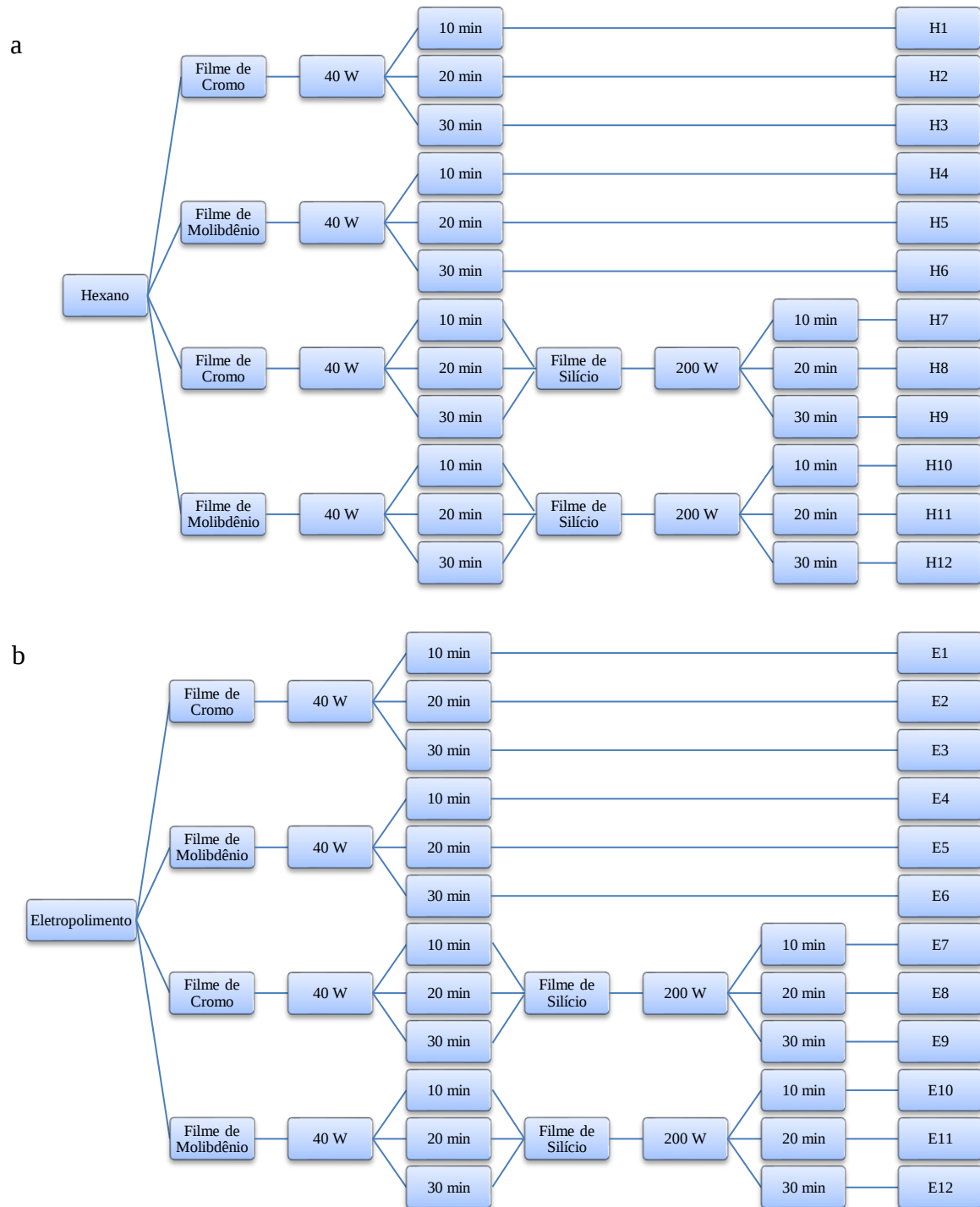
Figura 12 - Amostras tratadas com filmes depositados.



Fonte: Autora (2021).

Na Figura a seguir é possível verificar o esquemático das deposições bem como a codificação das amostras obtidas.

Figura 13 - Codificação das amostras segundo o planejamento experimental.



Fonte: Autora (2022).

5.5. CARACTERIZAÇÕES DOS FILMES

5.5.1. Espectrofotometria UV-Vis-NIR

O equipamento utilizado para as medidas de absorção dos filmes obtidos é um Espectrofotômetro na região do Ultravioleta Visível e parte do Infravermelho próximo (UV-Vis-NIR), fabricado pela Shimadzu, modelo UV-2600 operando na região de 220 nm a 1400 nm com medidas de reflectância, o qual possibilita a análise de filmes. Este equipamento está instalado nas dependências do LABFILM/CEAR/UFPB.

Esta caracterização será utilizada para determinar a reflectância dos revestimentos. Na Equação 5, para superfícies opacas cuja transmitância é zero, pode-se dizer que:

$$\alpha + \rho = 1 \rightarrow \alpha = 1 - \rho \quad (5)$$

Dessa maneira, para a obtenção dos níveis de absorção dos revestimentos produzidos no presente estudo, será empregada equação descrita acima.

Para se obter uma resposta mais próxima da real, foi calculada a absorptância hemisférica total a partir da integração da absorptância espectral obtida pelo equipamento UV-VIS-NIR sobre a da Irradiância do espectro solar $G(\lambda)$, de acordo com a equação a seguir:

$$\alpha = \frac{\int_{280}^{1400} (1 - \rho_{\lambda}) G(\lambda) d\lambda}{\int_{280}^{1400} G(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

Os dados da distribuição espectral da irradiação solar foram obtidos através da Norma Americana ASTM G173-03 (Renewable Resource Data Center, 2014).

A partir da resposta óptica foi estimada o *band gap* das amostras pela equação de Tauc e Davis Mott:

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \quad (7)$$

O parâmetro α corresponde ao coeficiente de absorção que foi determinada através da Lei de Beer-Lambert que foi simplificado em uma relação entre a absorptância (A) e a espessura do filme (L) sob análise (Equação 8). Além deste, o $h\nu$ representa a energia do fóton, B uma constante, E_g a energia de *band gap* e n é o expoente relacionado a transição dos elétrons entre

as bandas. O último pode assumir os valores de 1, 1/2, 2, 3/2 e 3 para transição direta, indireta, banda proibida direta e indireta, respectivamente (KUMARI *et al.*, 2020).

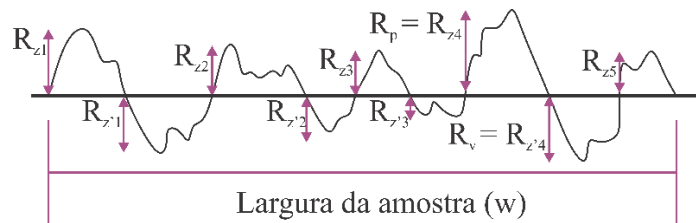
$$\alpha = 2.303A/L \quad (8)$$

Dado a natureza das amostras, o coeficiente exponencial assume o valor de ½. Com tais parâmetros definidos é extrapolado a parte linear do gráfico de Tauc ($h\nu$ versus $(\alpha h\nu)^n$), em que $y=0$, determinando a energia de banda.

5.5.2. Perfilometria Óptica

A perfilometria óptica é uma técnica acurada para determinar o perfil topográfico das superfícies relacionados a rugosidade e espessura dos filmes. Através dessa medida são verificados quatro parâmetros: R_p , R_v , R_a e S_a . O primeiro corresponde à altura máxima do pico, enquanto o segundo parâmetro está relacionado à altura mínima de vale, como exemplificado na Figura a seguir.

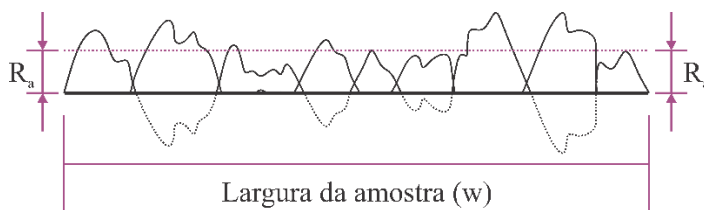
Figura 14 - Representação esquemática da determinação da altura de pico e vale dos filmes.



Fonte: Autora (2022).

Já para o coeficiente de rugosidade médio (R_a), os vales são refletidos para a origem dos picos e é determinado o somatório das alturas média de pico dentro do limite da largura da amostra sob análise como ilustrado na Figura 15, e descrito na equação 9 (CHAND *et al.*, 2011).

Figura 15 - Representação esquemática da rugosidade média.



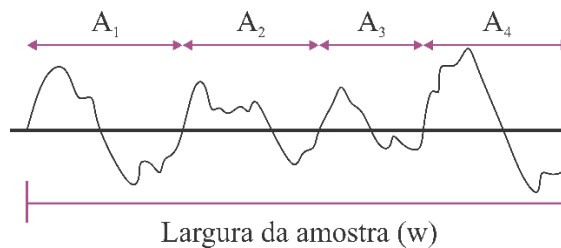
Fonte: Autora (2022).

$$Ra = \int_0^w R_z d(w) \quad (9)$$

Por último, também pode-se verificar a média das amplitudes (Sa) dos elementos da amostra dentro da largura determinada (Equação 10), exemplificado na Figura 16.

$$Sa = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (10)$$

Figura 16 - Amplitude média da análise de topografia.



Fonte: Autora (2022).

Tal medida foi realizada no perfilômetro óptico (Taylor Hobson) de modelo CCI MP, cujo os resultados foram plotados. Este equipamento está situado no Laboratório Integrado de Biomateriais (LABIO) do Centro de Ciências da Saúde (CCS) da UFPB. Foram realizadas oito leituras em pontos distintos de uma mesma amostra para a determinação de uma rugosidade média mais precisa em toda a amostra, o limite de corte é de 80 μm , com uma lente 50x no modo xyz, percorrendo uma área de 340 x 340 μm .

5.5.3. Análise de variância unidimensional (ANOVA)

De forma a determinar a confiabilidade estatística do experimento realizado e a influência dos parâmetros na absorvância dos filmes foi aplicado a Análise de variância unidimensional, que compara a localização das dispersões determinadas pela média através da aplicação de regressões não-lineares sobre os grupos em análise. Este método observa a multiplicidade de variância dos grupos em razão com a comparação da variância dentro de cada grupo (BRERETON, 2019; KAUFMANN; SCHERING, 2007; KIM, 2014).

A proporção relativa entre a soma quadrática da variância média dos grupos pela variância individual retorna o fator de distribuição independente (F), quando o valor de F é grande significa que os termos globais apresentam uma variação média elevada em comparação

com as diferenças individuais. Sendo assim é feito o teste de F que analisa o percentual de coerência da análise estatística, cujo valor deve ser menor ou igual a 5%, que indica que pelo menos uma das médias dos grupos difere da média geral, rejeitando a hipótese de que a equação da dispersão de pontos é uma constante (BALARAM NAIK; CHENNAKESHA REDDY, 2018; MOLINA-GÓMEZ; BULLA-CRUZ; DARGHAN CONTRERAS, 2021; VAN DEN BERGH *et al.*, 2020).

Quando pelo menos um dos grupos apresenta uma variância significativa é aplicada o teste de múltiplas variáveis simultâneas para verificar o percentual de influência (variação das médias) estatística dos grupos individuais.

Essa análise foi efetivada através da ferramenta de múltiplas regressões lineares do software OriginPro 2019b, no qual foram estabelecidos a equação que rege as variáveis dependentes.

5.5.4. Espectrofotometria na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia nessa faixa de radiação tem o objetivo de avaliar a caracterização química dos revestimentos a partir da identificação das regiões do espectro onde ocorram picos de absorção molecular específicos. Quando a radiação incide na amostra, parte é absorvida e a outra é transmitida para o detector, o sinal resultante é um reflexo da vibração molecular de cada partícula dentro da faixa espectral em análise, estas podem ser simétricas, assimétricas, de alongamento ou flexões (BERTHOMIEU; HIENERWADEL, 2009).

Dessa maneira, a espectroscopia na faixa do infravermelho em modo de Reflectância Total Atenuada (*Attenuated Total Reflectance* – ATR) foi executada na faixa espectral de 4000 cm^{-1} ($\sim 2500\text{ nm}$) a 600 cm^{-1} ($\sim 16700\text{ nm}$), com resolução de 4 cm^{-1} e 40 acumulações, no modo transmitância, com o objetivo de detectar as frequências vibracionais das moléculas presentes nos filmes. Esta análise foi efetivada no equipamento o espectrofotômetro IR-Tracer-100 da Shimadzu instalado nas dependências do LABFILM/CEAR/UFPB.

5.5.5. Espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raios X (XPS)

De forma a complementar a análise de FTIR-ATR, fora executada a análise química superficial qualitativa utilizada para determinar a composição elementar dos filmes finos

produzidos. Essa análise é baseada no efeito fotoelétrico, no qual uma superfície é atingida por uma emissão de Raios-X excitando os átomos que são ejetados na forma de elétrons com uma energia cinética específica, determinada pela equação. Quando submetido a um campo elétrico, esses fótons são direcionados a um detector que identifica os níveis eletrônicos de cada elemento. Nesse caso, é verificado o estado das ligações químicas elementares (ANDRADE, 1985; ISAACS *et al.*, 2021).

$$E_k = h\nu - |E_B| - \varphi \quad (11)$$

E_k representa a energia cinética do fóton, $h\nu$ a energia do fóton, E_b a energia de ligação e φ é a função trabalho do material.

A análise foi realizada no espectrômetro de fotoelétrons de Raios-X K-Alpha da *Thermo scientific* do Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC) instalado nas dependências da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP. As condições aplicadas para a obtenção dos espectros fora de um passo de energia de 200 eV, com 50 acumulações, tempo de análise pontual de 50 ms, e uma taxa energética de 0,05 eV.

5.5.6. Análise de corrosão

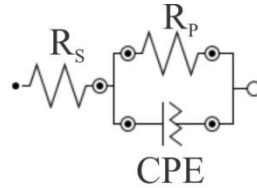
A resistência dos filmes as condições naturalmente adversas como umidade, vento, atrito é importante para a aplicações dos revestimentos em superfícies solares seletivas, dado que a ação do meio pode causar modificações na estrutura físico-química do material levando a sua fragilização e consequente perda de propriedade. Dessa forma, entende-se que o fenômeno da corrosão é um processo de deterioração da matéria que para os metais consiste e um processo de oxidação (perda de elétrons), foi avaliada a corrosão eletroquímica da superfície através da obtenção da resistência dos materiais quando submetidos a essas condições pelo ensaio de resistência a polarização linear e teste de impedância global (MIRANDA, 2018).

Fundamentalmente, o teste de corrosão eletroquímico consiste na imersão do eletrodo de trabalho (parcela que será oxidada), do contra eletrodo (componente que será reduzido) e eletrodo de referência numa solução eletrolítica, no qual a amostra apresentará uma diferença de potencial em relação ao eletrodo de referência (E_{corr}), sem a influência de uma fonte de tensão/corrente externa. Caso esse potencial varie com o tempo é entendido que a amostra possui uma tendência natural a corrosão dos materiais, caso o contrário aconteça o teste de

corrosão pode ser efetivado. A partir daí, a amostra é submetida à um intervalo de tensão e/ou corrente permitindo se obter o parâmetro de resistência ao fluxo de corrente pelo filme que pode ser traduzido como a resistência de polarização (R_p).

A primeira técnica aplicada é a de espectroscopia de impedância eletroquímica que se baseia na aplicação de um potencial de corrente alternada com pequenas variações dentro de um intervalo de frequência, nesse caso, 1 MHz a 0,1 Hz. A partir disso, para cada frequência aplicada é obtido um sinal senoidal de resposta (corrente) com uma fase diferente da onda original. Normalmente esse sinal de resposta é interpretado através de um circuito equivalente com componentes físicos que indicam as reações ocorrentes (MITTELSTÄDT, 1993). Para o sistema de corrosão metálico, o processo que governa essas reações podem ser interpretadas como um sistema de dupla camada elétrica que se traduz em um modelo matemático relacionando a resistência da solução (R_s), resistência de polarização na interface solução-metal (R_p) e um elemento de fase constante (CPE) que representa a capacitância do filme como demonstrado na figura a seguir (RAZA; REHMAN; GHOURI, 2018).

Figura 17 - Modelo do circuito equivalente para corrosão metálica.



Fonte: Autora (2022).

A partir desse circuito é possível traduzir a parcela real (Z') e imaginária (Z'') do espectro de impedância através das expressões matemáticas 12 e 13. Determinando-se assim, os coeficientes de corrosão pela impedância.

$$Z' = R_s + \frac{R_p}{1 + (wCR_p)^2} \quad (12)$$

$$Z'' = -\frac{wCR_p^2}{1 + (wCR_p)^2} \quad (13)$$

Onde w corresponde a frequência angular ($2\pi f$).

Já o ensaio de polarização a resistência linear, utiliza da mesma estrutura física do ensaio citado acima, três eletrodos imersos na solução. Quando a tensão atinge um patamar de estabilidade, as correntes catódicas e anódicas estão em equilíbrio, assim o E_{corr} é atingindo

quando a velocidade das reações de oxidorreduções é nula, assim a corrente de oxidação é igual a de redução ($i_{oxi} = i_{red} = i_{corr}$).

Para se obter os parâmetros de corrosão é necessário causar uma perturbação no sistema com a aplicação de uma corrente que são obtidas através das equações de Tafel:

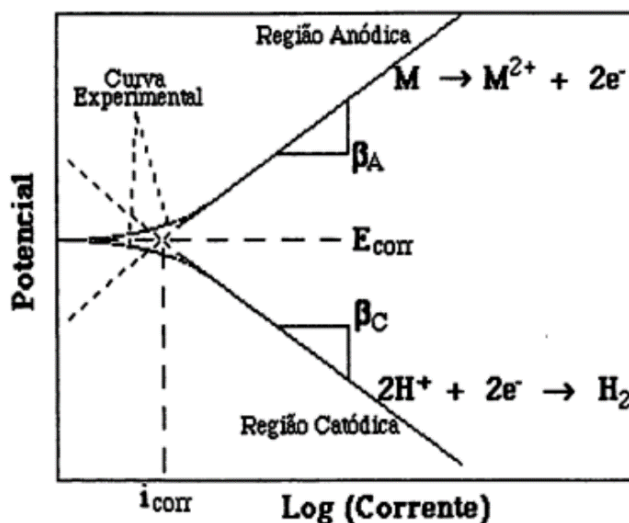
$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (14)$$

No qual B é:

$$B = \frac{b_a b_c}{2,3(b_a + b_c)} \quad (15)$$

E b_a e b_c são os coeficientes de reações anódicas e catódicas da inclinação das retas extrapoladas no gráfico de Tafel, exemplificada na Figura 18.

Figura 18 - Coeficientes da curva de Tafel.



Fonte: Mittelstädt (1993).

Diante dessa metodologia, foi analisado os parâmetros de corrosão através de uma célula eletroquímica de três eletrodos, cujo o eletrodo de trabalho é a amostra, o contra eletrodo um fio de platina e o de referência foi de Ag/AgCl, mergulhados em uma solução de NaCl (concentração de 3,5% de massa), com taxa de varredura de 1 mV/s. O equipamento utilizado foi um potenciostato/galvanostato da marca AUTOLAB, modelo PGSTAT204, instalado nas dependências do LABFILM/CEAR/UFPB.

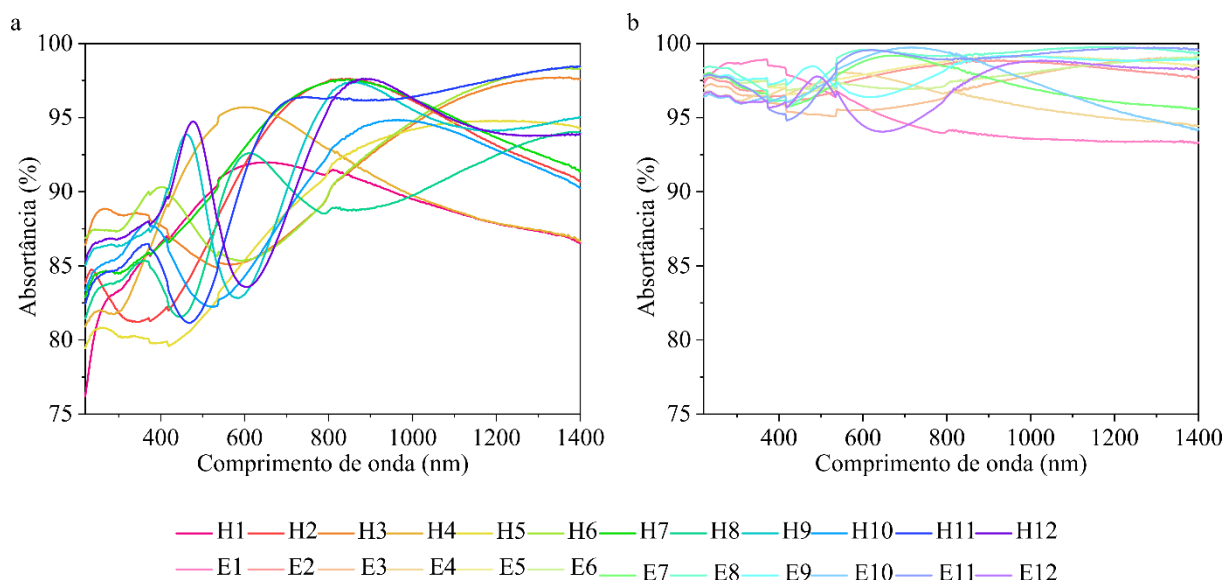
Capítulo IV
Resultados

6. RESULTADOS

6.1 Espectrofotometria UV-VIS-NIR

Os filmes de Cr, Mo, Cr/Si e Mo/Si depositados em substratos tratados por hexano ou eletropolimento e depositados através da técnica de pulverização catódica assistida por *Magnetron Sputtering* com diferentes tempos de deposição foram submetidos a análise de espectrofotometria de UV-VIS-NIR, entre os comprimentos de onda de 220-1.400 nm. À vista disso, os espectros de absorptância total foram obtidos, como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Espectros de absorptância total para os filmes depositados sobre substrato tratado por (a) hexano e (e) eletropolimento.



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 19 (a) é possível visualizar que existe uma elevada variação da absorptância solar dentro do range analisado. No entanto, todos os filmes apresentaram uma absorptância solar média acima de 88%, sendo mais elevada que a absorptância média do substrato puro com ~78,3 %segundo o trabalho de Oliveira (2021). Dentre esses, a amostra H11 obtida com 20 min de deposição de cada camada de Mo/Si, exibiu a maior absorptância solar média (92,8 %), enquanto a amostra H1 de Cr puro depositado por 10 min obteve a menor resposta óptica (88,6 %), para o substrato tratado com hexano.

Dentre os filmes de Cromo sem camada antirreflexiva (H1-H3), a amostra com o tempo de 20 min manifestou um comportamento mais eficiente com 91,4 %. Com a adição da

camada de silício (H7-H9), houve um aumento da eficiência de 4,5 % e ~0,7% na absorptância para a amostra de 10 e 30 min, respectivamente. No entanto, a amostra com de 20 min sofreu uma redução de 2,5%. Já para os filmes de Molibdênio sem silício (H4-H6), a deposição de 30 min obteve a melhor absorptância com 91,6%, quando acrescentada a camada de silício (H10-H12), o filme de 20 min se sobressai com uma absorptância de 92,8 %. Comparando-se os materiais entre si, o Cr e o Mo sem as respectivas camadas de Si, apresentaram absorptâncias equivalentes, com uma discrepância de $\pm 0,6\%$, nesse caso, a adição da camada antirreflexiva para o cromo representou um aumento de absorptância considerável, já para o molibdênio foi praticamente indiferente.

Não obstante, os espectros dos filmes depositados sobre substrato tratado por eletropolimento (por favor, verificar Figura 19 (b)) apresentaram um perfil similar com baixa variância ao longo do espectro de 220-1.400 nm. Posto isso, a absorptância solar média se manteve acima de 95 % para todas as amostras eletropolidas. Apesar da elevada uniformidade dos filmes dado o tratamento, a variação do tempo de deposição afetou fortemente o desempenho dos absorvedores. As amostras E1 e E4, com tempo de 10 min para o cromo e molibdênio, respectivamente, exibiram absorptâncias abaixo do substrato puro sem filme (96,6 % segundo Oliveira, (2021)), seguindo outra direção, o filme de Cr/Si com 20 min de deposição apresentou uma absorptância solar média de 98,8 %.

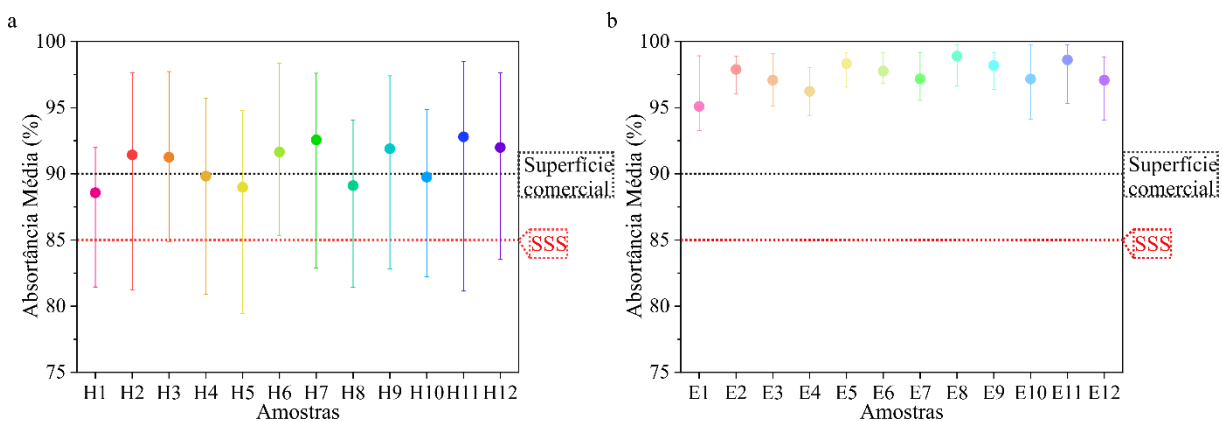
Dentre os filmes de cromo, E1 à E3, novamente o filme de 20 min apresentou a melhor absorptância com 97,9 %. Ainda quando adicionado o filme de Si, todas as absorptâncias aumentaram numa faixa de 2,2%, 1% e 1,1%, respectivamente. Os filmes de Mo possuem um comportamento similar, dentre as amostras E4-E6, a de 20 min de deposição demonstrou o melhor resultado (98,3 %), mas quando acrescentada a camada de silício (amostras E10-E12) os filmes elevaram suas absorptâncias em aproximadamente 1,0%.

Logo, foi visto que existe uma diferença considerável entre os filmes limpos com desengordurante para o eletropolido, sendo o último com a melhor performance óptica de 6,95 %. Isto está relacionada a diminuição da rugosidade da superfície, dado que a espessura do substrato é reduzida quanto mais homogênea a superfície menores serão as barreiras para absorção solar, esse mesmo comportamento foi observado em outros estudos como Oliveira (2021); Gonçalves (2020); Medeiros *et al.* (2022) e Pereira (2019a). Para confiabilidade da proposta, no tópico seguinte será discutido mais detalhadamente a influência da rugosidade nos aspectos ópticos dos filmes.

Quanto ao tipo de material escolhido, o cromo e o molibdênio apresentam comportamentos bem similares quando adicionada a camada antirreflexiva a maioria dos filmes apresentaram um aumento na eficiência entre 0,7 e 5,0 %, com exceção dos filmes H2, H4 e E12. Além deste parâmetro, notou-se que filmes com 20 minutos de deposição atingiram as condições ótimas de operação quanto a performance óptica, esse fator está relacionado a espessura do filme (condição que será melhor discutida no tópico 6.2). Seguindo a direção contrária, os filmes H5 e H8, também com deposição de 20 minutos, manifestaram um comportamento fora da curva devido a heterogeneidade do substrato com hexano que torna o processo de deposição menos uniforme.

Os resultados foram reorganizados de forma a evidenciar a absorvância média e o desvio padrão das triplicatas, como exposto na Figura 20. É visto que todas as amostras estão posicionadas acima da linha pontilhada vermelha (Figura 20 (a e b)), indicando que estas preenchem o requisito mínimo de absorvância para ser caracterizado como uma superfície solar seletiva ($\alpha > 85 \%$) (NUNES *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2011). No entanto, os revestimentos comerciais possuem uma média de 90 % de absorvância, o que exclui as amostras H1, H4, H5, H8 e H10 para aplicações reais, já que se encontram abaixo desse limite, diferente do observado na Figura 20 (b), no qual todas as amostras se enquadram nos requisitos absorvativos para aplicações em SSS comerciais (KENNEDY; PRICE, 2005).

Figura 20 - Absorvância hemisférica solar das amostras sobre substrato tratado com (a) hexano e (b) eletropolimento.



Fonte: Autora (2022).

Também é notado na Figura 20 (a) que as superfícies limpas com álcool apresentaram um desvio padrão ~2 - 4 vezes maior que as eletropolidas (Figura 20 (b)), confirmando que o

segundo tratamento permite um maior controle de superfície criando um absorvedor mais consistente ao longo do espectro solar, garantindo uma maior reprodutibilidade das amostras.

Considerando a integral dos valores espectrais que descrevem uma aproximação mais concisa das propriedades ópticas, foi calculado a absorptância hemisférica a partir da Equação 6, e estas foram sumarizadas na tabela 9. Os valores destacados em verde consistem nos melhores resultados de cada conjunto de testes, enquanto os vermelhos se encontram os resultados abaixo dos valores de absorptância do substrato puro. Sobre uma perspectiva geral, os valores de absorptância variam de 87,7(H5) para 92,1% (H4) enquanto o desvio padrão varia entre 2,9 (H1) à 5,9 (H5), em substratos limpos com hexano.

Quanto aos filmes sobre aço inoxidável eletropolido alternam com absorptâncias entre 95,3 (E1) - 98,7 % (E8) e desvio padrão de 0,7 (E6) para 1,95 (E1). É perceptível que as amostras com menos tempo de deposição (10 min) atingem os valores mais baixos de absorptância, há uma tendência de aumento desse parâmetro à medida que o tempo de deposição é elevado. Porém, nota-se que os valores convergem para a condição ótima de 20 minutos de deposição, como é visto para os substratos com tratamento de eletropolimento que atingem seu ápice nesse condicionamento.

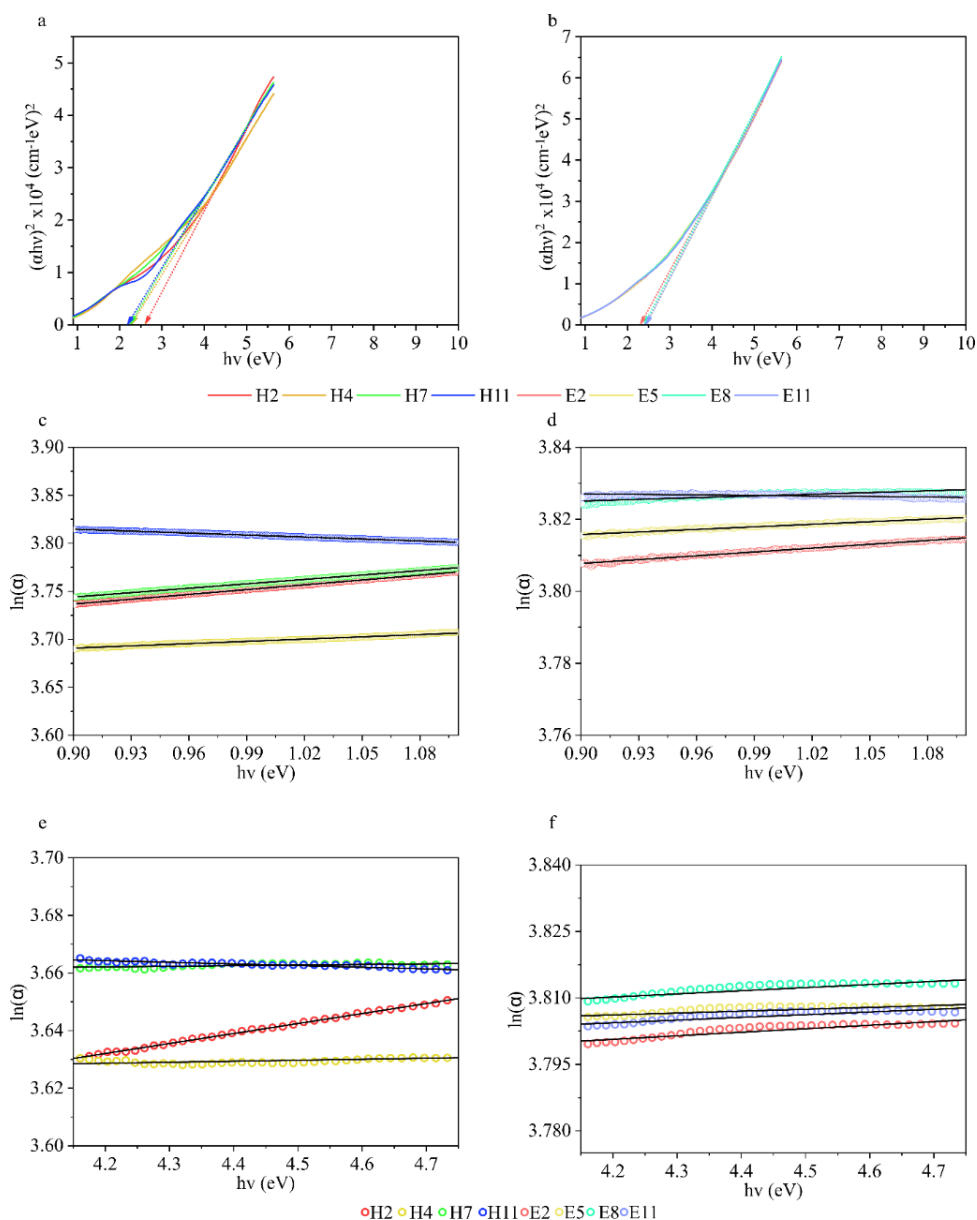
Tabela 9 - Absortância hemisférica média e desvio padrão das amostras.

Tratamento do substrato	Amostra	α médio (%)	Desvio padrão	Amostra	α médio (%)	Desvio padrão
Hexano	H1	89.92	2,90	H7	93.13 ↑	4.27
	H2	91.74	5,46	H8	88.75 ↓	3.62
	H3	89.11	4,57	H9	91.09 ↑	4.39
	H4	92.10	3,91	H10	88.55 ↓	4.15
	H5	87.68	5,92	H11	91.70 ↑	5,84
	H6	89.70	4,55	H12	91.33 ↑	4.20
Eletropolimento	E1	95.31	1.95	E7	97.55 ↑	1.13
	E2	97.76	0.81	E8	98.74 ↑	1.08
	E3	96.37	1.32	E9	97.85 ↑	0.88
	E4	96.78	1.04	E10	97.92 ↑	1.65
	E5	98.10	0.78	E11	98.41 ↑	1.35
	E6	97.41	0.71	E12	96.51 ↓	1.52

Também é visto na Tabela 9 que a adição de silício aumentou a absorptância da maioria dos filmes (como indicado pela seta verde), esse aumento varia entre 0.37 (H6 → H12) – 4.5% (H1 → H7) e 0.29 (E5 → E11) – 2.19% (E1 → E7). Em ambos os casos, o filme de silício causou um impacto mais significativo as amostras de 10 min.

A partir dos melhores resultados de absorptância de cada conjunto de amostras, foi estimado a energia de *bandgap*, através da extrapolação da reta ($y=0$) pela aproximação de Tauc, como pode ser visto na Figura 21 (a e b).

Figura 21 - Aproximação de Tauc para as amostras (a) H2, H4, H7 e H11 & (b) E2, E5, E8 e E11. Parâmetro de Urbach para região entre 0.9 - 1.1 eV e 4.15 - 4.75 eV para as amostras tratadas com (c & e) hexano e (d & f) eletropolimento.



Fonte: Autora (2022).

Para as amostras tratadas com hexano, houve uma variação mais evidente entre as curvas de $h\nu$ vs. $(\alpha h\nu)^2$, as energias obtidas foram de 2,55, 2,36, 2,30 e 2,21 eV para os filmes de H2, H4, H7 e H11, respectivamente. Já para os substratos eletropolidos apresentam uma maior estabilidade de energia, com *band gaps* que variam de 2,32, 2,4, 2,34 e 2,39 eV para os filmes E2, E5, E8 e E11, respectivamente. Todos os valores de energia de *band gap* estão em concordância com os encontrados na literatura para estruturas pura e multicamadas (HONG *et al.*, 1997; KASPAR *et al.*, 2014; KUMAR; PANDEY, 2017; MAY *et al.*, 2007; SIAN; REDDY, 2004; SINGH *et al.*, 2019).

Quanto às amostras tratadas com hexano é visto que os filmes com camada de Si demonstraram uma energia de banda menor o que contribui para maior absorção em comprimentos de onda mais elevados. Ainda, a elevada energia de *band gap* para os filmes sem camada antirreflexiva está relacionada com a interação da amostra com a atmosfera que gera uma leve passivação do substrato que também interage com a radiação solar, interferindo na resposta de energia. Em geral, os filmes de 10 min de deposição (H4 e H7) tem a menor E_g e a maior absortividade hemisférica média dentre os substratos tratados com hexano.

Dado que o cálculo da energia de banda considera a interação da energia solar com o conjunto filme + substrato, os valores de *band gap* para as amostras E2, E5, E8 e E11 possuem variações, entre elas, quase irrelevantes visto que o substrato possui uma uniformidade elevada.

Além desses parâmetros, é possível inferir o nível de desordem de redes que conduzem a um aumento na largura de *band gap* através da regra de Urbach, que estuda as regiões de contorno das curvas de absorção, ou seja, as regiões de baixa e elevada absortividade. Tal caracterização é calculada através da relação a seguir (ABED; ABED; YOUSIF, 2021; EL RADAFA; ABDELHAMEED, 2018; KHAN; ZULFEQUAR; KHAN, 2010):

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_u}\right) \quad (16)$$

Em que α é o coeficiente de absortividade, discutido acima, α_0 uma constante, $h\nu$ a energia fotônica e E_u a energia de Urbach. Assim, a partir do gráfico de $\ln(\alpha)$ versus $\ln(h\nu)$ foi estimado o coeficiente E_u pela inclinação da reta de linearização dos resultados, para a região de fraca absorção (0,9 -1,1 eV) e forte absorção (4,15 – 4,75 eV), como demonstrado na Figura 21 (c-f) e sumarizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparativo entre os parâmetros de energia de banda e Urbach.

Amostra	Absortância média (%)	$E_g(\text{eV})$	$E_u(\text{eV})$	$E_u(\text{eV})$
			hv: 0,9 – 1,1 eV	hv: 4,15 – 4,75 eV
H2	91,7	2,55	0,170	0,035
H4	92,1	2,36	0,078	0,006
H7	93,1	2,30	0,153	0,004
H11	91,7	2,21	0,068	0,006
E2	97,8	2,32	0,035	0,008
E5	98,1	2,40	0,024	0,004
E8	98,7	2,34	0,016	0,007
E11	98,4	2,39	0,005	0,006

Dentro dessa visão, é visto que para a região entre 0,9 - 1,1 eV os filmes compostos de molibdênio possuem os níveis mais baixos de energia de Urbach, como tal propriedade é dependente de distorções da rede cristalina e deslocamento de densidades, infere-se que estes apresentam menores defeitos estruturais (intersticiais ou vacâncias), devido ao baixo percentual de impureza e energias de *band gap* (KESKENLER *et al.*, 2014). Com exceção da amostra H4, os filmes com maiores tempos de deposição tendem a ter um menor coeficiente de Urbach, devido a maior espessura dos filmes que acarretam uma maior uniformidade topográfica, esse efeito também é visto nas amostras cujo o substrato foram eletropolidos, em qual os valores de energia de Urbach variam entre 5 – 35 meV.

No entanto, na região entre 4,15 – 4,75 eV, os valores obtidos para todas amostras variam entre 4 e 35 meV, isso condiz com a redução dos centros de espalhamentos relativos a estabilidade absorptiva nessa região espectral (KUMARI *et al.*, 2020).

6.2 Perfilometria Óptica

A caracterização topográfica de superfície foi determinada através da análise de perfilometria óptica. Os parâmetros de rugosidade superficial média estão expostos na Tabela 11, cada medida foi realizada em oito pontos diferentes para cada filme em triplicata, totalizando 24 aferições por amostra.

Tabela 11 - Parâmetros de rugosidade superficial das amostras.

Amostras	Materiais	A %	Ra μm	Rp μm	Rv μm	Sa μm	Espessura μm
H1	Cr	89,92	0,099	0,270	0,516	0,109	0,102
H2		91,75	0,111	0,334	0,591	0,113	0,132
H3		89,11	0,104	0,345	0,619	0,101	0,166
H4	Mo	92,10	0,096	0,361	0,579	0,132	0,082
H5		87,68	0,131	0,356	0,707	0,150	0,168
H6		89,70	0,115	0,320	0,643	0,129	0,210
H7	Cr + Si	93,13	0,116	0,371	0,615	0,121	0,258
H8		88,75	0,112	0,412	0,587	0,114	0,287
H9		91,09	0,145	0,373	0,609	0,128	1,472
H10	Mo + Si	88,55	0,105	0,359	0,582	0,128	0,310
H11		91,70	0,104	0,343	0,585	0,104	0,395
H12		91,33	0,092	0,322	0,512	0,100	0,427
E1	Cr	95,31	0,019	0,058	0,120	0,025	0,097
E2		97,76	0,013	0,021	0,032	0,013	0,125
E3		96,38	0,008	0,020	0,034	0,009	0,141
E4	Mo	96,78	0,012	0,039	0,055	0,029	0,033
E5		98,11	0,028	0,087	0,198	0,036	0,087
E6		97,41	0,015	0,030	0,066	0,019	0,119
E7	Cr + Si	97,55	0,059	0,124	0,102	0,053	0,213
E8		98,74	0,016	0,070	0,135	0,019	0,268
E9		97,85	0,012	0,030	0,041	0,015	0,759
E10	Mo + Si	97,92	0,022	0,061	0,179	0,026	0,136
E11		98,41	0,027	0,096	0,205	0,035	0,176
E12		96,51	0,045	0,165	0,302	0,053	0,405

Na Tabela acima, os valores destacados em verde representam os filmes com maior absorvância e menor espessura, enquanto os vermelhos destacam as menores absorvâncias e maiores espessuras para cada conjunto de materiais (Cr, Mo, Cr + Si e Mo +Si) e tratamento superficial (hexano e eletropolimento). É notado que os filmes de maiores absorvâncias apresentaram uma rugosidade aritmética, altura máxima de pico e vale intermediária. Como

esperado, os filmes com maior tempo de deposição possuem a maior espessura. Porém, os filmes sobre aço inoxidável eletropolidos apresentaram um nível de rugosidade entre 8 - 59 nm, confirmando sua elevada uniformidade.

Dentre os substratos limpos com hexano e compostos com cromo, a amostra H2 demonstrou um comportamento fora da curva, com rugosidade e absorvância elevada de 0,110 μm e 91,75 %, respectivamente. Quando aplicada a camada de silício (H8) houve uma redução da absorvância (88,75 %), com a menor rugosidade de seu conjunto (0,112 μm), isso ocorre porque o substrato contém inconsistências ao longo de seu perfil, tornando imprevisível a caracterização da amostra.

Para o conjunto de filmes a base de molibdênio, o filme H4 destacou-se pela absorvância elevada (92,10 %) diante da menor rugosidade (0,096 μm). No entanto, a amostra H11-Mo/Si obteve uma redução na absorvância (88,7 %) com o aumento da rugosidade (0,105 μm), nesse cenário, a rugosidade e a absorvância são grandezas inversamente proporcionais. Conforme discutido, o valor ideal de rugosidade média para filmes sobre substratos tratados com hexano ocorreu em $0,106 \pm 0,009 \mu\text{m}$, pico máximo de $0,352 \pm 0,02 \mu\text{m}$, altura de vale de $0,592 \pm 0,02$ e irregularidade média de $0,117 \pm 0,01 \mu\text{m}$, baseado nas amostras com propriedades ópticas em destaque (H2, H4, H7 e H11).

No que concerne aos substratos processados através de polimento eletroquímico e compostos de Cr e Cr/Si, os filmes E2 e E8 com 20 minutos de *Magnetron Sputtering* absorvâncias acima de 97 % apresentaram rugosidades intermediárias de 13 e 16 nm, respectivamente, com uma ordem de grandeza abaixo dos filmes sobre substratos processados com hexano. Enquanto que os fabricados com Mo e Mo/Si (E5 e E11), também com 20 minutos de pulverização catódica, destacaram-se pela rugosidade aproximada de $27,5 \pm 0,7 \text{ nm}$.

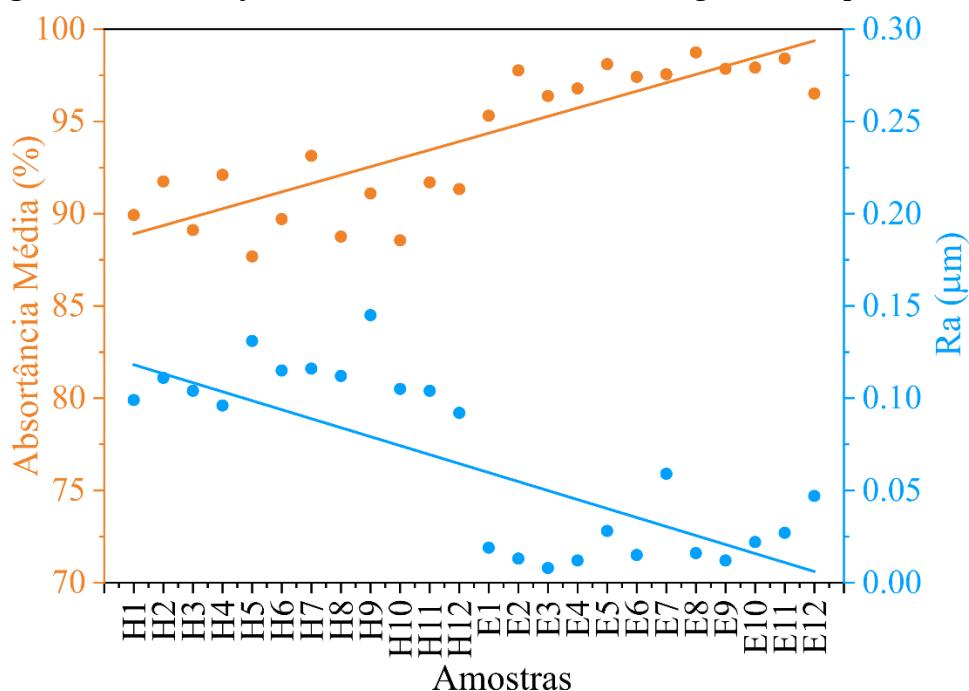
Nesse cenário geral, as amostras eletropolidas evidenciou os padrões morfológicos (R_a , R_p , R_v e S_a) mais uniformes que as tratadas com hexano, foi visto que o valor de rugosidade ideal se aproxima de $0,027 \pm 0,008 \mu\text{m}$, R_p de $0,021 \pm 0,008 \mu\text{m}$, R_v de $0,068 \pm 0,03 \mu\text{m}$ e S_a de $0,02 \pm 0,01 \mu\text{m}$, para obtenção dos melhores índices de absorvância.

Quanto a influência do tempo de deposição dos filmes, é perceptível que os filmes de monocamada metálica com 10 minutos de deposição obtiveram um perfil mais uniforme com valores mínimos de rugosidade (0,008 - 0,099 μm), com exceção da amostra E3 cujo o aumento do tempo de deposição favoreceu na diminuição do R_a , S_a , R_p e R_v . Entretanto, para as condições de multicamada em filmes compostos de Mo/Si, o aumento do tempo favoreceu o aumento dos parâmetros de rugosidade e espessura. Diferente das amostras formadas por Cr/Si,

que não demonstraram um padrão de correlação entre o tempo de deposição com as características topográficas, isso é devido a fina espessura do filme que acabam por acompanhar as características do substrato, isso permite uma interação da amostra com a atmosfera que interfere na criação de diferentes fases do cromo, modificando o tamanho de grão das partículas e aumentando sua rugosidade superficial (HONES; DISERENS; LÉVY, 1999; KHOJIER *et al.*, 2013).

A relação entre a rugosidade superficial e a absorvância pode ser visualizada na Figura 22. É notório que superfícies mais lisas tendem a ter maiores absorvâncias, existe uma tendência inversamente proporcional entre os parâmetros ópticos e as características topográficas. Consequentemente, as superfícies tratadas com polimento eletroquímico exibem os padrões de maiores absorvâncias (>95 %) e menores rugosidades (< 0.1 μm), devido a essa uniformidade também se percebe que a dispersão das amostras da curva de tendência de absorvância é menor.

Figura 22 - Correlação entre a absorvância média e a rugosidade superficial.

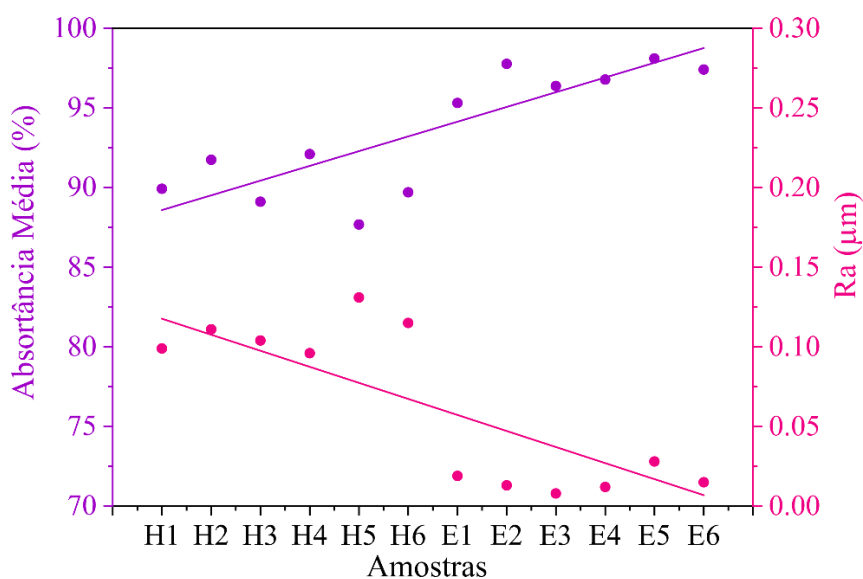


Fonte: Autora (2022).

Analisando os parâmetros isolados, observa-se na Figura 23 a relação entre absorvância média e a rugosidade dos filmes de monocamada de Cr e Mo. O filme H5 (Mo – 20 min.) destoa do perfil da curva com o menor percentual de absorvância (87,7 %) e maior rugosidade (0,131 μm), enquanto a amostra E2 (Cr – 20 min.) representa o máximo de absorvância (97,8%) e Ra

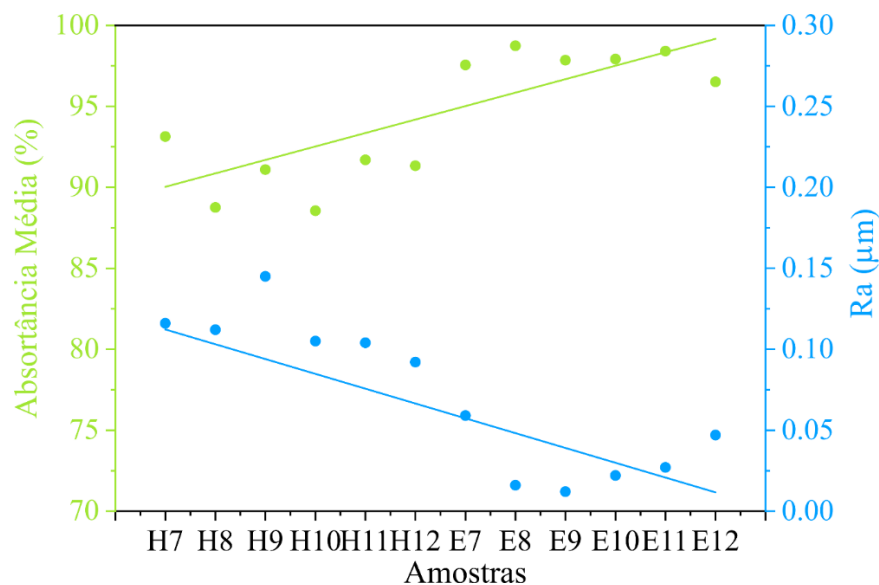
intermediário ($0,125\ \mu\text{m}$). Dentre os substratos limpos com hexano, os filmes de Cr e Mo apresentam uma rugosidade média de $0,1\ \mu\text{m}$ e $\sim 90,5\%$ de absorvância, apesar de tal variância mínima os filmes de cromo possuem um padrão mais conciso. O contrário é observado para os substratos eletropolidos, as amostras tendem a um ótimo padrão de absorvância para 20 minutos de pulverização catódica com $\sim 96\%$ de absorvância e rugosidade de $\sim 0,025\ \mu\text{m}$.

Figura 23 - Correlação entre absorvância média e rugosidade superficial para as monocamadas de Cr e Mo.



Para os filmes com camada antirreflexiva de Si, observa-se na Figura 24 que a rugosidade média aumenta para os filmes tratados com hexano ($\sim 0,11\ \mu\text{m}$) devido a adição da camada de silício que além de aumentar a espessura do filme, realça as irregularidades de superfície (Ra, Rp, Rv e Sa). Neste conjunto de tratamento superficial, o filme H7 (Cr/Si – 10 min.) recorreu com a maior absorvância $\sim 93\%$ e Ra de $0,116\ \mu\text{m}$, diferente da amostra H9 (Cr/Si – 30 min.) que exibiu o maior nível de Ra ($0,145\ \mu\text{m}$) e uma absorvância próxima de 91% .

Figura 24- Correlação entre absorvância média e rugosidade superficial para os filmes de Cr/Si e Mo/Si.

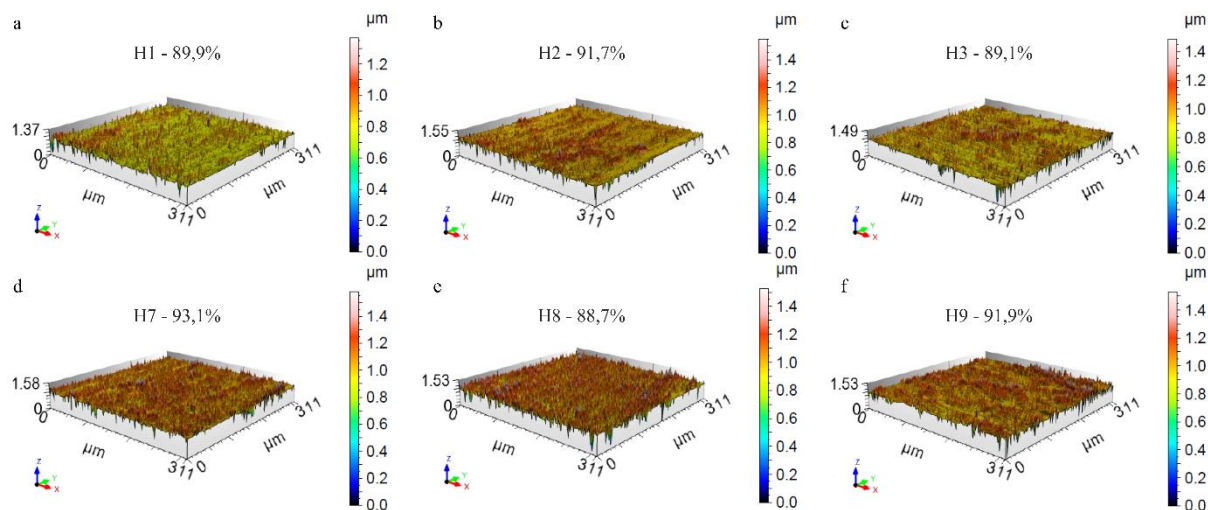


Fonte: Autora (2022).

Enquanto isso, os filmes sobre substratos processados por eletropolimento apresentam um padrão de crescimento da rugosidade com o aumento do tempo de deposição, principalmente para amostras compostas de molibdênio e absorvância ideal para 20 min. para o Cr e o Mo. A absorvância média desses filmes possui um valor aproximado de 98 % enquanto a rugosidade média é de 0,03 μm, destacando-se E8 (Cr/Si – 20 min de deposição) representa 98,7 % de absorvância para um Ra mínimo de 0,116 μm.

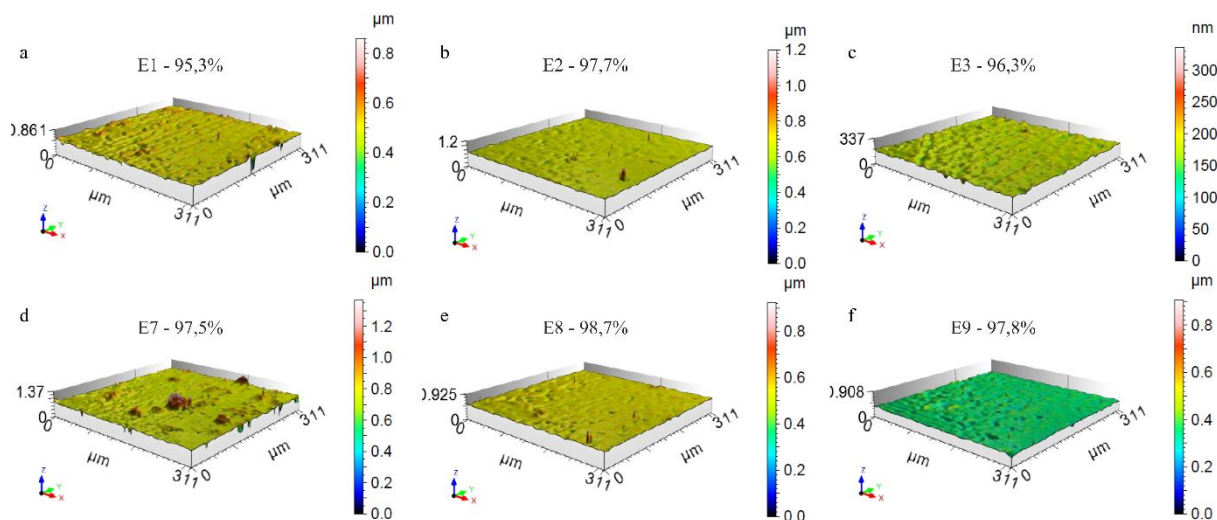
Além disso, observou-se o perfil 3D dos filmes. Na Figura 25 é demonstrado os filmes de cromo sobre o substrato mais rugoso. Independente das diferentes condições aplicadas, o perfil morfológico é similar entre todas as amostras. A adição do silício aumentou a espessura do filme, como ilustrado na Figura 25 (d-e) onde houve uma maior predominância de picos avermelhados indicando alturas mais elevadas de Rp. Comparando-se com a Figura 26 que exhibe os resultados dos substratos eletropolidos, é notável a uniformidade da superfície que contém um perfil com menos picos evidentes, corroborando o discutido anteriormente. A presença de picos isolados na Figura 26 (b & d) remete a presença de possíveis contaminações na superfície da amostra.

Figura 25 - Perfil topográfico das amostras tratadas com hexano compostas de Cr para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Cr/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.



Fonte: Autora (2022).

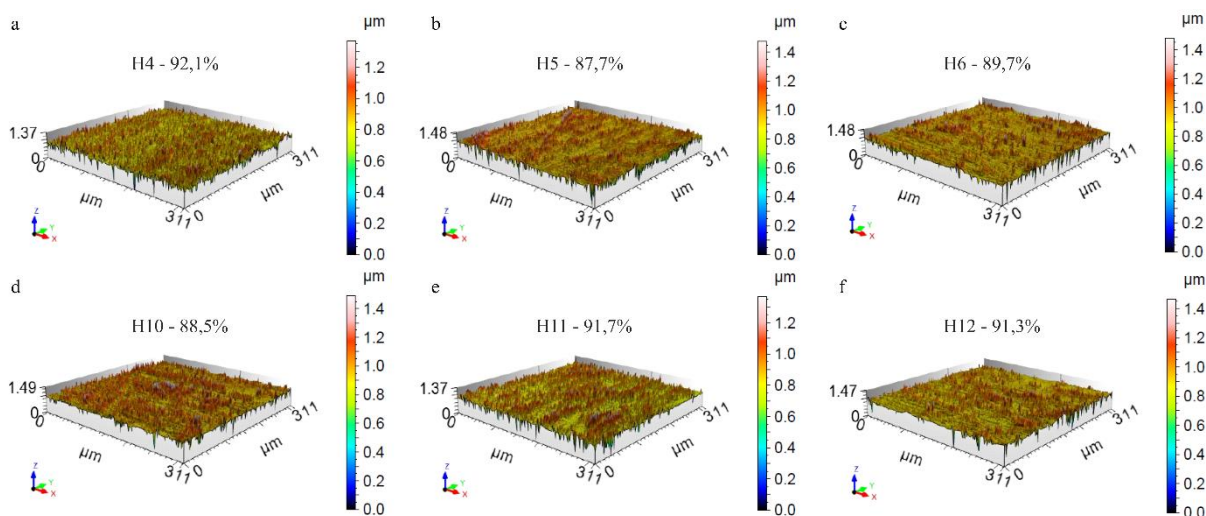
Figura 26 - Perfil topográfico das amostras tratadas com polimento eletroquímico compostas de Cr para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Cr/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.



Fonte: Autora (2022).

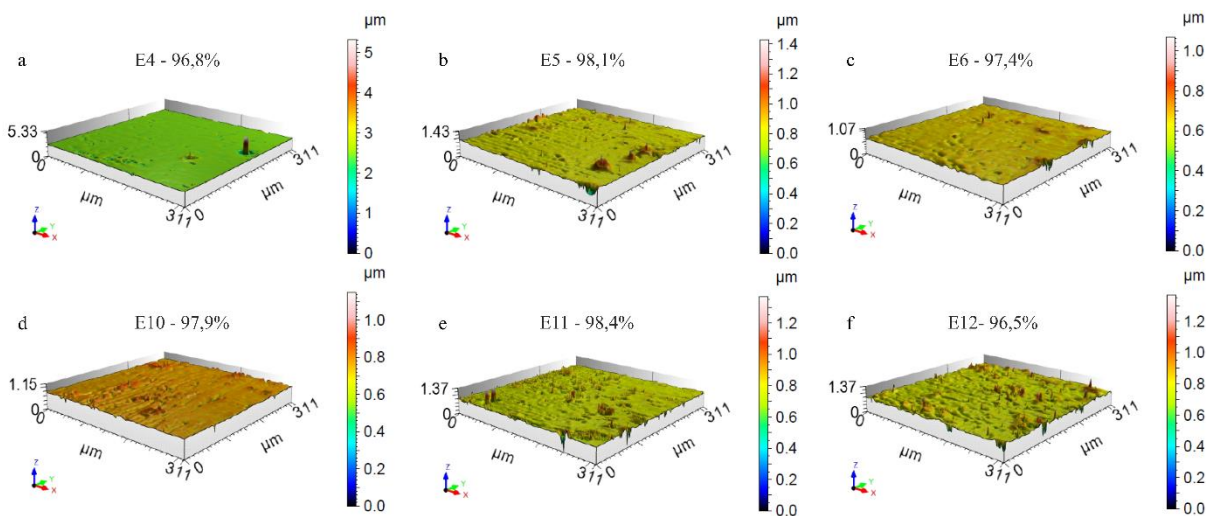
De forma semelhante, é ilustrado o perfil das amostras de molibdênio na Figura 27 (tratamento de hexano) que também apresentaram perfis similares entre si, porém nesse caso a adição de silício não é tão visual quanto nas amostras de cromo. Na Figura 28 (eletropolimento) percebeu-se o mesmo comportamento homogêneo devido ao tratamento de superfície.

Figura 27 - Perfil topográfico das amostras tratadas com hexano compostas de Mo para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Mo/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.



Fonte: Autora (2022).

Figura 28 - Perfil topográfico das amostras tratadas com polimento eletroquímico compostas de Mo para (a) 10, (b) 20 e (c) 30 min de deposição, e Mo/Si para (d) 10, (e) 20 e (e) 30 min, respectivamente.



Fonte: Autora (2022).

Em suma, todos os filmes apresentaram espessuras adequadas para sua classificação como filme fino, confirmando a eficácia da metodologia de deposição aplicada nesse trabalho. Os filmes de cromo puro obtiveram melhor desempenho para substratos com processamento de hexano e eletropolimento, enquanto para os filmes com camada de Silício, o molibdênio apresentou um padrão mais estável em ambos os substratos. Além disso, confirmou-se a uniformidade dos substratos eletropolidos em comparação com as de hexano.

Algumas amostras destoaram de um padrão definido, isso condiz com o fato de os filmes serem muito finos sendo afetados mais intensamente pelas características do aço inoxidável 304.

6.3 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância estatística foi aplicada para determinar o percentual de influência de cada parâmetro utilizado na deposição dos filmes em suas características finais (absortância, rugosidade e espessura), bem como diagnosticar a assertividade da metodologia utilizada. Na Tabela 12 estão descritos as variáveis estudadas e os valores lógicos associados a cada fator.

Tabela 12 - Variáveis aplicadas no estudo estatístico.

Variáveis dependentes	Variáveis independentes	Valores associados				
Absortância;	Tratamento de	Hexano (-1)	Eletropolimento (1)			
Rugosidade;	superfície					
Espessura de	Tipo de revestimento	Cr (-1)	Mo (1)	Cr/Si (-2)	Mo/Si (2)	
filme;	Tempo total de	10	20	30	40	60
	pulverização					

A partir desses parâmetros, a técnica de ANOVA utiliza padrões de iterações múltiplas entre as variáveis isoladas e combinadas de forma a determinar uma função que relacione os parâmetros dependentes e independentes. Quando o teste apresenta uma resposta estatisticamente significativa é retornado um valor associado a combinação aplicada, tal valor está associado a uma função quadrática hipotética com determinado grau de liberdade.

Como mencionado na metodologia, para garantir que este valor se encontra dentro do limite estabelecido pela função é necessário que o teste ($\text{prob} > F$) do coeficiente independente (valor F) e o erro seja menor que 5%, quando estes limites são coerentes a variável quadrática R^2 se aproxima de 1, assim, determina-se a efetividade do teste (HENSON, 2015; MISHRA *et al.*, 2019; STHLE; WOLD, 1989).

Mediante tal perspectiva, a primeira característica dependente avaliada foi a absortância, como descrito na tabela 13.

Tabela 13 - Influência dos parâmetros de deposição por *Magnetron Sputtering* nas propriedades absorptivas resultantes dos SSS.

Parâmetros isolados	Contribuição estatística	Erro padrão	valor F	Prob>F	R²
Tempo (t)	0,0114	0,0487	0,0545	0,8176	0,0025
Material (M)	-0,0640	0,5037	0,0161	0,9000	0,0007
Tratamento de Substrato (Ts)	3,4967	0,2809	154,91	<0,0001	0,8756
Parâmetros combinados	Contribuição estatística	Erro padrão	valor F	Prob>F	R²
t x M	-0,0008	0,0126	0,0044	0,9474	0,0002
t x Ts	0,0907	0,0130	48,3329	<0,0001	0,6872
M x Ts	0,0726	0,5036	0,0277	0,8867	0,0009
t x M x Ts	-0,0017	0,0126	0,0173	0,8970	0,0008

Diante do resultado apresentado, verifica-se na Tabela 13 que o tratamento superficial é o fator mais significativo para a determinação da absorptância, com um prob>F de $\sim 2 \times 10^{-11}$ e com o chi quadrático de 0,87. Além deste, o parâmetro de tempo de deposição associado ao tratamento de substrato (t x Ts) também representa uma contribuição efetiva para a determinação da absorptância com um prob> F de $\sim 5,58 \times 10^{-7}$ e chi quadrático de 0,6872. Os demais parâmetros isolados e combinados não apresentaram coeficientes expressivos que possam ser relevantes para a análise estatística.

A partir de tais coeficientes, foi realizada uma análise síncrona com todas as variáveis descritas na Tabela 13, de forma a estabelecer uma expressão aritmética que descreva a influência dos parâmetros simultâneos no comportamento da absorptância dos filmes seletivos, como expresso a seguir:

$$\alpha = 93,5563 + 0,01137t - 0,18365M + 3,39492Ts + 0,00332(t \cdot M) + 0,00339(t \cdot Ts) + 0,72284(M \cdot Ts) - 0,01806(t \cdot M \cdot Ts) \quad (17)$$

Essa análise exibiu um fator de correlação positivo (R²) de $\sim 0,898$, fica evidente na Equação 16 que o tratamento superficial é predominante na determinação da absorptância. Além deste, o material do tipo Cr e Cr/Si com valores lógicos de (-1 e -2) acarretam um efeito positivo na efetividade óptica em detrimento do Mo e Mo/Si. Essa resposta está de acordo com os resultados evidenciados na sessão 6.1.

De forma semelhante, foi aplicado a mesma técnica para avaliar o efeito da técnica de pulverização catódica por *Magnetron Sputtering* na rugosidade superficial e espessura dos filmes solares seletivos. As mesmas variáveis descritas na Tabela 13 foram objeto de estudo dessa sessão, cuja a análise resultou nos coeficientes exibidos na Tabela 14 (quanto a rugosidade superficial) e 15 (quanto a espessura dos filmes).

Tabela 14 - Influência dos parâmetros de deposição por *Magnetron Sputtering* na rugosidade superficial dos filmes.

Parâmetros isolados	Contribuição estatística	Erro padrão	valor F	Prob> F	R ²
Tempo (t)	0,0002	0,0006	0,0816	0,7779	0,0037
Material (M)	-0,0014	0,0062	0,0495	0,8260	0,0022
Tratamento de Substrato (Ts)	-0,0438	0,0031	200,04	<0,0001	0,9009
Parâmetros isolados	Contribuição estatística	Erro padrão	valor F	Prob> F	R ²
t x M	<0,0001	0,0002	0,0330	0,8576	0,0015
t x Ts	-0,0011	0,0002	54,344	<0,0001	0,7118
M x Ts	0,0025	0,0062	0,1602	0,6928	0,0072
t x M x Ts	0,0001	0,0002	0,5375	0,4712	0,0238

Tabela 15 - Influência dos parâmetros de deposição por *Magnetron Sputtering* na espessura das SSS.

Parâmetros isolados	Contribuição Estatística	Erro padrão	valor F	Prob> F	R ²
Tempo (t)	0,0129	0,0027	23,56	<0,0001	0,5171
Material (M)	-0,0480	0,0382	1,5786	0,2221	0,0670
Tratamento do Substrato (Ts)	-0,0604	0,0612	0,9748	0,3340	0,0424
Parâmetros isolados	Contribuição Estatística	Erro padrão	valor F	Prob> F	R ²
t x M	-0,0018	0,0009	3,6790	0,0682	0,1433
t x Ts	-0,0023	0,0018	1,6642	0,2100	0,0703
M x Ts	0,0090	0,0395	0,0524	0,8211	0,0024
t x M x Ts	0,0006	0,0010	0,3833	0,5422	0,0171

Tal como demonstrado na perfilometria é visto pela técnica de ANOVA que o tratamento superficial é imperativo na determinação da rugosidade. A variável isolada Ts destacou-se com um prob>F de $\sim 1,6 \times 10^{-12}$ e coeficiente de correlação de 90 %, sua combinação com o tempo (Ts x t) também teve uma contribuição significativa exibindo um chi quadrático de 0,71 e prob>F de $2,2 \times 10^{-7}$. Por outro lado, quanto a espessura do filme o tempo é o único fator estatisticamente relevante com Prob>F de $7,5 \times 10^{-5}$ e R² de $\sim 0,52$, isso é coerente com o fato que quanto maior o tempo de pulverização, maior será a quantidade de material depositado na superfície do substrato.

Posto isso, foi determinado a função matemática que especifica o critério de influência de cada variável. Na equação 18 fica mais perceptível que o tratamento de eletropolimento tende a reduzir a rugosidade da superfície, o coeficiente de associação das multivariáveis alcançou um percentual de 94,7 %. Já na equação 19, é visto que quando todos os valores são analisados simultaneamente, os fatores tipo de revestimento (M), tratamento de superfície (Ts) e a combinação (M x Ts) apresentam mais de 30% de efeito na parametrização da espessura (w), de forma que todo o teste exibiu um chi quadrático de 0,815.

$$Ra = 0,06184 + 0,00017t - 0,00198M - 0,04205Ts + 0,00002(t \cdot M) - 0,00006(t \cdot Ts) - 0,00870(M \cdot Ts) + 0,0003(t \cdot M \cdot Ts) \quad (18)$$

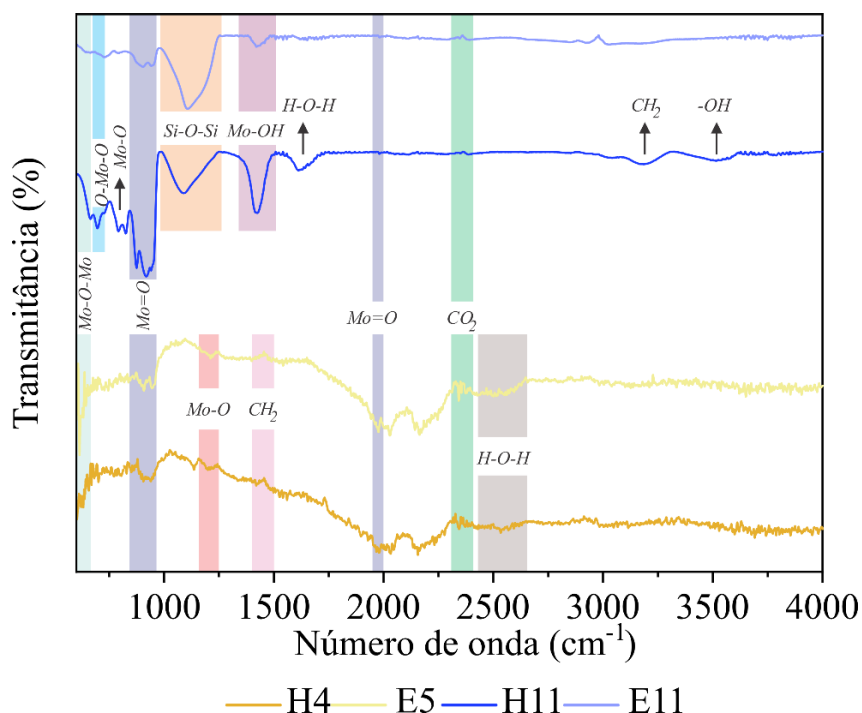
$$w = 0,01291t + 0,08433M + 0,03455Ts - 0,00367(t \cdot M) - 0,00316(t \cdot Ts) - 0,07037(M \cdot Ts) + 0,00221(t \cdot M \cdot Ts) - 0,11353 \quad (19)$$

Logo, foi notado que a análise estatística evidenciou os principais elementos da técnica de deposição que acarreta no aumento da absorvidade, rugosidade e espessura, bem como elencou a eficácia da técnica de *Sputtering* para o controle de tais parâmetros.

6.4 Espectrofotometria na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A partir dessa etapa, as amostras com os melhores resultados de absorvância na região do UV-Visível foram selecionadas para a caracterização composicional através da técnica de FTIR-ATR no modo de transmitância. A Figura 29 ilustra os espectros de transmitância normalizada, no intervalo de $600 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$, para as amostras de Mo e Mo/Si nos diferentes substratos.

Figura 29 - Espectros de transmitância para as superfícies seletivas de Mo e Mo/Si.



Fonte: Autora (2022).

As amostras H4 e E5 são formadas de molibdênio sobre substrato tratado com hexano e polimento eletroquímico, respectivamente. Suas curvas expõem padrões semelhantes, entre 600 e 650 cm^{-1} aparece uma banda que remete ao modo vibracional simétrico (ν_s) Mo-O-Mo de oxigênio ligado a uma possível fase MoO_3 do filme devida a uma passivação natural da superfície. Entre 904 e 937 cm^{-1} para a SSS H4 aparece um alongamento Mo=O, já para a amostra E5 esse alongamento é positivamente deslocado para 908 e 947 cm^{-1} devido a adsorção de átomos de oxigênio na estrutura do Mo (MAHESWARI; MURALIDHARAN, 2017; YU *et al.*, 2020).

Em 1.193 e 1.211 cm^{-1} uma banda discreta é evidenciada para H4 e E5, respectivamente, correspondente a deformação Mo-O (EDA, 1991). Em $\sim 1.450 \text{ cm}^{-1}$, nota-se a presença de um pico $-\text{CH}_2$ (GUI-LONG *et al.*, 2011). As bandas entre 1.970 e 2.200 cm^{-1} são típicas do diamante pertencente ao acessório ATR (OLIVEIRA, 2021). No entanto, entre essas bandas há uma evidencia de um modo vibracional Mo=O em 1.977 cm^{-1} (TSILOMELEKIS; BOGHOSIAN, 2011). Também se nota que o CO_2 na atmosfera aparece nos espectros de IR em $\sim 2.350 \text{ cm}^{-1}$, assim como, uma banda característica da presença de água em 2.500 cm^{-1} .

Além destas, observa-se na Figura 29 os espectros referentes as SSS de Mo/Si das amostras sobre aço inox limpo com hexano (H11) e polido eletroquimicamente (E11). Em 656 cm^{-1} o modo ν_s -Mo-O-Mo aparece suavemente em ambas as amostras referente a fase MoO_3 , porém em 699 cm^{-1} esse alongamento é distorcido para um alongamento assimétrico O-Mo-O característico de filmes com morfologia contínua (DUKSTIENE; SINKEVICIUTE; GUOBIENE, 2012; GUZMAN *et al.*, 1996).

Em 782 e 816 cm^{-1} do espectro da amostra H11 há a incidência de uma divisão de picos relativos a flexão Mo-O da fase MoO_3 (GUZMAN *et al.*, 1996; NAZRI; JULIEN, 1992; YU *et al.*, 2020). Já em 870 , 914 e 941 cm^{-1} a ligação Mo=O fica evidente na amostra H11, em E11 houve um transição positiva para 897 cm^{-1} (CHITHAMBARARAJ *et al.*, 2013; DIGHORE *et al.*, 2016; MAHESWARI; MURALIDHARAN, 2017).

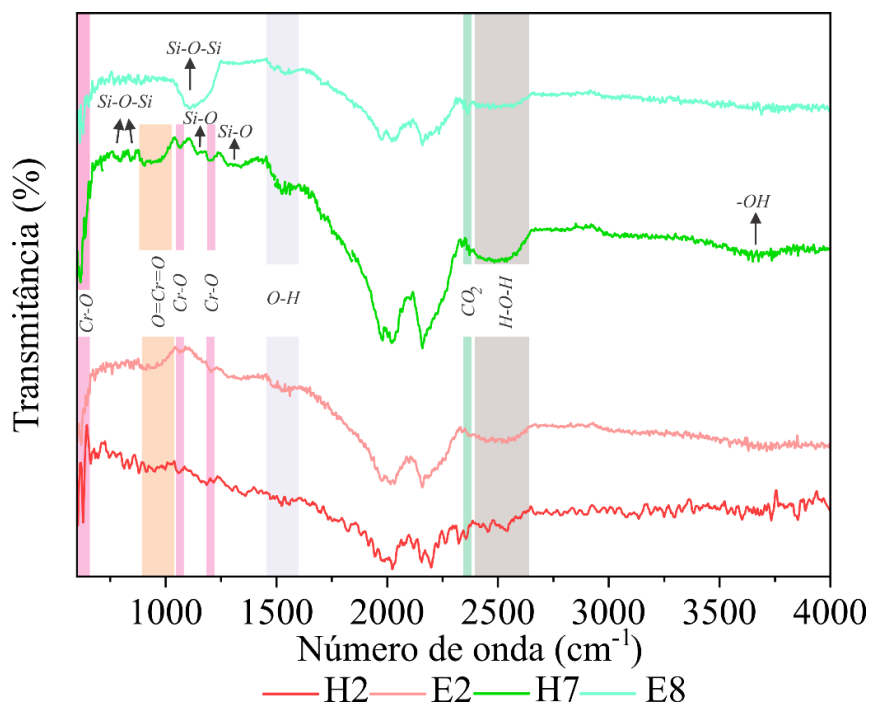
Um pico característico em 1.086 cm^{-1} em H11 e 1105 cm^{-1} E11 se destaca, este compreende a vibração assimétrica Si-O-Si da interação entre oxigênio e o silício na superfície (FEIFEL; LISDAT, 2011; LIU *et al.*, 2016; SULEJMANOVIĆ *et al.*, 2015).

Também foi visualizada a presença de hidratação das SSS, m 1.425 e 1.430 cm^{-1} houve a recorrência de um modo vibracional Mo-OH para o filme H11 e E2, respectivamente. No filme H11 isso fica mais evidente, dado a presença de uma deformação H-O-H isolada em 1.620 cm^{-1} (DUKSTIENE; SINKEVICIUTE; GUOBIENE, 2012; MAHESWARI; MURALIDHARAN, 2017).

O filme Mo/Si sobre substrato tratado com hexano exibiu uma vibração em 3.184 cm^{-1} do alongamento $-\text{CH}_2$ típico do carbono existente na atmosfera e um estiramento $-\text{OH}$ em 3.511 cm^{-1} (LIU *et al.*, 2016).

As superfícies seletivas a base de cromo e cromo/silício de maior absorvância no espectro entre 280 a 1.400 nm foram avaliadas e a Figura 30 apresenta os resultados espectrais na região do infravermelho médio.

Figura 30 - Espectros de transmitância para as superfícies seletivas de Cr e Cr/Si.



Fonte: Autora (2022).

As SSS compostas apenas de cromo puro, H2 e E2, apresentaram um pico de flexão característico da ligação entre Cr-O em 607,5 e 601,7 cm^{-1} nesta ordem, sendo resultante da presença de uma fase Cr_2O_3 (ABDULLAH; RAJAB; AL-ABBAS, 2014; KHELIFA *et al.*, 2018b; SONE *et al.*, 2016). Logo em sequência, centrado no 920 cm^{-1} existe uma banda de absorção assimétrica O=Cr=O consequente da oxidação de espécies de Cr^{6+} , este pico é mais evidente para a amostra E2 do que a E11 (CUESTA ZAPATA *et al.*, 2016).

Novamente, em 1.100 - 1.283 cm^{-1} para o H2 e 1.119 - 1271 cm^{-1} para o E2 demonstraram um alongamento Cr-O (TSEGAY; GEBRETINSAE; NURU, 2019). Em 1.510, 2.325 e 2.497 cm^{-1} bandas de absorção elucidam a presença de vibrações O-H, CO_2 e H-O-H para os filmes H2 e E2, indicando a contaminação por água e gases atmosféricos fracamente adsorvidos na superfície do material (EL-DAMRAWI *et al.*, 2020).

Entre 1.900 e 2.200 cm^{-1} , a incidência dos picos de carbono relativos ao diamante do FTIR-ATR aparecem em ambas as SSS citadas acima.

Ademais, os revestimentos compostos de cromo e silício revelaram um comportamento similar aos filmes de cromo puro. É visto na Figura 30 que o espectro H7 exprime uma ligação entre cromo e oxigênio (Cr-O) centrado em 617,6 cm^{-1} da mesma fase oxidativa Cr_2O_3 (KHAMLICH *et al.*, 2013; MAKHLOUF *et al.*, 2013). No comprimento

espectral de 717,5 e 794,7 cm^{-1} duas vibrações pequenas relativas a vibração assimétrica Si-O-Si se manifesta (GUI-LONG *et al.*, 2011; HOFMAN *et al.*, 1996; SARAVANAN; DUBEY, 2020; SULEJMANOVIĆ *et al.*, 2015).

As bandas de cromo aparecem novamente em 929,7 cm^{-1} como uma deformação assimétrica O=Cr=O (CUESTA ZAPATA *et al.*, 2016) e centrados em 1.062,7 e 1.201,6 cm^{-1} com o alongamento Cr-O, todos resultantes de diferentes estados oxidativos da superfície em contato com a atmosfera (TSEGAY; GEBRETINSAE; NURU, 2019).

Entre 1.138 e 1.309,3 cm^{-1} há a incidência de pequenos modos de vibração assimétricos Si-O para o filme H7 (ALYAS *et al.*, 2021; HU *et al.*, 2003). Além desses, foi perceptível a presença de umidade em 1.516, 2.488 e 3.662 cm^{-1} (LIANG *et al.*, 2012; SARAVANAN; DUBEY, 2020), bem como CO₂ atmosférico em 2.400 cm^{-1} .

O filme de Cr/Si sobre substrato eletropolido (E8) contém cinco picos significativos. Sendo em 611.5 cm^{-1} a ligação assimétrica Cr-O e em 1.099,4 cm^{-1} a banda característica de Si-O-Si (JUTAROSAGA; JEOUNG; SERAPHIN, 2005; LIANG *et al.*, 2012). Não obstante, traços de água foram evidenciados através de ligações simétricas e assimétricas O-H e H-O-H no espectro 1.516 e 2.448 cm^{-1} , assim como CO₂ típico centrado em 2.326 cm^{-1} (YAN *et al.*, 2014).

Os resultados denotaram a presença de bandas correlativas a interação dos filmes com oxigênio. Esse efeito de passivação foi devido a espessura e natureza das superfícies seletivas. Para os filmes sobre substrato eletropolido, tais sinais são mais fortes, pois os resquícios das soluções ácidas para eletropolimento incrementam a reação de passivação superficial, o que demonstrou que as superfícies não foram totalmente neutralizadas comprometendo a aderência dos filmes. Para confirmar a presença de tais contaminações, a análise de XPS foi aplicada como técnica complementar.

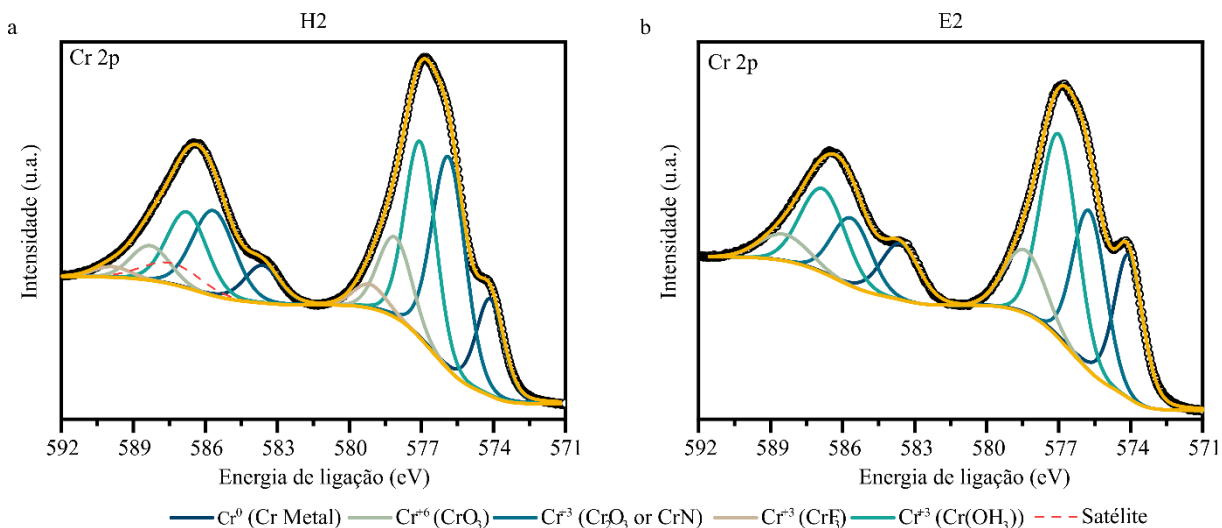
6.5 Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por Raios X (XPS)

A técnica de espectroscopia por Raios X foi aplicada para corroborar com os resultados encontrados pelo FTIR, seu feixe interage com a amostra excitando os elétrons para que passem para um outro nível de energia. Sendo as energias de elétrons muito pequena, apenas aqueles que passaram para monocamada externa são detectados. Dessa forma, objetivou-se a análise das composições químicas e estados oxidativos dos filmes seletivos.

Na Figura 31 é ilustrado os espectros dos filmes H2 e E2 formados com cromo. De maneira esperada, eles apresentaram aspectos similares, onde para os dois materiais foi encontrado dois picos característicos da degeneração do orbital p para o cromo (Cr 2p), que pelo princípio da mecânica quântica do acoplamento spin-órbita que dita que a energia de ligação dos fotoelétrons é afetada pela orientação e acoplamento de seus spins. Logo, os dois picos foram assinalados como Cr 2p_{3/2} e Cr 2p_{1/2}, em 586,45 & 576,8 eV para o H2 e 546,6 & 576,8 eV para o E2, respectivamente.

Tais bandas associadas a cada momento foram deconvoluídas em função das ligações de cromo. A partir da Figura 31 é possível confirmar que cromo existe em sua forma metálica, de óxido e hidróxido, indicando que existe uma passivação do substrato como visto no FTIR.

Figura 31 - Espectros de XPS do nível Cr 2p dos filmes (a) H2 e (b) E2.



Fonte: Autora (2022).

A amostra H2 evidenciou a presença de dois picos intensos com Eb de 577,04 e 575,9 eV remetentes ao Cr(OH₃) e Cr₂O₃ ou CrN, respectivamente, ambos associados ao estado de oxidação 3 do cromo. Comparando-se os elementos formados com o FTIR, pode-se confirmar que o segundo pico é relativo ao Cr₂O₃ originados pela ligação Cr-O, tal fenômeno já foi visualizado em outros estudos (BOLLI *et al.*, 2020; MU *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2018).

Também foi identificado picos relativos ao cromo metálico em 574,6 eV, e picos de Cr (VI) em 578,1 eV também correlacionado as ligações de Cr-O. Além desses, há o aparecimento de um pico com energia fotoelétrica de 579,2 relativo ao Cr(III) do CrF₃ e um pico não assinalado na região de alta energia de 587,65, ambos podem ser designados como pico satélite que são consequências de ionizações paralelas a principal em decorrência dos

fotoelétrons que saltaram para um nível energético mais elevado (orbital d) desocupado, perdendo parte de sua energia, eles representam menos de 10% da área (ALVES; BRETT; MONTEMOR, 2005; BIESINGER et al., 2004; SCHNEIDER, 2008).

Para o filme E2 (Figura 31 (b)), não houve aparecimento de picos satélites. Porém a intensidade do pico correspondente ao $\text{Cr}(\text{OH}_3)$ em 577 eV é maior que o de Cr_2O_3 com 575,7 eV. A distribuição de energia elementar também revelou um aumento da presença de Cr metálico com 574,09 eV. Comparando as razões elementares de $\text{Cr}(\text{OH}_3)/\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ do filme H2 com o E2, notou-se um aumento de 56,7 e 48,59% indicando que os filmes tratados com hexano possuem uma maior inclinação para reagir com oxigênio enquanto as superfícies eletropolidas estão mais sujeitas a uma interação com as moléculas H-O-H.

Sabendo que a área dos picos está diretamente relacionada a quantidade de elementos presentes na amostra é possível fazer uma extrapolação quantitativa do percentual elementar de cada filme, assim os parâmetros dos filmes foram expostos na Tabela 16.

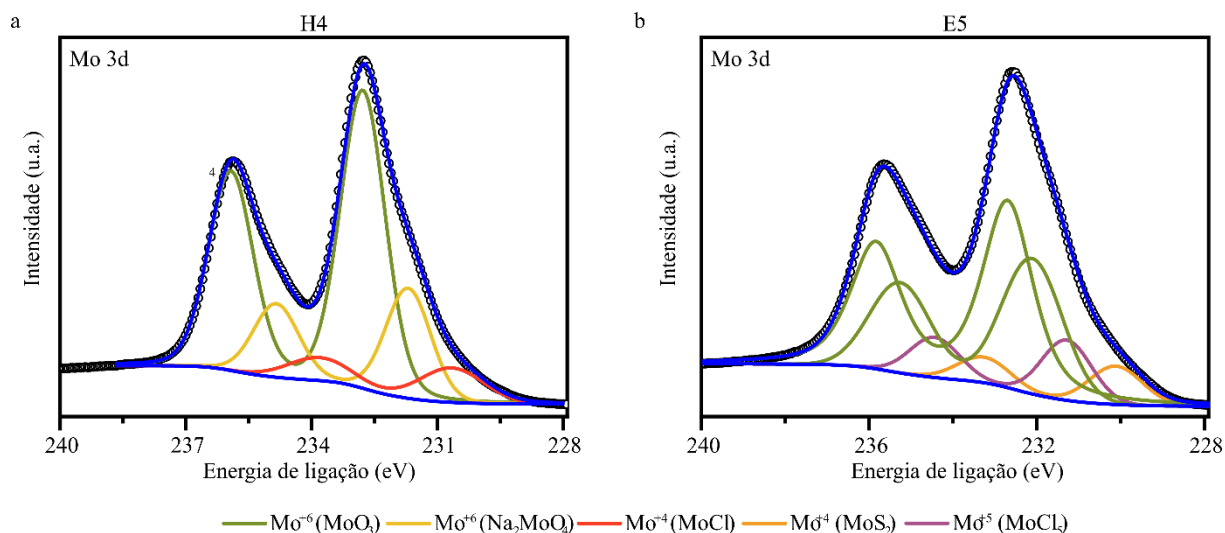
Tabela 16 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de cromo baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.

Áreas desconvoluadas dos picos:						
Componente	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)
H2			E2			
Cr	574,14	148.202	14,7	574,09	106.586	23,4
Cr ₂ O ₃	575,86	372.258	36,8	575,72	120.569	26,4
Cr(OH) ₃	577,04	315.753	31,3	576,99	170.584	37,4
CrO ₃	578,10	135.968	13,5	578,42	58.684	12,9
CrF ₃	579,17	38.203	3,8	-	-	-

Observando a Tabela 16 entende-se que apesar da alta replicabilidade da técnica de *Magnetron Sputtering* o tratamento do substrato pode influenciar nas características que o filme apresenta. A alta seletividade do filme H2 foi atribuída a presença das fases oxidadas de cromo, enquanto a amostra com substrato eletropolida preservou a maior parte das características originais do material depositado, porém resquícios do banho químico responsável pelo polimento da superfície podem ter induzido a suscetibilidade do filme a formar mais fases do tipo $\text{Cr}(\text{OH})_3$ na superfície, dado que a análise de XPS visualiza até 6 nm de profundidade da amostra.

Não muito diferente, foi executada a resposta dos fotoelétrons para os filmes H4 e E5 compostos de molibdênio puro, exibido na Figura 32.

Figura 32 - Espectros de XPS do nível Mo 3d dos filmes (a) H4 e (b) E5.



Fonte: Autora (2022).

Nesse cenário, as amostras de Mo metálico apresentaram perfis similares, no qual os picos relativos à largura a meia altura (FWHM) dos filmes de H4 são mais elevadas que as do filme E5. Os filmes ilustraram dois picos característicos da divisão orbital d para momentos de 5/2 e 3/2.

No filme H4 foi constatado a presença de MoO_3 (232,8 eV), Na_2MoO_4 (231,7 eV) e MoCl_4 (230,6 eV). Sendo o pico de maior evidência representado pelas ligações entre Mo-O, sugerindo que a superfície do filme é composta de uma variedade de misturas de óxidos e hidróxidos de molibdênios, em sua maioria, hexavalente (SANCHES et al., 2004).

Os picos deconvoluídos Mo 3d da amostra E5 foram assinalados com 3 picos característicos compostos de MoO_3 (232,1 e 232,7 eV), MoCl_5 (231,3 eV) e MoS_2 (230,1 eV). Nesse caso, o Mo apareceu em três estados oxidativos diferentes (+4, +5 e +6), sendo o Mo^{+6} mais intenso na estrutura de MoO_3 associadas as ligações Mo-O. Comparando o percentual de óxido de molibdênio formado na amostra H4 para E5 houve um aumento de 13% para o substrato eletropolido.

Tabela 17 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de molibdênio baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.

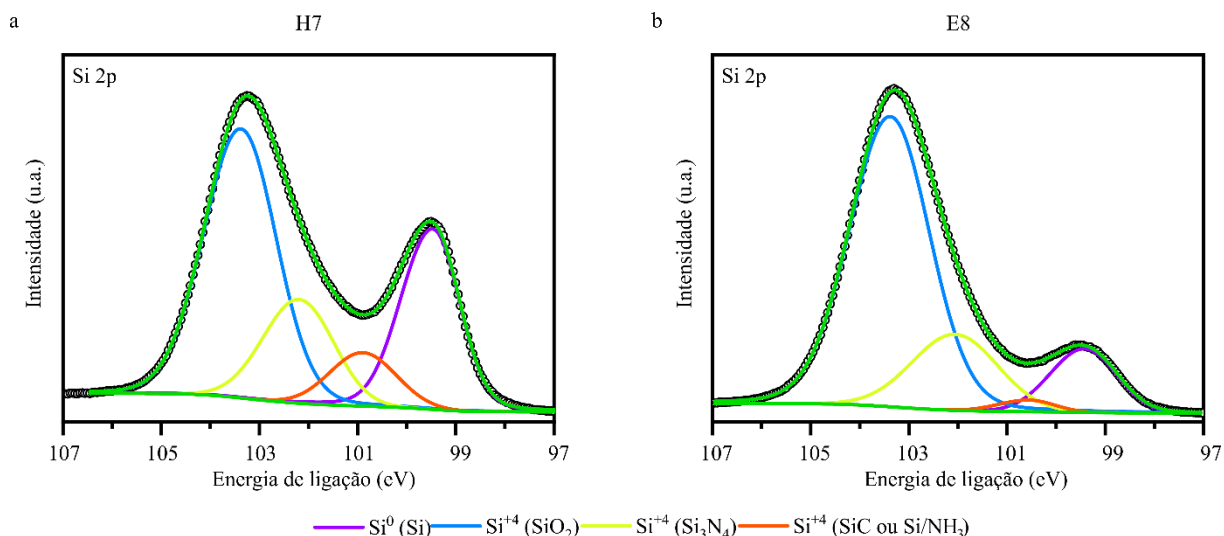
Componente	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)
	H4			E5		
MoS ₂	-	-	-	230.112	143302.7	8,1
MoCl ₄	230,6	143681.6	10,2	-	-	-
MoCl ₅	-	-	-	231.286	212143.7	12,0
MoO ₃ (BE)*	-	-	-	232.111	582770.6	33,0
MoO ₃ (AE)**	232,8	931965.3	66,0	232.69	826873.4	46,8
Na ₂ MoO ₄	231,7	337362.6	23,9	-	-	-

*Baixa energia; ** Alta energia.

A razão entre área do pico de MoS₂ para a área do pico de Mo 3d_{5/2} é menor que 10% indicando que esse elemento está relacionado a transição de fótons de d para f. De forma similar o cloreto de molibdênio se encontra no limiar da transição fotoelétrica. Em ambas as amostras as ligações superficiais de Mo-O se mostraram superiores constituindo aproximadamente 73% dos filmes.

Não obstante, as SSS de cromo com deposição de camada antirreflexiva de silício também foram analisadas, elencado na Figura 33. Dado que a técnica de XPS é superficial, com uma profundidade de análise limitada, apenas as bandas relativas ao silício foram identificadas não revelando a composição de cr em seu interior. Logo, é possível visualizar a divisão de bandas características do Si 2p para os momentos de 3/2 (103,2 eV) e 1/2(99,5 eV) na Figura 33.

Figura 33 - Espectros de XPS do nível Si 2p dos filmes (a) H7 e (b) E8.



Fonte: Autora (2022).

À primeira vista, a divisão de picos dos orbitais é mais assimétrica para o espectro de alta resolução do filme E8 que o H7. Ambas as deconvoluções são características de 2 principais estados oxidativos do silício: Si e Si^{+4} .

O revestimento do substrato limpo com hexano confirmou a presença de óxidos originados das ligações Si-O e O-Si-O analisadas pelo FTIR-ATR (GÓMEZ-MAGALLÓN et al., 2020). Com a presença majoritária de SiO_2 (103,2 eV) dado a intensidade de seu pico em relação aos demais na parte mais externa da amostra. Enquanto a parte mais interna, sob análise, preservou-se na forma de silício metálico. O mesmo comportamento foi exibido para o filme E8 porém a intensidade do pico de Si^0 (99,2 eV) indica que, dentro do intervalo observado, óxido de silício (103,2 eV) fora formado em maior quantidade, atingindo regiões mais intermediárias da amostra (YANG et al., 2018).

A partir da razão da área dos picos elementares pela integral da área do Si 3p foi calculado o percentual elementar da região analisada que pode ser extrapolada para a região da amostra, dado a alta taxa de uniformidade agregada nos filmes depositados pela técnica de *Magnetron Sputtering*. Na Tabela a seguir se encontram os parâmetros mensurados.

Tabela 18 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de Cr/Si baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.

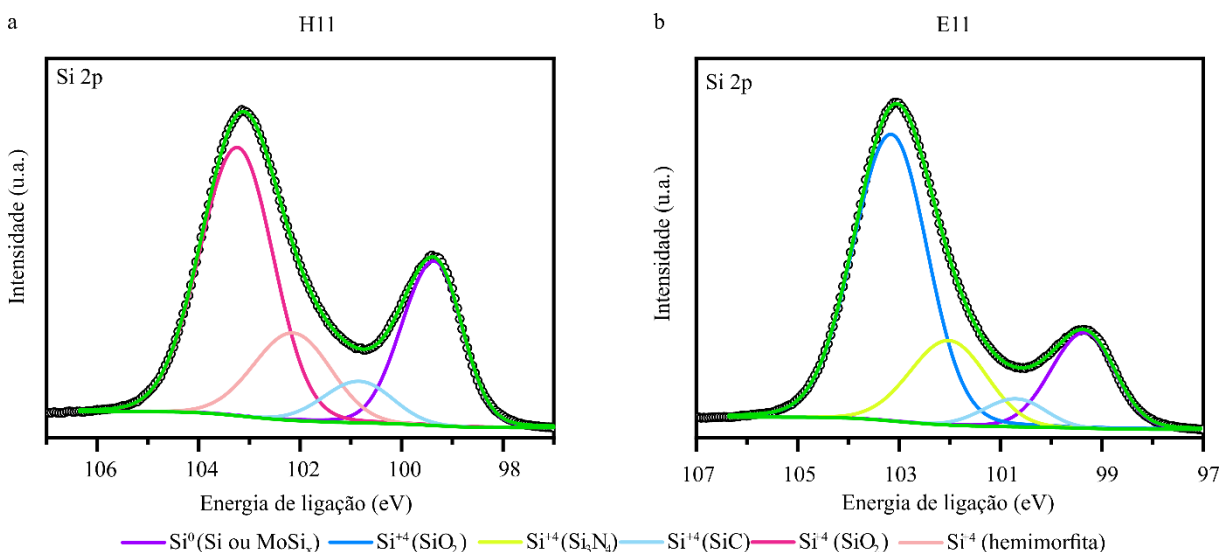
Componente	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)
	H7			E8		
Si	99,3	98.730	26,4	99,2	42.980	11,7
SiO ₂	103,2	178.918	47,9	103,2	250.092	68,4
Si ₃ N ₄	102,0	64.384	17,2	101,9	66.219	18,1
SiC ou Si/NH ₃	100,9	31.324	8,4	100,4	6.522	1,8

Houve uma redução de 56% de Si metálico da amostra eletropolidada comparada com a tratada com hexano. Novamente, foi constatado a presença de aproximadamente 50% de SiO₂ na superfície de ambos os materiais. Já o pequeno percentual de elementos intermediários que aparecem como Si₃N₄ na interface do silício é referente as interações com o nitrogênio atmosférico (VENNEMANN *et al.*, 2003).

Novamente há indícios de picos diminutos correspondentes as transições de energias em ~100 eV para o Si/NH₃.

Por fim, foram analisados os espectros de XPS para os filmes H11 e E11 cujo os revestimentos são compostos de Mo/Si e são ilustrados na Figura 34. Ambas as SSS apresentaram uma divisão de orbitais Si 2p com energias de fótons em 103,2 eV (Si 2p_{3/2}) e 99,2 eV (Si 2p_{1/2}) (WANG *et al.*, 2019).

Figura 34 - Espectros de XPS do nível (a) Si 2p do filme H11 e (b) do E11.



Para os espectro de fotoelétrons de silício para a SSS H11 há o surgimento de elementos polivalentes referentes ao SiO₂ (103 eV), Si ou MoSi_x (99,2 eV) que não pode ser distinguido, hemimorfita (101,9 eV), e SiC (100,6 eV) (AUCHTER; TAYLOR; PEREPEZKO, 2020; SUN *et al.*, 2020b).

Já o substrato polido eletroquimicamente (E11), houve o surgimento de quatro picos característicos: SiO₂ (103 eV), Si ou SiMo_x (99 eV), Si₃N₄ (101,8 eV) e SiC (100,5 eV). Nesse caso, o filme apresentou maiores intensidades energéticas para SiO₂ na região mais externa da amostra que é originada das ligações de Si-O das interações do substrato/Mo/Si e a atmosfera, esse composto oferece uma maior proteção à corrosão de superfície (ELESB, 2012). Além deste, foi notado uma fase relativa ao silício metálico ou interação do Si/Mo com o oxigênio de intensidade relativa considerável.

Para uma melhor visualização, os parâmetros discutidos dos filmes de Mo/Si foram sumarizados na Tabela 19.

Tabela 19 - Percentual de abundância dos componentes dos filmes de Mo/Si baseados nas áreas deconvoluídas dos picos.

Componente	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)	Posição (eV)	Área do pico (u.a.)	Composição (%)
H11			E11			
Si ou SiMo _x	99,2	83.154	25,6	99,2	56.253	17,2
SiO ₂	103,1	163.806	50,5	-	-	-
Hemimorfita	102,0	54.543	16,8	-	-	-
SiC	100,7	23.086	7,1	100,5	15.256	4,7
SiO ₂	-	-	-	102,6	198.109	60,6
Si ₃ N ₄	-	-	-	101,8	57.426	17,6

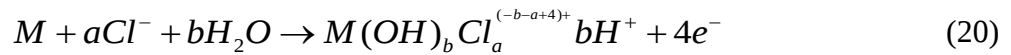
Os picos relativos as ligações Si-C aparecem em fase de transição energética. Apesar da amostra H11 apresentar 42,6% de óxido de molibdênio a presença dos cloretos e nucleação de SiO₂ sugerem uma contaminação de alto grau correspondente a mais de 50% da amostra analisada. Já o filme E11 apresentou um percentual elevado de compostos de silício originados das ligações Si-Mo e Si-O.

Sob uma análise geral, a técnica de XPS foi eficaz para a confirmação das fases encontradas pelo FTIR, corroborando com a hipótese de passivação dos filmes. As amostras de cromo puro sugerem uma inclinação maior para a passivação do que os filmes de molibdênio.

6.6 Ensaio de corrosão

O ensaio de corrosão eletroquímica consiste em analisar a aderência do filme ao substrato e a resistência do mesmo aplicando uma corrente e/ou tensão que cria uma atmosfera extrema.

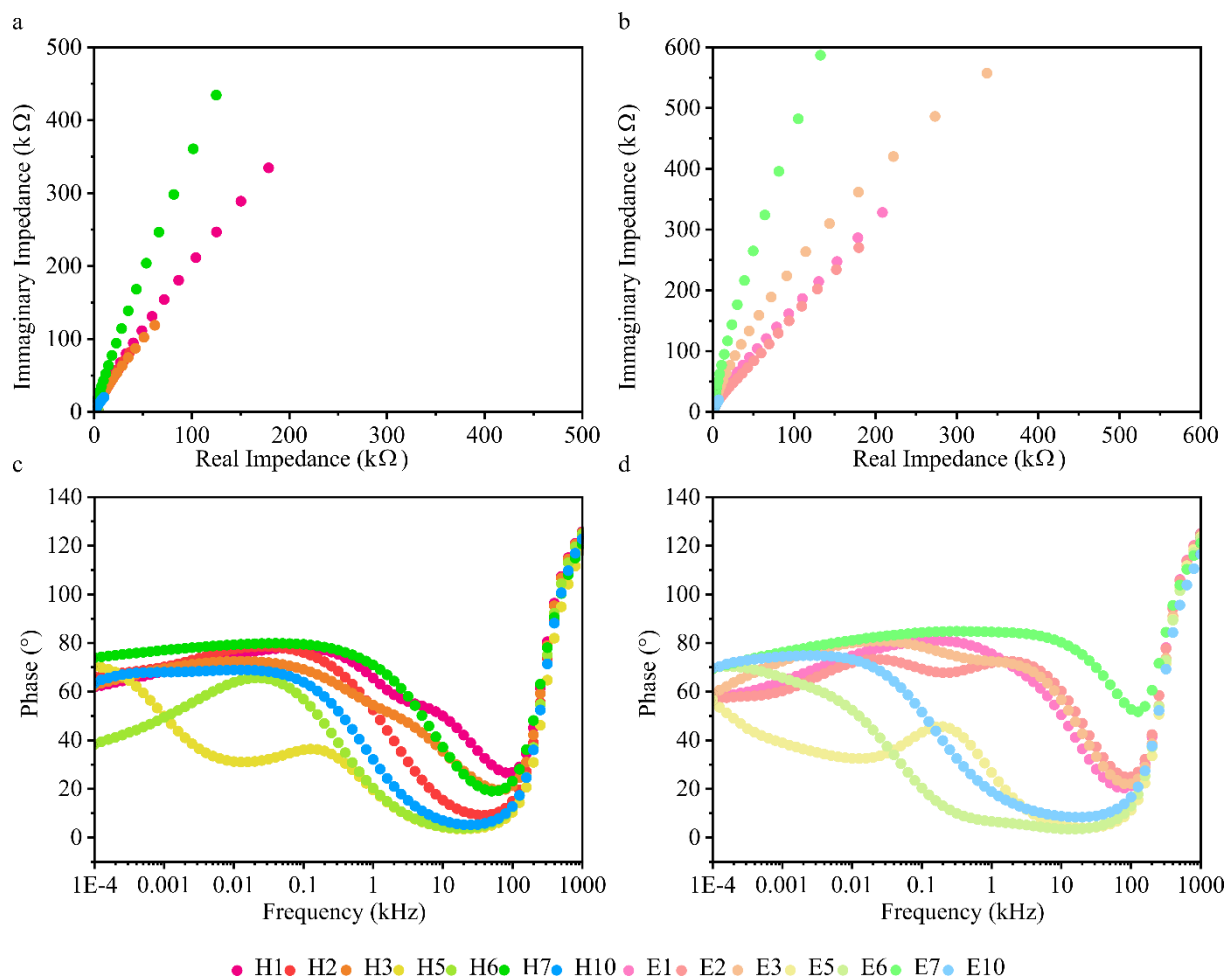
Como a análise de corrosão é uma medida destrutiva, apenas alguns filmes foram selecionados. No primeiro estágio do ensaio a SSS é submergida na solução de NaCl, isso leva a formação de uma camada de óxido na superfície do filme (Mo, Cr, Mo/Si ou Cr/Si), chamada de camada passiva, quando a voltagem é aumentada os íons pertencentes ao sal da solução “atacam” a superfície dos filmes, iniciando o processo de degradação. Com a adsorção dos íons Cl^- a camada passivadora é quebrada fragilizando a superfície e permitindo que os íons atinjam as partes mais internas do filme (MAHESH; ALPHONSA; ARORA, 2021). Esse mecanismo de reação pode ser descrito na expressão a seguir (XIA et al., 2021):



Cujo o M representa o íon metálico, a e b são as constantes relativas ao número de mols da reação.

O primeiro teste aplicado concerne ao comportamento dos filmes frente a uma pequena perturbação de corrente entre o intervalo de frequência de 1 MHz à 0,1Hz através da análise de espectroscopia de impedância eletroquímica global, como visto na Figura 35.

Figura 35 - Gráfico de (a,b) Nyquist e (c,d) Bode para os filmes tratamento de hexano e eletropolimento, respectivamente.



Fonte: Autora (2022).

A partir dos espectro de impedância da Figura 35 (a,b) foi calculado de polarização na interface filme/solução eletrolítica (R_p), na faixa de alta frequência. Fora aplicado o circuito elétrico equivalente $R_s(R_p/Q)$ exemplificado na Figura 17, os valores estão expostos na Tabela 20. O *fitting* das curvas de polarização apresentou um percentual de erro abaixo de 3% para todas as amostras garantindo que os coeficientes encontrados são adequados.

A média da resistência de polarização foi de $19,6 \pm 3$ ohms para as amostras. O filme de Mo/Si com 10 minutos de deposição sobre substrato eletropolido apresentou a maior resposta de resistência com 24 ohm que representa 16,4% a mais que a resistência de seu semelhante sobre substrato limpo com hexano (H10). Dentre as SSS que demonstraram menores resistências a polarização estão os filmes E2 (Cr – 20 min) e E7(Cr/Si – 10 min) com ~14 ohms.

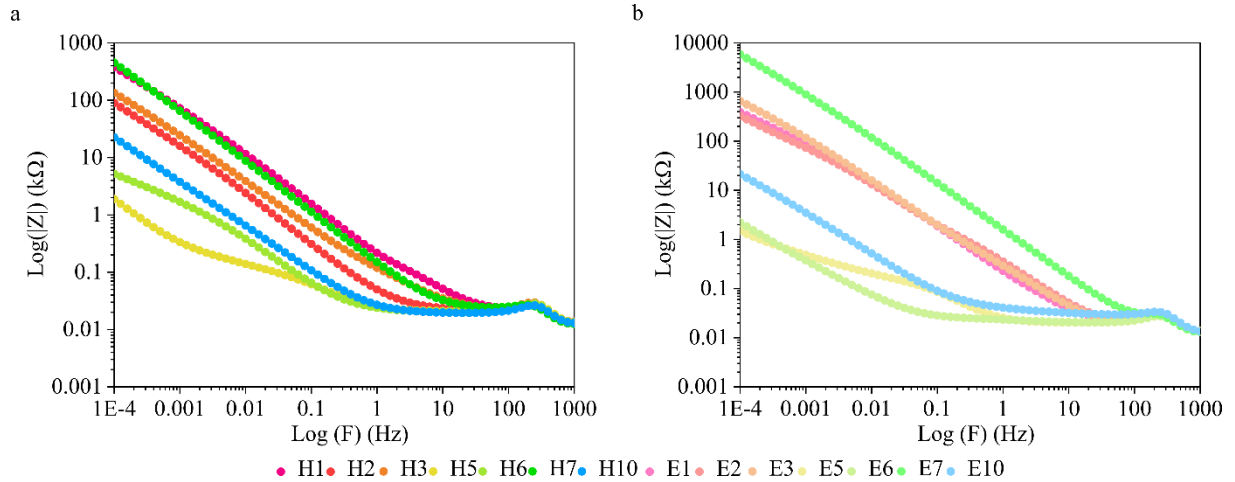
Tabela 20 - Parâmetros de resistência a polarização.

SSS	R _p (Ω)
H1	12,82
H2	23,3
H3	18,7
H5	21,9
H6	20,8
H7	21,7
H10	20,3
E1	18,5
E2	14,1
E3	16,5
E5	19,6
E6	21,0
E7	14,5
E10	24,3

Também se notou que os filmes sobre hexano não obtiveram grandes variações diante da polarização, diferente dos filmes eletropolidos que são mais sensíveis as perturbações externas. Na última condição citada os filmes de cromo sugerem uma menor aderência comparado ao molibdênio, ou seja, a resistência E7 é menor que a E10.

Analisando os espectros de Bode na Figura 35 (c,d) é observado que o perfil angular são similares entre os substratos em questão, isso é coerente dado que os revestimentos são de mesma composição química. Abaixo de 100 Hz os filmes atingem um platô do ângulo de fase das amostras que está relacionado com a região espectral cujas superfícies seletivas exibiram maior resistência. Isso é confirmado pelo gráfico do log da frequência pelo módulo da resistência global, como ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Resistência global pelo intervalo da frequência.

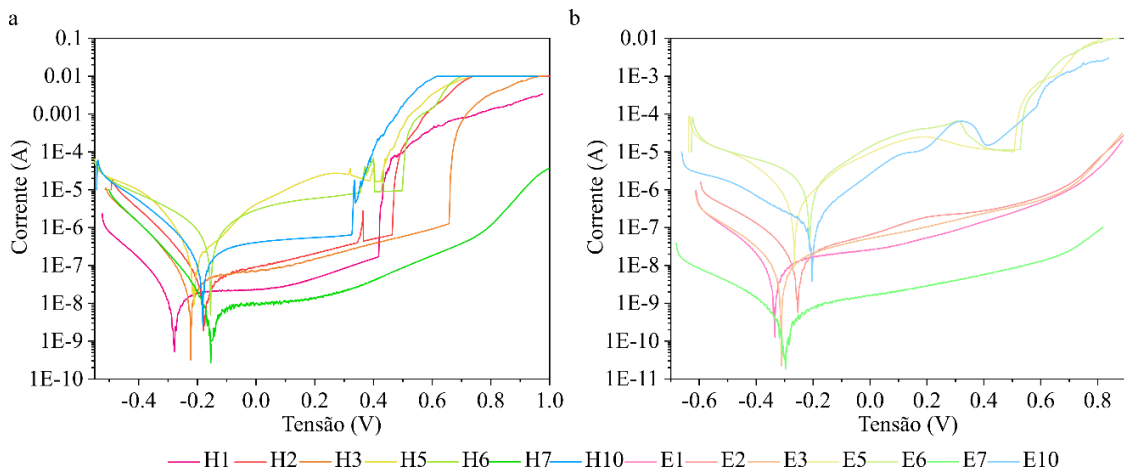


Fonte: Autora (2022).

Como elencado anteriormente, as curvas atingem o maior percentual de resistência abaixo de 100 Hz, os filmes H7 e E7 de Cr/Si se destacam dentre as demais com a melhor performance em baixa frequência. Em contraste das amostras H5, H6, E5 e E6 de Mo puro com diferentes tempos de deposição que não apresentaram uma resposta satisfatória.

De forma a garantir a confiabilidade dos resultados apresentados foi realizado o teste de resistência a polarização linear onde se aplica pequenas variações de tensão em torno do potencial de corrosão do material e se observa a resposta de corrente para as reações oxidativas que ocorre na superfície do material, a partir disso é construído o gráfico de tensão por corrente com a curva de Tafel, tal imagem pode ser vista na Figura 37.

Figura 37 - Extrapolação das curvas de Tafel para superfícies de (a) hexano e (b) eletropolimento.



Fonte: Autora (2022).

Com o auxílio do software Nova foi efetivado a extrapolação das retas das curvas anódicas e catódicas de Tafel, definindo-se a taxa de corrosão e resistência de polarização global dos filmes. Tais parâmetros foram sumarizados na Tabela 21.

Tabela 20 - Parâmetros de corrosão extraídos da curva de Tafel.

SSS	E _{corr} (V)	i _{corr} (A)	Taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)	R _p (k Ω)	b _a (V dec ⁻¹)	b _c (V dec ⁻¹)
H1	-0.278	0,038	0,446	2.314,6	-0,940	0,168
H2	-0.175	0,029	0,345	794,11	0,191	0,076
H3	-0.223	0,110	1,280	834,29	-0,586	0,155
H5	-0.214	0,064	0,751	141,35	0,054	0,035
H6	-0.155	0,175	2,030	84,88	0,065	0,072
H7	-0.154	0,005	0,062	4.103,80	0,337	0,059
H10	-0.182	0,351	4,080	206,50	0,773	0,213
E1	-0.334	0,018	0,215	4.406,40	1,196	0,223
E2	-0.253	0,059	0,687	2.238,40	13,60	0,312
E3	-0.312	0,010	0,113	4.008,90	0,270	0,134
E5	-0.265	0,728	8,460	62,74	0,295	0,163
E6	-0.211	2,262	26,28	24,82	0,249	0,268
E7	-0.297	0,002	0,020	98.314	5,729	0,416
E10	-0.203	0,040	0,465	315,23	0,056	0,060

A análise confirmou os resultados anteriores, os filmes H6, H5, E5 e E6 de Mo puro continuam com o menor valor de resistência a polarização, já os filmes E7 (Cr/Si), E1 (Cr), H7 (Cr/Si) e E3 (Cr) obtiveram uma superioridade diante dos outros filmes com resistências de 98,3, 4,41, 4,10 e 4,08 M Ω , respectivamente. Tais resultados conotam que os filmes de cromo apresentaram uma aderência elevada, com a adição de silício na mesma proporção houve uma otimização da superfície com taxas de corrosões lentas, em especial do filme E7 com 0,02 $\mu\text{m}/\text{ano}$ e 2 mA de i_{corr}.

Capítulo V
Conclusão

7. CONCLUSÃO

No presente trabalho foram fabricadas superfícies solares seletivas com filmes finos através da técnica de *Magnetron Sputtering*, a baixa variação da absorvância média entre as triplicatas demonstraram que a técnica possui uma alta reprodutibilidade sendo eficaz para aplicações comerciais.

Os resultados obtidos confirmaram que a absorvância das superfícies é dependente do método de tratamento dos substratos. Em específico, a técnica de UV-Vis-NIR comprovou a superioridade absorvativa dos filmes sob substratos eletropolido em detrimento daqueles tratados com hexano, bem como um desvio padrão mínimo em comparação ao último citado. Em relação ao tipo de material, a variação da absorvância entre o cromo e molibdênio foram equivalentes, porém a adição da camada antirreflexiva possibilitou um aumento da absorvância mais significativo para o cromo do que para o molibdênio.

Quanto ao parâmetro temporal, a maioria dos filmes convergiram para um tempo ótimo de deposição, com 20 minutos de pulverização catódica. Os filmes que apresentaram os melhores comportamentos ópticos dentro de cada conjunto de parâmetros analisados foram o H2 (Cr – 20 min), H4 (Mo – 10min), E2 (Cr – 20 min), E5 (Mo – 20 min), H7 (Cr/Si – 10 min), H11 (Mo/Si – 20 min), E8 (Cr/Si – 20 min) e E11 (Mo/Si – 20 min). Sendo o filme E8 o de maior absorvância média com excelentes 98,74%.

Em relação aos *band gaps* encontrados, fora visto que os valores estão em concordância com a literatura. Os valores relativos aos substratos eletropolidos apresentaram resultados mais uniformes com baixas variações. Já os filmes sobre substratos limpos com desengordurante a adição de silício reduziu a E_g que contribuiu para o aumento de absorção em comprimento de ondas mais elevados.

Pelo ensaio de perfilometria, os filmes de maiores absorvâncias apresentaram uma rugosidade aritmética, altura máxima de pico e vale intermediária. Foi notado que a rugosidade superficial é inversamente proporcional à absorvância, no qual as amostras eletropolidas apresentaram os menores valores de R_a e maiores níveis de absorvância.

Como esperado, o tempo de deposição de filme influenciou ao tamanho dos filmes. Assim, os filmes de 30min de pulverização catódica possuíram as maiores espessuras, enquanto os de 10 minutos de deposição obtiveram um perfil mais uniforme com valores mínimos de R_a . Na condição de multicamadas, os filmes compostos de Mo/Si com tempos maiores de deposição resultaram em um aumento gradual da rugosidade e espessura. Diferente das amostras formadas

por Cr/Si em substrato de hexano que não demonstraram um padrão de correlação entre o tempo de deposição com as características topográficas.

A análise estatística dos parâmetros dependentes (absortância, rugosidade e espessura) com os fatores independentes de deposição utilizados confirmaram que a absortância é mais dependente do tipo de tratamento do substrato, que apesar do tipo de material apresentarem padrões de variância muito pequenos, o Cr e o Cr/Si causam um deslocamento positivo em relação aos filmes à base de molibdênio. A rugosidade de superfície também é afetada pelo padrão de tratamento superficial, onde o eletropolimento causa uma diminuição de tal fator comparado ao hexano. Por fim, diferente dos anteriores, o parâmetro tempo de deposição afetou mais significativamente a espessura dos filmes que os demais fatores. Todos os resultados estatísticos corroboraram com os resultados experimentais citados acima.

Em relação a composição dos filmes, os espectros de FTIR demonstraram a possibilidade de existência de uma camada passivadora em todos os filmes, devido a presença de ligações com oxigênio como as bandas Mo-O, Cr-O e Si-O para os filmes de molibdênio, cromo e com camada antirreflexiva, respectivamente. Também foi visto a presença de contaminações de água e carbono.

A técnica de XPS foi complementar as análises de FTIR, e comprovou a existência da camada passivadora com a presença de componentes originados das mesmas ligações citadas no parágrafo anterior que contribui para o aumento de absortância e incrementa a resistência a corrosão dos materiais. Já o ensaio de corrosão eletroquímica confirmou que os filmes de Cr e Cr/Si obtiveram as melhores resistências à polarização, menores correntes e taxa de corrosão, em contraste aos filmes de molibdênio.

Em suma, a maioria dos resultados obtidos para todos os filmes foram satisfatórios à nível de absortância espectral. Porém o filme a base de Cr/Si obteve superioridade quanto ao teste de absortância, rugosidade baixa para a amostra eletropolida, formação da camada passivadora e resistência a polarização. A adição da camada de silício assegurou a otimização do filme de cromo e possível redução de emitância dos filmes, o eletropolimento se mostrou eficaz para redução da rugosidade e aumento da absortância e o tempo de 20 minutos é adequado para o alcance das propriedades ótimas dos filmes resultantes.

Capítulo VI
Sugestão de trabalhos futuros
&
Referências

8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Pensando na contínua melhoria das superfícies solares seletivas, a pesquisa atual abre precedente para outros aspectos a serem estudados, como elencado a seguir:

- Análise da emitância dos filmes de forma a definir o parâmetro de seletividade α/ϵ .
- Estudo dos óxidos metálicos adicionados diretamente nos substratos.
- Estudo comparativo de diferentes métodos de deposição.
- Avaliação de custo de produção da fabricação de tais superfícies.
- Avaliação sistemática de outros tipos de substratos.
- Mapeamento químico através da técnica de FRX e DRX.
- Avaliação das superfícies solares seletivas em modo de operação, analisando a variação da composição química e óptica em função da temperatura.
- Comparação entre os parâmetros experimentais e modelagem computacional.
- Investigação de sistemas multicamadas e com substratos texturizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. M.; RAJAB, Fahd M.; AL-ABBAS, Saleh M. Structural and optical characterization of Cr₂O₃ nanostructures: Evaluation of its dielectric properties. **AIP Advances**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 27121, 2014. DOI: 10.1063/1.4867012. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4867012>.

ABED, R. N.; ABED, A. R. N.; YOUSIF, E. Carbon Surfaces Doped with (Co₃O₄-Cr₂O₃) Nanocomposite for High-Temperature Photo Thermal Solar Energy Conversion Via Spectrally Selective Surfaces. **Progress in Color, Colorants and Coatings**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 301–315, 2021. DOI: 10.30509/pccc.2021.166749.1098.

ABED, Rasheed N.; ABDALLH, Mustafa; ADNAN RASHAD, Alaa; AL-MOHAMMEDAWI, Haidar Ch.; YOUSIF, Emad. Spectrally selective coating of nanoparticles (Co₃O₄:Cr₂O₃) incorporated in carbon to captivate solar energy. **Heat Transfer**, [S. l.], v. 49, n. 3, p. 1386–1401, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/htj.21668>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.21668>.

ABOELMAAREF, Moustafa M.; ZAYED, Mohamed E.; ZHAO, Jun; LI, Wenjia; ASKALANY, Ahmed A.; SALEM AHMED, M.; ALI, Ehab S. Hybrid solar desalination systems driven by parabolic trough and parabolic dish CSP technologies: Technology categorization, thermodynamic performance and economical assessment. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 220, n. March, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113103.

AHMADI, A.; EHYAEI, M. A.; DOUSTGANI, A.; EL HAJ ASSAD, M.; HMIDA, A.; JAMALI, D. H.; KUMAR, R.; LI, Z. X.; RAZMJOO, A. Recent residential applications of low-temperature solar collector. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 279, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123549.

AHMADI, Mohammad Hossein; GHAZVINI, Mahyar; SADEGHZADEH, Milad; ALHUYI NAZARI, Mohammad; KUMAR, Ravinder; NAEIMI, Abbas; MING, Tingzhen. Solar power technology for electricity generation: A critical review. **Energy Science and Engineering**, [S. l.], v. 6, n. 5, p. 340–361, 2018. DOI: 10.1002/ese3.239.

AKOBA, R.; ABDULLAHI, S. A.; SACEY, J.; NKOSI, M.; MOTHUDI, B. M.; NURU, Z. Y.; MAAZA, M. Ultrasound-assisted wet chemical synthesis of texturized Mo/MoO₃

spectrally selective solar absorber coatings. **Thin Solid Films**, [S. l.], v. 735, p. 138892, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138892>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609021003758>.

ALAWI, Omer A.; KAMAR, Haslinda Mohamed; MALLAH, Abdul Rahman; MOHAMMED, Hussein A.; SABRUDIN, Mohd Aizad Sazrul; NEWAZ, Kazi Md Salim; NAJAFI, Gholamhassan; YASEEN, Zaher Mundher. Experimental and theoretical analysis of energy efficiency in a flat plate solar collector using monolayer graphene nanofluids. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 10, 2021. DOI: 10.3390/su13105416.

ALIRAHMI, Seyed Mojtaba; RAHMANI DABBAGH, Sajjad; AHMADI, Pouria; WONGWISES, Somchai. Multi-objective design optimization of a multi-generation energy system based on geothermal and solar energy. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 205, p. 112426, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112426>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419314335>.

ALSAGRI, Ali Sulaiman; ALROBAIAN, Abdulrahman A.; ALMOHAIMEED, Sulaiman A. Concentrating solar collectors in absorption and adsorption cooling cycles: An overview. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 223, n. September, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113420.

ALVES, Valéria Almeida; BRETT, Christopher Michael Ashton; MONTEMOR, Maria de Fátima. Caracterização por XPS de filmes passivos formados sobre aços de baixa liga em meio de bicarbonato. **Química Nova**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 204–210, 2005. DOI: 10.1590/s0100-40422005000200007.

ALYAS, M. M.; NAJIM, S. A.; MUHAMMED, A. A-k. M.; POGREBNJAK, A. Fabrication, Study of Electrical Properties, and FTIR Spectroscopy of the Al/Al²O³/Si Device. In: 2021 IEEE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE NANOMATERIALS: APPLICATIONS & PROPERTIES (NAP) 2021, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 1–4. DOI: 10.1109/NAP51885.2021.9568518.

ANDRADE, Joseph D. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) BT - Surface and Interfacial Aspects of Biomedical Polymers: Volume 1 Surface Chemistry and Physics. In: ANDRADE, Joseph D. (org.). Boston, MA: Springer US, 1985. p. 105–195. DOI: 10.1007/978-1-4684-8610-0_5. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8610-0_5.

ANTAR, Mohammed; LYU, Dongmei; NAZARI, Mahtab; SHAH, Ateeq; ZHOU, Xiaomin; SMITH, Donald L. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 139, p. 110691, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110691>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120309758>.

AUCHTER, Eric; TAYLOR, Matthew; PEREPEZKO, John H. Resistance of a Mo–Si–B-Based Coating to Environmental Salt-Based Hot Corrosion. **Oxidation of Metals**, [S. l.], v. 93, n. 3, p. 387–399, 2020. DOI: 10.1007/s11085-020-09961-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11085-020-09961-y>.

BALARAM NAIK, A.; CHENNAKESHA REDDY, A. Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA). **Thermal Science and Engineering Progress**, [S. l.], v. 8, p. 327–339, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904917302196>.

BAPTISTA, A.; SILVA, F. J. G. G.; PORTEIRO, J.; MÍGUEZ, J. L.; PINTO, G.; FERNANDES, L. On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. **Procedia Manufacturing**, [S. l.], v. 17, p. 746–757, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.125>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918312435>.

BARSHILIA, Harish C.; KUMAR, Prashant; RAJAM, K. S.; BISWAS, A. Structure and optical properties of Ag–Al₂O₃ nanocermet solar selective coatings prepared using unbalanced magnetron sputtering. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 95, n. 7, p. 1707–1715, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811000481>.

BARSHILIA, Harish C.; SELVAKUMAR, N.; RAJAM, K. S.; BISWAS, A. Structure and optical properties of pulsed sputter deposited Cr_xO_y/Cr/Cr₂O₃ solar selective coatings. **Journal of Applied Physics**, [S. l.], v. 103, n. 2, p. 23507, 2008. DOI: 10.1063/1.2831364. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.2831364>.

BELLO, Mutawalli; SHANMUGAN, Subramani. Achievements in mid and high-temperature selective absorber coatings by physical vapor deposition (PVD) for solar thermal Application-

A review. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 839, p. 155510, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155510>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838820318740>.

BELLOS, Evangelos; TZIVANIDIS, Christos. Multi-criteria evaluation of a nanofluid-based linear Fresnel solar collector. **Solar Energy**, [S. l.], v. 163, n. October 2017, p. 200–214, 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2018.02.007.

BELLOS, Evangelos; TZIVANIDIS, Christos. A review of concentrating solar thermal collectors with and without nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S. l.], v. 135, n. 1, p. 763–786, 2019. a. DOI: 10.1007/s10973-018-7183-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7183-1>.

BELLOS, Evangelos; TZIVANIDIS, Christos. Alternative designs of parabolic trough solar collectors. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], v. 71, p. 81–117, 2019. b. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.11.001>.

BERTHOMIEU, Catherine; HIENERWADEL, Rainer. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. **Photosynthesis Research**, [S. l.], v. 101, n. 2, p. 157–170, 2009. DOI: 10.1007/s11120-009-9439-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11120-009-9439-x>.

BHUSAL, Yogesh; HASSANZADEH, Ali; JIANG, Lun; WINSTON, Roland. Technical and economic analysis of a novel low-cost concentrated medium-temperature solar collector. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 146, p. 968–985, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.032.

BIESINGER, M. C.; BROWN, C.; MYCROFT, J. R.; DAVIDSON, R. D.; MCINTYRE, N. S. X-ray photoelectron spectroscopy studies of chromium compounds. **Surface and Interface Analysis**, [S. l.], v. 36, n. 12, p. 1550–1563, 2004. DOI: 10.1002/sia.1983.

BILOKUR, Maryna; GENTLE, Angus; ARNOLD, Matthew D.; CORTIE, Michael B.; SMITH, Geoffrey B. Spectrally Selective Solar Absorbers based on Ta:SiO₂ Cermets for Next-Generation Concentrated Solar–Thermal Applications. **Energy Technology**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 2000125, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.202000125>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ente.202000125>.

BOLLI, Eleonora; FAVA, Alessandra; KACIULIS, Saulius; MEZZI, Alessio; MONTANARI, Roberto; VARONE, Alessandra. XPS study of Cr segregation in a

martensitic stainless steel. **Surface and Interface Analysis**, [S. l.], v. 52, n. 12, p. 1089–1092, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/sia.6776>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sia.6776>.

BORETTI, Albert; CASTELLETTO, Stefania; AL-ZUBAIDY, Sarim. Concentrating solar power tower technology: Present status and outlook. **Nonlinear Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 10–31, 2019. DOI: 10.1515/nleng-2017-0171.

BRERETON, Richard G. Introduction to analysis of variance. **Journal of Chemometrics**, [S. l.], v. 33, n. 1, 2019. DOI: 10.1002/cem.3018.

CALLISTER, William D.; OTHERS. **Fundamentals of materials science and engineering**. [s.l.] : Wiley London, 2000. v. 471660817

CAO, Feng; MCENANEY, Kenneth; CHEN, Gang; REN, Zhifeng. A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers. **Energy and Environmental Science**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 1615–1627, 2014. DOI: 10.1039/c3ee43825b.

CAO, Yunzhen; HU, Xingfang. Absorbing film on metal for solar selective surface. **Thin Solid Films**, [S. l.], v. 375, n. 1, p. 155–158, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01256-6](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01256-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609000012566>.

ÇENGEL, Y.; GHAIAR, A. Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática, 4ta edição. **MC Grau Hill**, [S. l.], 2012.

CENTER, Renewable Resource Data. **ASTM G173-03 reference spectra**, 2014.

CHAMSA-ARD, Wisut; BRUNDAVANAM, Sridevi; FUNG, Chun Che; FAWCETT, Derek; POINERN, Gerrard. **Nanofluid types, their synthesis, properties and incorporation in direct solar thermal collectors: A review**. [s.l.: s.n.]. v. 7 DOI: 10.3390/nano7060131.

CHAND, Mahesh; MEHTA, Aarti; SHARMA, Rina; OJHA, V. N.; CHAUDHARY, K. P. Roughness measurement using optical profiler with self-reference laser and stylus instrument - A comparative study. **Indian Journal of Pure and Applied Physics**, [S. l.], v. 49, n. 5, p. 335–339, 2011.

CHITHAMBARARAJ, A.; SANJINI, N. S.; BOSE, A. Chandra; VELMATHI, S. Flower-like

hierarchical h-MoO₃: New findings of efficient visible light driven nano photocatalyst for methylene blue degradation. **Catalysis Science and Technology**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 1405–1414, 2013. DOI: 10.1039/c3cy20764a.

CUESTA ZAPATA, Pablo M.; NAZZARRO, Marcelo S.; GONZO, Elio E.; PARENTIS, Mónica L.; BONINI, Norberto A. Cr/SiO₂ mesoporous catalysts: Effect of hydrothermal treatment and calcination temperature on the structure and catalytic activity in the gas phase dehydration and dehydrogenation of cyclohexanol. **Catalysis Today**, [S. l.], v. 259, p. 39–49, 2016. DOI: 10.1016/j.cattod.2015.04.038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2015.04.038>.

DA, Aline; OLIVEIRA, Silva. SUPERFICIAIS NA ABSORTÂNCIA E MORFOLOGIA DE FILMES ABSORVEDORES DE Mo / SiO₂ OBTIDOS VIA SPUTTERING JOÃO PESSOA – PB. [S. l.], 2021.

DE JONG, Pieter; BARRETO, Tarssio B.; TANAJURA, Clemente A. S.; KOULOLOUKOU, Daniel; OLIVEIRA-ESQUERRE, Karla P.; KIPERSTOK, Asher; TORRES, Ednildo Andrade. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 141, p. 390–401, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.086. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.086>.

DIGHORE, N.; DHONDE, S.; GAIKWAD, S.; RAJBHOJ, A. Synthesis of conducting polymer Polypyrrole-MoO₃ nanocomposites. [S. l.], v. 3, p. 797–804, 2016.

DING, Zi; QI, Cong; WANG, Yuxing; TU, Jianglin; SUN, Liang; WANG, Chengchao. Preparation and photothermal conversion performance of carbon-silica nanocomposite films for spectrally selective solar absorbers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 233, p. 111391, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111391>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821004335>.

DUAN, Xiaohua; ZHANG, Xuemin; KE, Chengzhu; JIANG, Songmin; WANG, Xiaobo; LI, Shulin; GUO, Weiyang; CHENG, Xudong. Microstructure and optical properties of Co-WC-Al₂O₃ duplex ceramic metal-dielectric solar selective absorbing coating prepared by high velocity oxy-fuel spraying and sol-gel method. **Vacuum**, [S. l.], v. 145, p. 209–216, 2017. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.09.002. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.09.002>.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar energy thermal processes**. [s.l.: s.n.].

DUKSTIENE, Nijole; SINKEVICIUTE, Dovile; GUOBIENE, Asta. Morphological, structural and optical properties of MoO₂ films electrodeposited on SnO₂/glass plate. **Open Chemistry**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 1106–1118, 2012. DOI: [doi:10.2478/s11532-012-0012-7](https://doi.org/10.2478/s11532-012-0012-7). Disponível em: <https://doi.org/10.2478/s11532-012-0012-7>.

EDA, Kazuo. Longitudinal-transverse splitting effects in IR absorption spectra of MoO₃. **Journal of Solid State Chemistry**, [S. l.], v. 95, n. 1, p. 64–73, 1991. DOI: [10.1016/0022-4596\(91\)90376-S](https://doi.org/10.1016/0022-4596(91)90376-S).

EL-DAMRAWI, G.; ABDELGHANY, A. M.; ORABY, A. H.; MADSHAL, M. A. Structural and optical absorption studies on Cr₂O₃ doped SrO-P₂O₅ glasses. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [S. l.], v. 228, p. 117840, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117840>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386142519312302>.

EL RADAF, I. M.; ABDELHAMEED, Reda M. Surprising performance of graphene oxide/tin dioxide composite thin films. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 765, p. 1174–1183, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.277>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838818323983>.

ELESB, Taiane Rodrigues. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas , Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de. [S. l.], 2012.

EPE. Balanço Energético Nacional (BEN). [S. l.], [s.d.].

ESTRELLA-GUTIÉRREZ, M. A.; LIZAMA-TZEC, F. I.; ARÉS-MUZIO, O.; OSKAM, G. Influence of a metallic nickel interlayer on the performance of solar absorber coatings based on black nickel electrodeposited onto copper. **Electrochimica Acta**, [S. l.], v. 213, p. 460–468, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.125>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468616316437>.

EVANGELISTI, Luca; DE LIETO VOLLARO, Roberto; ASDRUBALI, Francesco. Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 114, n. March, p. 109318, 2019. DOI:

10.1016/j.rser.2019.109318. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>.

FAGNER, Maycon; MENESES, De Oliveira; PETERSON, Ronny; UFPB, Gonçalves; CRISTIANE, KELLY, Gomes. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO SUPERFICIAL EM SUPERFÍCIES INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO SUPERFICIAL EM SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS SELETIVAS À BASE DE Cr 2 O 3 PARA COLETORES. [S. l.], 2020.

FEIFEL, Sven C.; LISDAT, Fred. Silica nanoparticles for the layer-by-layer assembly of fully electro-active cytochrome c multilayers. **Journal of Nanobiotechnology**, [S. l.], v. 9, n. 1, p.

59, 2011. DOI: 10.1186/1477-3155-9-59. Disponível em:

<http://www.jnanobiotechnology.com/content/9/1/59>.

FERRAZ DE ANDRADE SANTOS, José Alexandre; DE JONG, Pieter; ALVES DA COSTA, Caiuby; TORRES, Ednildo Andrade. Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil. **Utilities Policy**, [S. l.], v. 67, p. 101084, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101084>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178720300795>.

FERREIRA, Agmar; KUNH, Sheila S.; FAGNANI, Kátia C.; DE SOUZA, Tiago A.; TONEZER, Camila; DOS SANTOS, Geocris Rodrigues; COIMBRA-ARAÚJO, Carlos H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 81, p. 181–191, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117310389>.

FUDHOLI, Ahmad; SOPIAN, Kamaruzzaman. A review of solar air flat plate collector for drying application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 102, n.

December 2017, p. 333–345, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.032.

FUSO NERINI, Francesco et al. Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals. **Nature Energy**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 10–15, 2018. DOI:

10.1038/s41560-017-0036-5.

GALLO, Nelson José Heraldo. **Preparação e caracterização de revestimentos seletivos para conversão fototérmica de energia solar**, 1985.

GAO, Datong et al. Experimental and numerical analysis of an efficiently optimized evacuated flat plate solar collector under medium temperature. **Applied Energy**, [S. l.], v. 269, p. 115129, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115129>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920306413>.

GAO, Xiang-Hu; GUO, Zhi-Ming; GENG, Qing-Fen; MA, Peng-Jun; WANG, Ai-Qin; LIU, Gang. Enhanced optical properties of TiN-based spectrally selective solar absorbers deposited at a high substrate temperature. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 163, p. 91–97, 2017. a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817300272>.

GAO, Xiang-Hu; GUO, Zhi-Ming; GENG, Qing-Fen; MA, Peng-Jun; WANG, Ai-Qin; LIU, Gang. Microstructure, chromaticity and thermal stability of SS/TiC-WC/Al₂O₃ spectrally selective solar absorbers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 164, p. 63–69, 2017. b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.02.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817300624>.

GAO, Xiang-Hu; QIU, Xiao-Li; SHEN, Yong-Qian; HE, Cheng-Yu; LIU, Gang. A novel TiC–ZrB₂/ZrB₂/Al₂O₃ multilayer high temperature solar selective absorbing coating: Microstructure, optical properties and failure mechanism. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 203, p. 110187, 2019. a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110187>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024819305161>.

GAO, Xiang Hu; GUO, Zhi Ming; GENG, Qing Fen; MA, Peng Jun; LIU, Gang. Microstructure and Optical Properties of SS/Mo/Al₂O₃ Spectrally Selective Solar Absorber Coating. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 161–167, 2017. c. DOI: 10.1007/s11665-016-2445-1.

GAO, Xiang Hu; QIU, Xiao Li; LI, Xiao Ting; THEISS, Wolfgang; CHEN, Bao Hui; GUO, Hui Xia; ZHOU, Tian Hong; LIU, Gang. Structure, thermal stability and optical simulation of ZrB₂ based spectrally selective solar absorber coatings. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 193, n. December 2018, p. 178–183, 2019. b. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.12.040. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.040>.

GHARAT, Punit V.; BHALEKAR, Snehal S.; DALVI, Vishwanath H.; PANSE, Sudhir V.; DESHMUKH, Suresh P.; JOSHI, Jyeshtharaj B. Chronological development of innovations in reflector systems of parabolic trough solar collector (PTC) - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 145, n. April, p. 111002, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111002>.

GOMES, Carlos Antonio Silva. Estudo comparativo de superfícies seletivas para coletores solares. [S. l.], p. 87, 2001.

GÓMEZ-MAGALLÓN, Jorge Luis; MENCHACA-RIVERA, J. Alejandro; PINEDA-PÍÑÓN, Jorge; AVILÉS-ARELLANO, Luz Ma.; GARCÍA-GARCÍA, Alejandra; ROBLES, Juan Francisco Pérez. Improvement of the anticorrosive and thermal properties of an Epoxy-SiO₂ coating due to the presence of silicon nitride. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], v. 147, p. 105735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105735>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944020300898>.

GONÇALVES, Ronny Peterson da Nóbrega. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO EM SUPERFÍCIES SELETIVAS SOLARES DE CrXOY OBTIDAS A PARTIR DE PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO. [S. l.], 2020.

GORJIAN, Shiva; EBADI, Hossein; CALISE, Francesco; SHUKLA, Ashish; INGRAO, Carlo. A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 222, n. July, p. 113246, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113246>.

GUDMUNDSSON, J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges. **Plasma Sources Science and Technology**, [S. l.], v. 29, n. 11, 2020. DOI: 10.1088/1361-6595/abb7bd.

GUI-LONG, Xu; CHANGYUN, Deng; YUN, Liang; PI-HUI, Pi; JIAN, Hu; ZHUORU, Yang. Preparation and characterization of raspberry-like SiO₂ particles by the sol-gel method. **Nanomaterials and Nanotechnology**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 79–83, 2011. DOI: 10.5772/45813.

GUZMAN, G.; YEBKA, B.; LIVAGE, J.; JULIEN, C. Lithium intercalation studies in hydrated molybdenum oxides. **Solid State Ionics**, [S. l.], v. 86–88, n. PART 1, p. 407–413,

1996. DOI: 10.1016/0167-2738(96)00338-4.

HACHICHA, Ahmed Amine; YOUSEF, Bashria A. A.; SAID, Zafar; RODRÍGUEZ, Ivette. A review study on the modeling of high-temperature solar thermal collector systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 112, n. January, p. 280–298, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.056.

HENSON, R. N. **Analysis of Variance (ANOVA)**. [s.l.] : Elsevier Inc., 2015. v. 1 DOI: 10.1016/B978-0-12-397025-1.00319-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00319-5>.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, CARLOS DAVID; BARRERA-CALVA, ENRIQUE; GONZÁLEZ, FEDERICO; RENTERÍA TAPIA, VICTOR. Ultrasonic spray pyrolysis technique to generate a solar absorber coating of Mn-doped O_3 . **Renew. Energy Environ. Sustain.**, [S. l.], v. 6, p. 3, 2021. DOI: 10.1051/rees/2021003. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/rees/2021003>.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, Carlos David; BARRERA-CALVA, Enrique; GONZÁLEZ, Federico; RENTERÍA TAPIA, Victor. Ultrasonic spray pyrolysis technique to generate a solar absorber coating of Mn-doped $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, [S. l.], v. 6, p. 3, 2021. DOI: 10.1051/rees/2021003.

HERNÁNDEZ-PINILLA, D.; RODRÍGUEZ-PALOMO, A.; ÁLVAREZ-FRAGA, L.; CÉSPEDES, E.; PRIETO, J. E.; MUÑOZ-MARTÍN, A.; PRIETO, C. MoSi₂-Si₃N₄ absorber for high temperature solar selective coating. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 152, p. 141–146, 2016. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.04.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.001>.

HOFMAN, R.; WESTHEIM, J. G. F.; POUWEL, I.; FRANSEN, T.; GELLINGS, P. J. FTIR and XPS studies on corrosion-resistant SiO₂ coatings as a function of the humidity during deposition. **Surface and Interface Analysis**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 1–6, 1996. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9918(199601)24:1<::AID-SIA73>3.0.CO;2-I.

HON, Giora; GOLDSTEIN, Bernard R. **Reflections on the Practice of Physics: James Clerk Maxwell's Methodological Odyssey in Electromagnetism**. [s.l.] : Routledge, 2020.

HONES, P.; DISERENS, M.; LÉVY, F. Characterization of sputter-deposited chromium

oxide thin films. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 120–121, p. 277–283, 1999. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00384-9.

HONG, Seungbum; KIM, Eunah; KIM, Dae-Weon; SUNG, Tae-Hyun; NO, Kwangsoo. On measurement of optical band gap of chromium oxide films containing both amorphous and crystalline phases. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [S. l.], v. 221, n. 2, p. 245–254, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00367-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00367-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309397003670>.

HU, Quanli; SUZUKI, Hiroshi; GAO, Hong; ARAKI, Hiroshi; YANG, Wen; NODA, Tetsuji. High-frequency FTIR absorption of SiO₂/Si nanowires. **Chemical Physics Letters**, [S. l.], v. 378, n. 3, p. 299–304, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2003.07.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009261403012892>.

HUTCHINS, Michael G. Spectrally selective solar absorber coatings. **Applied Energy**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 251–262, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(79\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0306-2619(79)90016-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261979900163>.

IBRAHIM, Khalil; TAHA, Hatem; RAHMAN, M. Mahbubur; KABIR, Humayun; JIANG, Zhong-Tao. Solar selective performance of metal nitride/oxynitride based magnetron sputtered thin film coatings: a comprehensive review. **Journal of Optics**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 33001, 2018. DOI: 10.1088/2040-8986/aaa2c5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/aaa2c5>.

ISAACS, Mark A.; DAVIES-JONES, Josh; DAVIES, Philip R.; GUAN, Shaoliang; LEE, Roxy; MORGAN, David J.; PALGRAVE, Robert. Advanced XPS characterization: XPS-based multi-technique analyses for comprehensive understanding of functional materials. **Materials Chemistry Frontiers**, [S. l.], v. 5, n. 22, p. 7931–7963, 2021. DOI: 10.1039/d1qm00969a.

ISLAM, Md Tasbirul; HUDA, Nazmul; ABDULLAH, A. B.; SAIDUR, R. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 91, n. April, p. 987–1018, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.097. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>.

JIANG, Chuan; YU, Lei; YANG, Song; LI, Keke; WANG, Jun; LUND, Peter D.; ZHANG, Yaoming. **A Review of the Compound Parabolic Concentrator (CPC) with a Tubular Absorber** *Energies*, 2020. DOI: 10.3390/en13030695.

JOLY, M.; ANTONETTI, Y.; PYTHON, M.; LAZO, M. A. Gonzalez; GASCOU, T.; HESSLER-WYSER, A.; SCARTEZZINI, J. L.; SCHÜLER, A. Selective Solar Absorber Coatings on Receiver Tubes for CSP – Energy-efficient Production Process by Sol-gel dip-coating and Subsequent Induction Heating. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 57, p. 487–496, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.202>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214015690>.

JUTAROSAGA, Tula; JEOUNG, Jun Sik; SERAPHIN, Supapan. Infrared spectroscopy of Si-O bonding in low-dose low-energy separation by implanted oxygen materials. **Thin Solid Films**, [S. l.], v. 476, n. 2, p. 303–311, 2005. DOI: 10.1016/j.tsf.2004.10.006.

KASPAR, T. C.; CHAMBERLIN, S. E.; BOWDEN, M. E.; COLBY, R.; SHUTTHANANDAN, V.; MANANDHAR, S.; WANG, Y.; SUSHKO, P. V; CHAMBERS, S. A. Impact of lattice mismatch and stoichiometry on the structure and bandgap of $(\text{Fe,Cr})_{2-x}\text{O}_{3-x}$ epitaxial thin films. **Journal of Physics: Condensed Matter**, [S. l.], v. 26, n. 13, p. 135005, 2014. DOI: 10.1088/0953-8984/26/13/135005. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/13/135005>.

KAUFMANN, Jörg; SCHERING, A. G. **Analysis of Variance ANOVA** *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials: Major Reference Works.*, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780471462422.eoct017>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780471462422.eoct017>.

KENNEDY, C. E.; PRICE, H. **Progress in development of high-temperature solar selective coating** *Proc. of ISEC 2005*, 2005.

KENNEDY, Ce. Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials. **NREL Technical Report**, [S. l.], n. July, p. 1–58, 2002. DOI: 10.2172/15000706. Disponível em: <http://large.stanford.edu/publications/power/references/troughnet/solarfield/docs/31267.pdf>.

KESKENLER, E. F.; AYDIN, S.; TURGUT, G.; DOLAN, S. Optical and structural properties of bismuth doped ZnO thin films by sol-gel method. Urbach rule as a function of crystal defects. **Acta Physica Polonica A**, [S. l.], v. 126, n. 3, p. 782–786, 2014. DOI: 10.12693/APhysPolA.126.782.

KHAMLICH, S.; MCCRINDLE, R.; NURU, Z. Y.; CINGO, N.; MAAZA, M. Annealing effect on the structural and optical properties of Cr/ α -Cr₂O₃ monodispersed particles based solar absorbers. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 265, p. 745–749, 2013. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.099. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.099>.

KHAN, Mohammed Mumtaz A.; IBRAHIM, Nasiru I.; MAHBUBUL, I. M.; MUHAMMAD. ALI, Hafiz; SAIDUR, R.; AL-SULAIMAN, Fahad A. Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: A review. **Solar Energy**, [S. l.], v. 166, n. February, p. 334–350, 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2018.03.014.

KHAN, Z. R.; ZULFEQUAR, M.; KHAN, M. S. Effect of Thickness on Structural and Optical Properties of Thermally Evaporated Cadmium Sulfide Polycrystalline Thin Films. **Chalcogenide Letters**, [S. l.], n. June, 2010.

KHELIFA, A. B.; KHAMLICH, S.; NURU, Z. Y.; KOTSEDI, L.; MEBRAHTU, A.; BALGOUTH, M.; GUIZANI, A. A.; DIMASSI, W.; MAAZA, M. Growth and characterization of spectrally selective Cr₂O₃/Cr/Cr₂O₃ multilayered solar absorber by e-beam evaporation. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 734, p. 204–209, 2018. a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.036>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.036>.

KHELIFA, A. B.; KHAMLICH, S.; NURU, Z. Y.; KOTSEDI, L.; MEBRAHTU, A.; BALGOUTH, M.; GUIZANI, A. A.; DIMASSI, W.; MAAZA, M. Growth and characterization of spectrally selective Cr₂O₃/Cr/Cr₂O₃ multilayered solar absorber by e-beam evaporation. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 734, p. 204–209, 2018. b. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.036. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.036>.

KHOJIER, K.; SAVALONI, H.; ASHKABUSI, Z.; DEHNAVI, N. Z. Structural, mechanical and tribological characterization of chromium oxide thin films prepared by post-annealing of

Cr thin films. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 284, p. 489–496, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.123>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433213014347>.

KHOLLARI, Mohammad Amin Razmjoo; GHORBANI, Mohammad; AFSHAR, Abdollah. Fabrication and characterization of TiO₂ deposited black electroless Ni-P solar absorber. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 496, p. 143632, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143632>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433219324298>.

KHOZA, N.; NURU, Z. Y.; SACEY, J.; KOTSEDI, L.; MATINISE, N.; NDLANGAMANDLA, C.; MAAZA, M. Structural and optical properties of ZrO_x/Zr/ZrO_x/Al_xO_y multilayered coatings as selective solar absorbers. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 773, p. 975–979, 2019. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.09.329](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.329).

KIM, Dohyung et al. Microstructural Evaluation of Phase Instability in Large Bandgap Metal Halide Perovskites. **ACS Nano**, [S. l.], v. 15, n. 12, p. 20391–20402, 2021. DOI: [10.1021/acsnano.1c08726](https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08726). Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08726>.

KIM, Hae-Young. Analysis of variance (ANOVA) comparing means of more than two groups. **rde**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 74–77, 2014. DOI: [10.5395/rde.2014.39.1.74](https://doi.org/10.5395/rde.2014.39.1.74). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5395/rde.2014.39.1.74>.

KIM, Tae Hyung; YEOM, Geun Young. A Review of Inductively Coupled Plasma-Assisted Magnetron Sputter System. **Applied Science and Convergence Technology**, [S. l.], v. 28, n. 5, p. 131–138, 2019. DOI: [10.5757/asct.2019.28.5.131](https://doi.org/10.5757/asct.2019.28.5.131).

KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, Ph V.; BONDAREV, A. V.; SHTANSKY, D. V.; LEVASHOV, E. A. Structure and properties of nanocomposite Mo—Si—B—(N) coatings. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces**, [S. l.], v. 51, n. 5, p. 794–802, 2015. DOI: [10.1134/S2070205115050160](https://doi.org/10.1134/S2070205115050160).

KOKOROPOULOS, Panos; SALAM, Ehab; DANIELS, Farrington. Selective radiation coatings. Preparation and high temperature stability. **Solar Energy**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 19–23, 1959. DOI: [10.1016/0038-092X\(59\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(59)90003-9).

KUMAR, Azad; PANDEY, Gajanan. Synthesis, Characterization, Effect of Temperature on

Band Gap Energy of Molybdenum Oxide Nano Rods and Their Antibacterial Activity.

American Journal of Applied and Industrial Chemistry, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 38–42, 2017.

DOI: 10.11648/j.ajaic.20170303.12. Disponível em:

<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajaic>.

KUMAR, G. B. Arjun; SHIVASHANKAR. Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system. **International Journal of Energy and**

Environmental Engineering, [S. l.], 2021. DOI: 10.1007/s40095-021-00399-9. Disponível

em: <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00399-9>.

KUMAR, N. et al. Phase-microstructure of Mo/Si nanoscale multilayer and intermetallic compound formation in interfaces. **Intermetallics**, [S. l.], v. 125, n. May, p. 106872, 2020.

DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106872. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106872>.

KUMARI, Sudesh; SINGH, Kamaljit; SINGH, Palwinder; KUMAR, Sanjay; THAKUR, Anup. Thickness dependent structural, morphological and optical properties of molybdenum oxide thin films. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 2, n. 8, p. 1439, 2020. DOI:

10.1007/s42452-020-3193-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3193-2>.

LANDI, Gabriel Teixeira. Desenvolvimento de um gerador de nanopartículas e caracterização de nanopartículas de cobalto. [S. l.], p. 1–78, 2009.

LANDOLT, D. Fundamental aspects of electropolishing. **Electrochimica Acta**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 1–11, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(87\)87001-9](https://doi.org/10.1016/0013-4686(87)87001-9). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013468687870019>.

LEE, Shuo-Jen; LAI, Jian-Jang. The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 140, n. 1, p. 206–210, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00785-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00785-4).

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603007854>.

LI, Guiqiang. Design and Development of a Lens-walled Compound Parabolic Concentrator-A Review. **Journal of Thermal Science**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 17–29, 2019. DOI:

10.1007/s11630-019-1083-3.

LI, Yang et al. Scalable all-ceramic nanofilms as highly efficient and thermally stable

selective solar absorbers. **Nano Energy**, [S. l.], v. 64, p. 103947, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103947>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519306548>.

LIANG, Yanjie; OUYANG, Jun; WANG, Hongyou; WANG, Weili; CHUI, Pengfei; SUN, Kangning. Synthesis and characterization of core-shell structured SiO₂@YVO₄:Yb³⁺, Er³⁺ microspheres. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 258, n. 8, p. 3689–3694, 2012. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.12.006.

LIANG, Zheng et al. A Selective Targeting Anchor Strategy Affords Efficient and Stable Ideal-Bandgap Perovskite Solar Cells. **Advanced Materials**, [S. l.], v. n/a, n. n/a, p. 2110241, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202110241>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.202110241>.

LIPIŃSKI, Wojciech et al. Progress in heat transfer research for high-temperature solar thermal applications. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 184, p. 116137, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116137>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431120336176>.

LIU, Bo; WANG, Chunyu; BAZRI, Shahab; BADRUDDIN, Irfan Anjum; OROOJI, Yasin; SAEIDI, Samrand; WONGWISES, Somchai; MAHIAN, Omid. Optical properties and thermal stability evaluation of solar absorbers enhanced by nanostructured selective coating films. **Powder Technology**, [S. l.], v. 377, p. 939–957, 2021. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.040.

LIU, Xiaojiang; WANG, Yan; CHEN, Zao; BEN, Keyang; GUAN, Zisheng. A self-modification approach toward transparent superhydrophobic glass for rainproofing and superhydrophobic fiberglass mesh for oil-water separation. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 360, n. February 2019, p. 789–797, 2016. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.11.069. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.069>.

LONI, Reyhaneh; ASKARI ASLI-AREH, E.; GHOBADIAN, B.; KASAEIAN, A. B.; GORJIAN, Sh; NAJAFI, G.; BELLOS, Evangelos. Research and review study of solar dish concentrators with different nanofluids and different shapes of cavity receiver: Experimental tests. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 145, p. 783–804, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.056.

LUND, John W.; TOTH, Aniko N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. **Geothermics**, [S. l.], v. 90, p. 101915, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650520302078>.

MA, Youcao; SONG, Jian; WANG, Xubo; LIU, Yue; ZHOU, Jia. Synthesis, microstructure and properties of magnetron sputtered lead zirconate titanate (Pzt) thin film coatings.

Coatings, [S. l.], v. 11, n. 8, 2021. DOI: 10.3390/coatings11080944.

MAGHAMI, Mohammad Reza; HASSANI, Rahman; GOMES, Chandima; HIZAM, Hashim; OTHMAN, Mohamad Lutfi; BEHMANESH, Mohammad. Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 45, n. 3, p. 1499–1509, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.223>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919341205>.

MAHESH, V. P.; ALPHONSA, J.; ARORA, Amit. Electrochemical Behavior of Aluminum-Molybdenum Surface Composites Developed by Friction Stir Processing. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S. l.], v. 30, n. 11, p. 8663–8676, 2021. DOI:

10.1007/s11665-021-06050-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06050-2>.

MAHESWARI, Nallappan; MURALIDHARAN, Gopalan. Controlled synthesis of nanostructured molybdenum oxide electrodes for high performance supercapacitor devices.

Applied Surface Science, [S. l.], v. 416, p. 461–469, 2017. DOI:

10.1016/j.apsusc.2017.04.094. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.094>.

MAKHLOUF, Salah A.; BAKR, Zinab H.; AL-ATTAR, H.; MOUSTAFA, M. S. Structural, morphological and electrical properties of Cr₂O₃ nanoparticles. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, [S. l.], v. 178, n. 6, p.

337–343, 2013. DOI: 10.1016/j.mseb.2013.01.012. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2013.01.012>.

MALAN, Anish; RAVI KUMAR, K. A comprehensive review on optical analysis of parabolic trough solar collector. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 46, n. May, 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101305.

MARTINS, Moema. Produção de Superfícies Seletivas por Magnetron Sputtering para Aplicação em Coletores Solares. *[S. l.]*, p. 75, 2010.

MAXWELL, James Clerk. II. A dynamical theory of the electromagnetic field. **Proceedings of the Royal Society of London**, *[S. l.]*, v. 13, p. 531–536, 1864. DOI: 10.1098/rspl.1863.0098. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspl.1863.0098>.

MAY, R. Alan; KONDRACHOVA, Lilia; HAHN, Benjamin P.; STEVENSON, Keith J. Optical Constants of Electrodeposited Mixed Molybdenum–Tungsten Oxide Films Determined by Variable-Angle Spectroscopic Ellipsometry. **The Journal of Physical Chemistry C**, *[S. l.]*, v. 111, n. 49, p. 18251–18257, 2007. DOI: 10.1021/jp075835b. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jp075835b>.

MEDEIROS, Ithyara Dheylle Machado De. Superfícies Seletivas a Base De Polímeros Inorgânicos Para Coletores Solares De Média E Alta Temperatura. *[S. l.]*, p. 140, 2016.

MEDEIROS, João Victor Furtado Frazão De; OLIVEIRA, Aline da Silva; GALVÃO, Gabriela Oliveira; MEDEIROS, Ithyara Dheylle Machado De; GOMES, Kelly Cristiane. Effect of Electrodeposition Time on Absorptance, Roughness and Thermal Stability of Black Chromium Absorbing Surfaces. **Materials Research**, *[S. l.]*, v. 25, 2022. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2021-0484.

MEDEIROS, Ithyara Dheylle Machado; GOMES, Kelly Cristiane; GONÇALVES, Ronny Peterson Da Nobrega; GALVÃO, Gabriela Oliveira. Selective solar surface solar based on black chromium: Influence of electrodeposition parameters in the absorption of surfaces. **Materials Research**, *[S. l.]*, v. 22, n. 2, 2019. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0625.

MENG, Jian-ping; GUO, Rui-rui; LI, Hu; ZHAO, Lu-ming; LIU, Xiao-peng; LI, Zhou. Microstructure and thermal stability of Cu/Zr_{0.3}Al_{0.7}N/Zr_{0.2}Al_{0.8}N/Al₃₄O₆₀N₆ cermet-based solar selective absorbing coatings. **Applied Surface Science**, *[S. l.]*, v. 440, p. 932–938, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.268>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433218302861>.

MEVADA, Dinesh; PANCHAL, Hitesh; ELDINBASTAWISSI, Hagar Alm; ELKELAWY, Medhat; SADASHIVUNI, Kishorkumar; PONNAMMA, Deepalekshmi; THAKAR, Nishant; SHARSHIR, S. W. Applications of evacuated tubes collector to harness the solar energy: a

review. **International Journal of Ambient Energy**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 344–361, 2022. DOI: 10.1080/01430750.2019.1636886. Disponível em: <https://doi.org/01430750.2019.1636886>.

MIRANDA, Matheus Cardoso De. IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA NO ESTUDO DE CORROSÃO DE LIGAS METÁLICAS Co – W EM MEIOS CORROSIVOS. [S. l.], 2018.

MISHRA, Prabhaker; SINGH, Uttam; PANDEY, Chandra M.; MISHRA, Priyadarshni; PANDEY, Gaurav. Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. **Annals of cardiac anaesthesia**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 407–411, 2019. DOI: 10.4103/aca.ACA_94_19. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31621677>.

MITTELSTÄDT, FRIEDRICH GEORG. Avaliação Eletroquímica Da Resistência a Corrosão Do Aço Abnt 4140 Nitretado Por Plasma. [S. l.], p. 121, 1993.

MOHAMED, Elamin; RIFFAT, Saffa; OMER, Siddig. Low-temperature solar-plate-assisted heat pump: A developed design for domestic applications in cold climate. **International Journal of Refrigeration**, [S. l.], v. 81, p. 134–150, 2017. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.05.020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.05.020>.

MOHAMMAD, Gehan; SELIM, Elsayed. Numbering As. [S. l.], n. February, p. 1945–1975, 2011.

MOLINA-GÓMEZ, Fausto; BULLA-CRUZ, Lenin Alexander; DARGHAN CONTRERAS, Aquiles Enrique. A novel approach for the control of grain size distributions based on variance analysis. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 285, p. 122748, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122748>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821005080>.

MOON, Jaeyun; LU, Dylan; VANSADERS, Bryan; KIM, Tae Kyoung; KONG, Seong Deok; JIN, Sungho; CHEN, Renkun; LIU, Zhaowei. High performance multi-scaled nanostructured spectrally selective coating for concentrating solar power. **Nano Energy**, [S. l.], v. 8, p. 238–246, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.06.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285514001220>.

MOURA, Lorena Braga. INFLUÊNCIA DO TEOR DE CROMO E MOLIBDÊNIO NA

MICROESTRUTURA E NA TEXTURA DE LIGAS Fe-Cr-Mo MICROESTRUTURA E NA TEXTURA DE LIGAS Fe-Cr-Mo. [S. l.], p. 128, 2010.

MU, Songlin; LI, Ning; LI, Deyu; ZOU, Zhongli. Investigation of a transparent chromate (III) passive film on electroless Ni–P coating by XPS and electrochemical methods.

Electrochimica Acta, [S. l.], v. 54, n. 26, p. 6718–6724, 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.06.076>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468609009050>.

NAVALHO, Jorge E. P.; PEREIRA, José C. F. A comprehensive and fully predictive discrete methodology for volumetric solar receivers: application to a functional parabolic dish solar collector system. **Applied Energy**, [S. l.], v. 267, n. April, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114781.

NAZRI, G. A.; JULIEN, C. Far-infrared and Raman studies of orthorhombic MoO₃ single crystal. **Solid State Ionics**, [S. l.], v. 53–56, n. PART 1, p. 376–382, 1992. DOI: 10.1016/0167-2738(92)90403-C.

NING, Yuping et al. NiCr–MgF₂ spectrally selective solar absorber with ultra-high solar absorptance and low thermal emittance. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 206, n. October 2019, p. 110219, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110219>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024819305483>.

NUNES, Rogério Antônio Xavier; COSTA, Vilma Conceição; SADE, Wagner; ARAÚJO, Frederico Resende; SILVAA, Guilherme Marconi. Selective surfaces of black chromium for use in solar absorbers. **Materials Research**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 1–5, 2018. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0556.

OPAN, Mücahit; ÜNLÜ, Murat; ÖZKALE, Celal; ÇELİK, Cenk; SARAÇ, Halil İbrahim. Optimal energy production from wind and hydroelectric power plants. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [S. l.], v. 41, n. 18, p. 2219–2232, 2019. DOI: 10.1080/15567036.2018.1555626. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1555626>.

PAN, Y.; PU, D. L.; YU, E. D. Structural, electronic, mechanical and thermodynamic properties of Cr–Si binary silicides from first-principles investigations. **Vacuum**, [S. l.], v.

185, n. October 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.110024.

PANG, Xuming; JIANG, Jianxin; LI, Bin; ZHAO, Danyang; ZHOU, Jianxin. Study of wide temperature range and hard protective La₂O₃ doped cermet based single-layer solar selective absorbing coating by laser cladding. **Surfaces and Interfaces**, [S. l.], v. 27, p. 101544, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surf.2021.101544>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468023021006210>.

PELENOVICH, Vasiliy; ZENG, Xiaomei; LIU, Yan; ZHANG, Xiangyu; LIU, Huidong; POGREBNJAK, Alexander; VILDANOV, Ramil; YANG, Bing; LIU, Sheng. AlCrO protected textured stainless-steel surface for high temperature solar selective absorber applications. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 436, p. 128282, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128282>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897222002031>.

PEREIRA, Enio et al. Atlas brasileiro de energia solar. **Atlas brasileiro de energia solar**, [S. l.], 2017. DOI: 10.34024/978851700089.

PEREIRA, Gustavo Furtado. SUPERFÍCIES SELETIVAS ABSORVEDORAS COM BASE EM CrO₃: AVALIAÇÃO DOS TRATAMENTOS DOS SUBSTRATOS E INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS FILMES. [S. l.], 2019. a. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63740309>.

PEREIRA, Reuler Cardoso. Políticas públicas para expansão da energia solar fotovoltaica: um estudo dos principais programas de incentivo da tecnologia no Brasil. [S. l.], p. 74, 2019. b.

PLATZER, W.; WITTWER, V. Chapter 3 - TRANSPARENT INSULATION MATERIALS. In: GRANQVIST, C. G. B. T. Materials Science for Solar Energy Conversion Systems (org.). **Renewable Energy**. Oxford: Pergamon, 1991. v. 1p. 44–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040937-5.50007-3>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080409375500073>.

QIU, Xiao-Li; GAO, Xiang-Hu; HE, Cheng-Yu; LIU, Gang. Optical design, thermal shock resistance and failure mechanism of a novel multilayer spectrally selective absorber coating based on HfB₂ and ZrB₂. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 211, p.

110533, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110533>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024820301367>.

QIU, Xiao-Li; GAO, Xiang-Hu; LIU, Gang. Enhanced spectral selectivity of HfC based high temperature solar absorbers with the addition of Mo. **Thin Solid Films**, [S. l.], v. 713, p. 138349, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138349>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609020305587>.

RACHMAN, Tahar. 済無No Title No Title No Title. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952., [S. l.], p. 10–27, 2018.

RAISUL ISLAM, M.; SUMATHY, K.; ULLAH KHAN, Samee. Solar water heating systems and their market trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 17, p. 1–25, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.09.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.011>.

RAVICHANDRAN, K.; PHILOMINATHAN, P. Investigations on microstructural and optical properties of CdS films fabricated by a low-cost, simplified spray technique using perfume atomizer for solar cell applications. **Solar Energy**, [S. l.], v. 82, n. 11, p. 1062–1066, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.04.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000984>.

RAZA, Mohsin Ali; REHMAN, Zaeem Ur; GHOURI, Faizan Ali. Corrosion study of silane-functionalized graphene oxide coatings on copper. **Thin Solid Films**, [S. l.], v. 663, n. April, p. 93–99, 2018. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.07.046. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.07.046>.

RUBIN, Elizabeth B.; CHEN, Yiming; CHEN, Renkun. Optical properties and thermal stability of Cu spinel oxide nanoparticle solar absorber coatings. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 195, p. 81–88, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.032>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024819301011>.

SABIHA, M. A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, Saad; MAHIAN, Omid. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 51, p. 1038–1054, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.016.

SAID, Zafar; HACHICHA, Ahmed Amine; ABEROUMAND, Sadegh; YOUSEF, Bashria A. A.; SAYED, Enas Taha; BELLOS, Evangelos. Recent advances on nanofluids for low to medium temperature solar collectors: energy, exergy, economic analysis and environmental impact. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], v. 84, 2021. DOI: 10.1016/j.pecs.2020.100898.

SAKHAEI, Seyed Ali; VALIPOUR, Mohammad Sadegh. Investigation on the effect of different coated absorber plates on the thermal efficiency of the flat-plate solar collector. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S. l.], v. 140, n. 3, p. 1597–1610, 2020. DOI: 10.1007/s10973-019-09148-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09148-x>.

SAKTHIVADIVEL, D.; BALAJI, K.; DSILVA WINFRED RUFUSS, D.; INIYAN, S.; SUGANTHI, L. Chapter 1 - Solar energy technologies: principles and applications. In: REN, Jingzheng B. T. Renewable-Energy-Driven Future (org.). [s.l.] : Academic Press, 2021. p. 3–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00001-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205396000017>.

SALVI, Swapnil S.; BHALLA, Vishal; TAYLOR, Robert A.; KHULLAR, Vikrant; OTANICAR, Todd P.; PHELAN, Patrick E.; TYAGI, Himanshu. Technological advances to maximize solar collector energy output: A review. **Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME**, [S. l.], v. 140, n. 4, 2018. DOI: 10.1115/1.4041219.

SANCHES, Luciana S.; DOMINGUES, Sergio H.; MARINO, Claudia E. B.; MASCARO, Lucia H. Characterisation of electrochemically deposited Ni–Mo alloy coatings. **Electrochemistry Communications**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 543–548, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.04.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388248104000694>.

SARAVANAN, S.; DUBEY, R. S. Synthesis of SiO₂nanoparticles by sol-gel method and their optical and structural properties. **Romanian Journal of Information Science and Technology**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 105–112, 2020.

SARBU, Ioan; SEBARCHIEVICI, Calin. **Solar Heating and Cooling Systems: Fundamentals, Experiments and Applications**. [s.l.: s.n.].

SCHNEIDER, Ricardo. Materiais Híbridos Formados Por Nanofilmes Moleculares Depositados Sobre Nanofilmes Metálicos Produzidos Por Processo Bottom-Up Em Substratos Vítreos Para Uso Como Parte Ativa De Nanodispositivos. *[S. l.]*, p. 108, 2008.

SELVAKUMAR, N.; BARSHILIA, Harish C. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, *[S. l.]*, v. 98, p. 1–23, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811005939>.

SHAFFEI, M. F.; HUSSEIN, H. S.; AWAD ABOUELATA, Ahmed M.; OSMAN, R. M.; MOHAMMED, Mona S. Effect of sealing on characteristics of nano-porous aluminum oxide as black selective coatings. **Cleaner Engineering and Technology**, *[S. l.]*, v. 4, p. 100156, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100156>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821001166>.

SIAN, Tarsame S.; REDDY, G. B. Optical, structural and photoelectron spectroscopic studies on amorphous and crystalline molybdenum oxide thin films. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, *[S. l.]*, v. 82, n. 3, p. 375–386, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.12.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024804000406>.

SILVA NETO, José Felix. Desenvolvimento de Superfícies Seletivas para Coletores Solares com Deposição Multicamadas Desenvolvimento de Superfícies Seletivas para Coletores Solares com Deposição Multicamadas de Cr e SiO₂. *[S. l.]*, p. 98f, 2017.

SILVA NETO, José Felix; TORRES, Sandro Marden; GOMES, Kelly Cristiane; LIMA FILHO, Marçal Rosas Florentino; GOMES, Rodinei Medeiros. Chromium silica co-sputtered graded Cermet for solar thermal collectors. **Solar Energy**, *[S. l.]*, v. 193, n. November, p. 212–219, 2019. DOI: [10.1016/j.solener.2019.09.059](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.059). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.059>.

SINGH, Jarnail; VERMA, Vikram; KUMAR, Rajesh; SHARMA, Sandeep; KUMAR, Ravi. Effect of structural and thermal disorder on the optical band gap energy of Cr₂O₃ nanoparticles. **Materials Research Express**, *[S. l.]*, v. 6, n. 8, p. 85039, 2019. DOI:

10.1088/2053-1591/ab195c. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab195c>.

SNAVELY, Cloyd A.; VAUGHAN, Dale A. Unit Cell Dimension of Face-centered Cubic Chromium Hydride and Space Groups of Two Chromium Hydrides. **Journal of the American Chemical Society**, [S. l.], v. 71, n. 1, p. 313–314, 1949. DOI: 10.1021/ja01169a085. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ja01169a085>.

SONE, B. T.; MANIKANDAN, E.; GURIB-FAKIM, A.; MAAZA, M. Single-phase α -Cr₂O₃ nanoparticles' green synthesis using Callistemon viminalis' red flower extract. **Green Chemistry Letters and Reviews**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 85–90, 2016. DOI: 10.1080/17518253.2016.1151083. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17518253.2016.1151083>.

SOUSA, Selen; SÁ, Alexandre; PIGOZZO, Victor; PASSOS, Julio C. Experimental evaluation of heat loss from a LFC's multi-tube trapezoidal cavity absorber considering strategic painting of the tubes. **AIP Conference Proceedings**, [S. l.], v. 2033, n. November, p. 1–8, 2018. DOI: 10.1063/1.5067084.

SOUZA, Ana Carolina De; DE ANDRADE LIMA, Luiz Rogerio Pinho. Produção De Molibdênio Metálico a Partir Da Molibdenita De Carnaíba (Bahia). **Holos**, [S. l.], v. 3, p. 3, 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.1832.

SRIMARA, P.; CHEVAPRUK, T.; KUMNORKAEW, P.; MUANGNAPOH, T.; VAS-UMNUAY, P. Synthesis of Ni Nanoparticles for Solar Selective Absorber by Chemical Reduction Method. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 23, p. 720–725, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.264>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319342944>.

STEFANELLO, Camila; MARANGONI, Filipe; ZEFERINO, Cristiane Lionço. **A Importância Das Políticas Públicas Para O Fomento Da Energia Solar Fotovoltaica No BrasilVII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

STHLE, Lars; WOLD, Svante. Analysis of variance (ANOVA). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 259–272, 1989. DOI: 10.1016/0169-7439(89)80095-4.

SULEJMANOVIĆ, Jasmina; MEMIĆ, Mustafa; HUREMOVIĆ, Jasna; SELOVIĆ, Alisa.

Simultaneous Preconcentration and Determination of Co (II), Cr (III), Fe (III), Mn (II), Ni (II) and Pb (II) by FAAS using Silica Gel Modified with Niobium (V) oxide. *[S. l.]*, v. 4, n. II, p. 662–670, 2015.

SUN, Jie; ZHANG, Zhi; WANG, Li; ZHANG, Zhenwen; WEI, Jinjia. Comprehensive Review of Line-Focus Concentrating Solar Thermal Technologies: Parabolic Trough Collector (PTC) vs Linear Fresnel Reflector (LFR). **Journal of Thermal Science**, *[S. l.]*, v. 29, n. 5, p. 1097–1124, 2020. a. DOI: 10.1007/s11630-020-1365-4.

SUN, Le; FU, Qian-Gang; SUN, Jia; ZHANG, Guang-peng. Comparison investigation of hot corrosion exposed to Na₂SO₄ salt and oxidation of MoSi₂-based coating on Nb alloy at 1000 °C. **Surface and Coatings Technology**, *[S. l.]*, v. 385, p. 125388, 2020. b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125388>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897220300578>.

SZABÓ, Loránd. The history of using solar energy. **Proceedings - 2017 International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017**, *[S. l.]*, n. 21, 2017. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974451.

TABOR, H. Solar Collectors, Selective Surfaces, and Heat Engines. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, *[S. l.]*, v. 47, n. 8, p. 1271–1278, 1961. DOI: 10.1073/pnas.47.8.1271.

TAO, Ke et al. Application of a-Si/μc-Si hybrid layer in tunnel oxide passivated contact n-type silicon solar cells. **Solar Energy**, *[S. l.]*, v. 144, p. 735–739, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.061>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17300804>.

THOMAS, Nathan H.; CHEN, Zhen; FAN, Shanhui; MINNICH, Austin J. Semiconductor-based Multilayer Selective Solar Absorber for Unconcentrated Solar Thermal Energy Conversion. **Scientific Reports**, *[S. l.]*, v. 7, n. 1, p. 3–8, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-05235-x.

TIAN, Meng; SU, Yuehong; ZHENG, Hongfei; PEI, Gang; LI, Guiqiang; RIFFAT, Saffa. A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, *[S. l.]*, v. 82, n.

June 2016, p. 1272–1296, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.050.

TIAN, Y.; ZHAO, C. Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. **Applied Energy**, [S. l.], v. 104, p. 538–553, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051.

TIAN, Yanpei; LIU, Xiaojie; GHANEKAR, Alok; ZHENG, Yi. Scalable-manufactured metal–insulator–metal based selective solar absorbers with excellent high-temperature insensitivity. **Applied Energy**, [S. l.], v. 281, n. October 2020, p. 116055, 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116055. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116055>.

TSEGAY, M. G.; GEBRETINSAE, H. G.; NURU, Z. Y. Structural and optical properties of green synthesized Cr₂O₃ nanoparticles. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 36, n. xxxx, p. 587–590, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.503. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.503>.

TSEGAY, M. G.; GEBRETINSAE, H. G.; WELEGERGS, G. G.; MAAZA, M.; NURU, Z. Y. Novel green synthesized Cr₂O₃ for selective solar absorber : Investigation of structural , morphological , chemical , and optical properties. [S. l.], v. 236, n. February 2021, p. 308–319, 2022.

TSILOMELEKIS, George; BOGHOSIAN, Soghomon. In Situ Raman and FTIR Spectroscopy of Molybdenum(VI) Oxide Supported on Titania Combined with ¹⁸O/¹⁶O Exchange: Molecular Structure, Vibrational Properties, and Vibrational Isotope Effects. **The Journal of Physical Chemistry C**, [S. l.], v. 115, n. 5, p. 2146–2154, 2011. DOI: 10.1021/jp1098987. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jp1098987>.

TULCHINSKY, Dani; UVAROV, Vladimir; POPOV, Inna; MANDLER, Daniel; MAGDASSI, Shlomo. A novel non-selective coating material for solar thermal potential application formed by reaction between sol-gel titania and copper manganese spinel. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 120, n. PART A, p. 23–29, 2014. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.08.004.

VAN DEN BERGH, Don et al. No Title. **L'Année psychologique**, Paris cedex 14, v. 120, n. 1, p. 73–96, 2020. DOI: 10.3917/anpsy1.201.0073. Disponível em:

https://www.cairn.info/load_pdf.php?ID_ARTICLE=ANPSY1_201_0073.

VARGAS, Soraida Aguilar; ESTEVES, Gheisa Roberta Telles; MAÇAIRA, Paula Medina; BASTOS, Bruno Quaresma; CYRINO OLIVEIRA, Fernando Luiz; SOUZA, Reinaldo Castro. Wind power generation: A review and a research agenda. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 218, p. 850–870, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619303944>.

VÁZQUEZ-VARGAS, D. A.; AMÉZAGA-MADRID, P.; JÁUREGUI-MARTÍNEZ, L. E.; ESQUIVEL-PEREYRA, O.; ANTÚNEZ-FLORES, W.; PIZÁ-RUIZ, P.; MIKI-YOSHIDA, M. Synthesis and microstructural characterization of cupric oxide and cobalt oxide nanostructures for their application as selective solar coatings. **Thin Solid Films**, [S. l.], v. 706, p. 138046, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138046>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609020302583>.

VENNEMANN, A.; STOCK, H. R.; KOHLSCHEEN, J.; RAMBADT, S.; ERKENS, G. Oxidation resistance of titanium–aluminium–silicon nitride coatings. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 174–175, p. 408–415, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00407-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00407-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897203004079>.

VILELA, M. F. Obtenção de uma Superfície Seletiva de Cromo Negro Depositado em um Substrato de Aço Inoxidável (AISI 304) para Conversão Térmica de Energia Solar. [S. l.], 1985.

VILLAVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1. **São Paulo: Érica**, [S. l.], 2012.

WANG, Bo; LIU, Hongtao; CHEN, Chao; ZHANG, Huaqiu; DU, Chunchun; ZHOU, Lizao. Novel fabrication of superamphiphobic molybdenum oxide coatings by chemical deposition. **Materials Letters**, [S. l.], v. 249, p. 116–119, 2019. DOI: [10.1016/j.matlet.2019.04.074](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.074). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.074>.

WANG, Chengbing; LI, Wei; LI, Zhengtong; FANG, Baizeng. Solar thermal harvesting based on self-doped nanocermet: Structural merits, design strategies and applications.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 134, p. 110277, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110277>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120305657>.

WANG, Hao; ALSHEHRI, Hassan; SU, Hang; WANG, Liping. Design, fabrication and optical characterizations of large-area lithography-free ultrathin multilayer selective solar coatings with excellent thermal stability in air. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 174, p. 445–452, 2018. a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.09.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817305160>.

WANG, Wei; WEN, Huaixing; LING, San; LI, Zhengtong; SU, Jingbu; WANG, Chengbing. Self-doped W-WO: X nanocermet multilayer films fabricated by single tungsten target reactive sputtering for selective solar absorption. **Journal of Materials Chemistry A**, [S. l.], v. 6, n. 32, p. 15690–15700, 2018. b. DOI: [10.1039/c8ta05231j](https://doi.org/10.1039/c8ta05231j).

WANG, Xiaobo; ZHANG, Xuemin; LI, Qingyu; MIN, Jie; CHENG, Xudong. 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**, [S. l.], v. 188, p. 81–92, 2018. c. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.08.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024818304100>.

WINDT, Christian; DAVIDSON, Josh; RINGWOOD, John V. High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 93, p. 610–630, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118303629>.

WU, Yangwei; ZHENG, Weifeng; LIN, Limei; QU, Yan; LAI, Fachun. Colored solar selective absorbing coatings with metal Ti and dielectric AlN multilayer structure. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S. l.], v. 115, p. 145–150, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024813001621>.

XIA, Chaoqun; SONG, Laiang; LIU, Shuguang; CHEN, Bohan; YANG, Tai; LIU, Di; YANG, Yudong; WANG, Yanqing; LI, Qiang. Influence of Cr addition on microstructure evolution and corrosion behavior of the Ti[Nb]Zr alloys. **Materials Characterization**, [S.

l.], v. 174, n. March, p. 111045, 2021. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111045. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111045>.

XIAO, Xiudi; MIAO, Lei; XU, Gang; LU, Limei; SU, Zhanmin; WANG, Ning; TANEMURA, Sakae. A facile process to prepare copper oxide thin films as solar selective absorbers. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 257, n. 24, p. 10729–10736, 2011. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.07.088. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.088>.

XU, Ke; DU, Miao; HAO, Lei; MI, Jing; YU, Qinghe; LI, Shijie. A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications. **Journal of Materiomics**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 167–182, 2020. DOI: 10.1016/j.jmat.2019.12.012.

YAN, Feng; JIANG, Jianguo; CHEN, Xuejing; TIAN, Sicong; LI, Kaimin. Synthesis and characterization of silica nanoparticles preparing by low-temperature vapor-phase hydrolysis of SiCl₄. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [S. l.], v. 53, n. 30, p. 11884–11890, 2014. DOI: 10.1021/ie501759w.

YANG, Yaxiong; QU, Xiaolei; ZHANG, Lingchao; GAO, Mingxia; LIU, Yongfeng; PAN, Hongge. Reaction-Ball-Milling-Driven Surface Coating Strategy to Suppress Pulverization of Microparticle Si Anodes. **ACS Applied Materials and Interfaces**, [S. l.], v. 10, n. 24, p. 20591–20598, 2018. DOI: 10.1021/acsami.8b05609.

YANG, Yong; WANG, Tianhe; YAO, Tingting; LI, Gang; SUN, Yangshan; CAO, Xin; MA, Liyun; PENG, Shou. Preparation of a novel TiN/TiN_xO_y/SiO₂ composite ceramic films on aluminum substrate as a solar selective absorber by magnetron sputtering. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 815, p. 152209, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152209>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838819334553>.

YU, Minghao et al. Interlayer gap widened α -phase molybdenum trioxide as high-rate anodes for dual-ion-intercalation energy storage devices. **Nature Communications**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 1348, 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-15216-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15216-w>.

ZHANG, Si Hai et al. Mechanism investigation of anoxic Cr(VI) removal by nano zero-valent

iron based on XPS analysis in time scale. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 335, n. October 2017, p. 945–953, 2018. DOI: 10.1016/j.cej.2017.10.182. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.182>.

ZHANG, Wen-Wen; QI, Hong; YU, Zhi-Qiang; HE, Ming-Jian; REN, Ya-Tao; LI, Yang. Optimization configuration of selective solar absorber using multi-island genetic algorithm. **Solar Energy**, [S. l.], v. 224, p. 947–955, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.059>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21005429>.

ZHANG, X. R.; YAMAGUCHI, H. An experimental study on evacuated tube solar collector using supercritical CO₂. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 28, n. 10, p. 1225–1233, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.07.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431107002487>.

ZUO, Lijian; SHI, Xueliang; FU, Weifei; JEN, Alex K. Y. Highly Efficient Semitransparent Solar Cells with Selective Absorption and Tandem Architecture. **Advanced Materials**, [S. l.], v. 31, n. 36, p. 1901683, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201901683>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201901683>.