

ESTRATÉGIA PARA A SUSTENTABILIDADE: ENERGIA SOLAR COM SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS MULTICAMADAS

KALLINY DOS SANTOS GONÇALVES
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

MIKAELY RENALY CARLOS DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

KELLY CRISTIANE GOMES

MONICA CARVALHO

Introdução

O consumo de energia é a principal origem da maior parte dos impactos ambientais encontrados, principalmente causados pela emissão de gases de efeito estufa, provenientes da queima de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Desta forma, para amenizar essas consequências, uma alternativa que apresenta grande potencial é a utilização de energias renováveis, como por exemplo a energia solar.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Responder às crescentes demandas de energia e poder desfrutar das vantagens de uma matriz energética de baixo carbono exige a análise da disponibilidade e aplicabilidade dos recursos naturais. Apesar do forte potencial de utilização da energia solar no Brasil, esta tecnologia ainda está timidamente presente na matriz energética brasileira (CARVALHO; DELGADO, 2017), principalmente devido aos elevados custos de capital envolvidos e aos baixos valores de eficiência.

Fundamentação Teórica

Quando um feixe de radiação térmica é incidente na superfície de um corpo, parte dele é refletida da superfície, parte é absorvida pelo corpo e parte é transmitida através do corpo. Uma forma de aproveitamento dessa energia é através do sistema de conversão solar-térmica. As superfícies seletivas conseguem melhorar o desempenho de coletores solares, aumentando a concentração de calor absorvido e diminuindo as perdas por emissão térmica, promovendo um acréscimo no ganho de energia desses equipamentos.

Metodologia

O tratamento dos substratos de aço foi com eletropolimento, baseada na metodologia de Lin e Hu (2008). As deposições das camadas foram realizadas pela técnica de Sputtering para Cr, SiO₂ e Cermet e realizadas análises de: Espectrofotometria UV-Vis, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Perfilometria Óptica e Envelhecimento Acelerado.

Análise dos Resultados

A obtenção de superfícies multicamadas de cromo, óxido de cromo, cermet e sílica pelo processo de magnetron sputtering mostrou-se bastante satisfatória, uma vez que, segundo os experimentos realizados, S3 (Cr/Cr₂O₃-Cr₂O₃) e S4 (Cr/Cr₂O₃-SiO₂) foram os filmes com os maiores níveis de absortância, superiores a 97%. Em geral, o uso de multicamadas para a formação dos filmes possibilitou alta eficiência nas propriedades ópticas das superfícies seletivas.

Conclusão

Verificou-se que as superfícies seletivas estudadas conseguem promover uma melhoria no desempenho dos coletores solares. O desenvolvimento de superfícies seletivas está diretamente relacionado com práticas sustentáveis, conseguindo auxiliar no processo de retomada da transição energética no Brasil e no mundo.

Referências Bibliográficas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª Edição. Brasília, 2008. CARVALHO, M.; DELGADO, D.B.M. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017. CUOMO, J.J.; ZIEGLER, J.F.; WOODALL, J.M. A new concept for solar energy thermal conversion. Applied Physics Letters, v. 26, n. 10, p. 557-559, 1975.

Palavras Chave

Sustentabilidade, Energia Solar, Superfícies Absorvedoras

Agradecimento a órgão de fomento

À CAPES pelo apoio financeiro durante boa parte da vigência desse curso.

ESTRATÉGIA PARA A SUSTENTABILIDADE: ENERGIA SOLAR COM SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS MULTICAMADAS

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia é a principal origem da maior parte dos impactos ambientais encontrados, principalmente causados pela emissão de gases de efeito estufa, provenientes da queima de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Desta forma, para amenizar essas consequências, uma alternativa que apresenta grande potencial é a utilização de energias renováveis, como por exemplo a energia solar.

Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2008) quase todas as fontes renováveis de energia, sejam elas hidráulica, biomassa, eólica ou energia dos oceanos, são formas indiretas da energia solar. Visto isso, o seu uso se apresenta como uma das mais promissoras fontes de energia do planeta, uma vez que há grande disponibilidade, e, também, devido ao fato de ser uma energia mais sustentável no processo de transformação em energia elétrica ou térmica.

Responder às crescentes demandas de energia e poder desfrutar das vantagens de uma matriz energética de baixo carbono exige a análise da disponibilidade e aplicabilidade dos recursos naturais. Apesar do forte potencial de utilização da energia solar no Brasil, esta tecnologia ainda está timidamente presente na matriz energética brasileira (CARVALHO; DELGADO, 2017), principalmente devido aos elevados custos de capital envolvidos e aos baixos valores de eficiência.

Quando um feixe de radiação térmica é incidente na superfície de um corpo, parte dele é refletida da superfície, parte é absorvida pelo corpo e parte é transmitida através do corpo. Uma forma de aproveitamento dessa energia é através do sistema de conversão solar-térmica para aquecimento de água, que é basicamente constituído pelo coletor solar, dispositivo responsável pela captação da radiação solar e sua conversão em calor utilizável, reservatório para armazenamento, fonte auxiliar de energia e uma rede de distribuição da água aquecida (LIMA, 2003). As superfícies seletivas conseguem melhorar o desempenho de coletores solares, aumentando a concentração de calor absorvido e diminuindo as perdas por emissão térmica, promovendo um acréscimo no ganho de energia desses equipamentos.

Inicialmente, foi estudado por Tabor (1956) e posteriormente diversos autores (KOKOROPOULOS *et al.*, 1959; FAN; SPURA, 1977; PILLAI; AGARWAL, 1980) que o desenvolvimento de superfícies de revestimento que combinassem uma alta absorção (α) na faixa do espectro correspondente a irradiação solar ($0,3 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$) e baixa emissão térmica (ϵ) na faixa espectral do infravermelho ($> 2,5 \mu\text{m}$) poderia aumentar a eficiência desses coletores. Essas superfícies são chamadas de superfícies seletivas e essa seletividade é medida de acordo com a razão entre os valores de absorptância e emitância (KENNEDY, 2002).

A melhora de desempenho de dispositivos que captam energia solar pode ser obtida, de modo substancial, com a escolha da superfície seletiva adequada. Embora alguns materiais já apresentem naturalmente características seletivas, ainda pode haver melhoria e aperfeiçoamento. A eficiência da captação de energia solar aumenta com a melhora de algumas propriedades dos materiais, como absorvância (capacidade de absorver luz) e a emitância (energia emitida pela superfície de um corpo). Partindo-se para o aprimoramento dessa seletividade em laboratório, pode-se incentivar a comercialização e a produção de coletores solares, chegando até a uma relação custo-benefício mais atrativa.

O aumento na sustentabilidade do uso da energia solar está alinhado com o Objetivo para Desenvolvimento Sustentável ("Garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos"). Modernizar as tecnologias para captação de energia solar (e.g., por meio do desenvolvimento de superfícies seletivas) está relacionado também a aumentar a infraestrutura para garantir fornecimento de energia sustentável. A procura de produtos mais sustentáveis e com menos impactos ambientais evoluiu rapidamente nos últimos anos, com as superfícies seletivas potencialmente desempenhando um papel importante no desenvolvimento de tecnologias de energia solar (MENEZES; GOMES; CARVALHO, 2022)

O objetivo geral deste trabalho é o de aumentar a sustentabilidade associada à utilização de energia solar, por meio de superfícies seletivas. Este é um trabalho experimental, que envolve as etapas principais de escolha dos materiais para a produção dos filmes absorvedores, tratamento superficial dos substratos, obtenção das superfícies, tratamentos térmicos e caracterização dos filmes afim de investigar suas características ópticas, morfológicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O tratamento dos substratos de aço com eletropolimento foi baseada na metodologia de Lin e Hu (2008), onde foi preparada uma solução contendo ácido fosfórico, ácido sulfúrico e glicerol na proporção de 2:1:1 (150 ml de H_3PO_4 , 75 ml de H_2SO_4 e 75 ml de $C_3H_8O_3$). Uma malha de aço inoxidável AISI 304 dimensões de 80 mm x 300 mm foi colocada em um béquer e parcialmente submersa na solução ácida, conectada ao polo negativo de uma fonte de tensão de corrente contínua. Os substratos foram imersos na solução, envoltos pela malha, e conectados ao polo positivo da fonte de tensão.

Para iniciar o processo foi utilizada uma tensão de 6V na fonte (Agilent, modelo E3631A). Um substrato de sacrifício foi empregado no primeiro momento para obter a estabilização da corrente. Em seguida, os demais substratos passaram, um a um, pelo processo de eletropolimento por um período de 10 minutos, depois foram limpos em água destilada e secos em papel absorvedor. Por último, os substratos foram levados ao banho ultrassônico em álcool isopropílico por 20 minutos para garantir que nenhum resquício da solução de eletropolimento permaneça na superfície da amostra e em seguida foram secos em ar quente.

2.2 PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DOS FILMES VIA *SPUTTERING*

As deposições das camadas foram realizadas pela técnica de *Sputtering*. Para o Cr_2O_3 foi utilizado um alvo comercial de com 99,99% de pureza, 2" (50,8mm) de diâmetro e 0,018" (3mm) de espessura fornecido pela Macashew Tecnologias LTDA. Também foi depositado Cr através de um alvo comercial fornecida pela empresa Kurt J. Lesker, essa pastilha possui pureza de 99,950%, diâmetro de 2" (50,8mm) e espessura de 0,125" (3,175mm). Já a pastilha de SiO_2 foi fornecida pela empresa AJA International Inc., com pureza de 99,995%, diâmetro de 2" (50,8mm) e espessura de 0,125" (3,175mm). Enquanto que a pastilha de *Cermet* (Cr/Cr $2O_3$) de uma liga de 40%p Cr – 60%p Cr_2O_3 possui um grau de pureza de 99,99% 2" (50,8mm) de diâmetro e 0,138" (3,5 mm) de espessura foi fornecido pela Macashew Tecnologias LTDA.

2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

2.3.1 Espectrofotometria UV-Vis

Para obter as curvas de absorção de radiação das amostras, foi utilizado o equipamento Espectrômetro Shimadzu 2600 UV 2600, com esfera de integração que amplia a faixa do espectro analisado. O equipamento emite radiação na faixa de comprimento de onda entre 220 a 1400 nm, sendo possível analisar o material em relação à sua capacidade de reflexão da região UV-Vis e parte do Infravermelho Próximo.

2.3.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

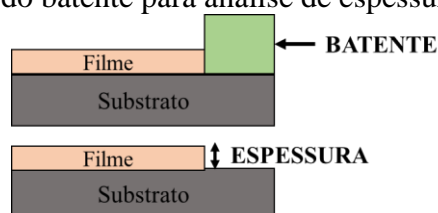
Foi realizada a espectroscopia na faixa do infravermelho em modo de Reflectância Total Atenuada (Attenuated Total Reflectance ou, simplesmente, ATR) utilizando o espectrofotômetro IR-Tracer-100, fornecido pela Shimadzu. Essa análise foi realizada na faixa espectral de 4000 cm^{-1} a 600 cm^{-1} em modo transmitância com o objetivo de detectar as frequências vibracionais das moléculas presentes nos filmes.

2.3.3 Perfilometria Óptica

Essa caracterização tem o objetivo de determinar a rugosidade e espessura da superfície produzida, onde empregou-se um perfilômetro sem contato modelo CCI MP da Taylor Hobson, conectado a uma unidade computadorizada contendo o software Talysurf CCI (Taylor Hobson, Inglaterra) para obtenção e análise dos dados.

Quanto a espessura foi utilizada a metodologia de “batente”, que consiste em fixar uma fita no substrato antes da deposição, como ilustrado na figura 1, garantindo que nessa área não ocorra a fixação do filme. Após a deposição, a fita foi removida e o substrato submetido a banho ultrassônico com álcool isopropílico para retirada de resíduos. Em seguida os filmes foram submetidos ao ensaio de Perfilometria para avaliar a diferença de altura entre a parte do substrato com e sem filme.

Figura 1-Metodologia do batente para análise de espessura.



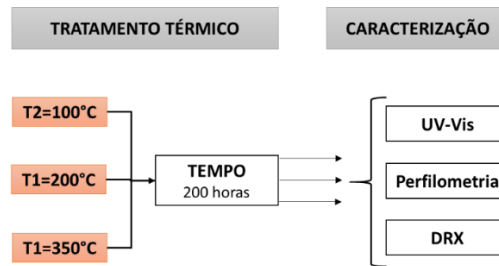
Fonte: Autoras.

2.3.4 Envelhecimento Acelerado

As amostras foram submetidas a um tratamento térmico nas temperaturas indicadas (100 °C, 200 °C e 350 °C) em um forno tipo mufla do fabricante Lucadema, modelo 2000F/DI, onde permaneceram por 200 horas, tempo estabelecido na primeira etapa do processo para avaliação da estabilidade térmica pela ISO 22975-3:2014. Em seguida, as amostras, foram caracterizadas usando as técnicas de Espectrofotometria na região do UV-Vis-NIR, Difração de Raios-X e Perfilometria Óptica. O fluxograma

presente na Figura 2 expõe a metodologia de envelhecimento e caracterização das amostras.

Figura 2 - Metodologia de envelhecimento das amostras.



Fonte: Autoras.

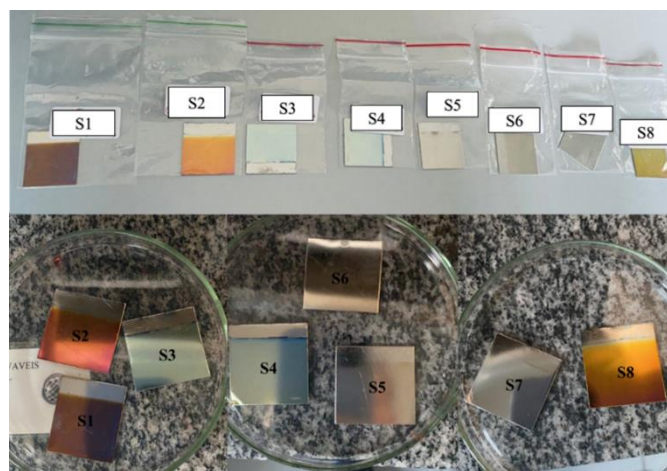
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EFEITO DO TIPO DE CAMADA DOS REVESTIMENTOS NA ABSORTÂNCIA DAS SUPERFÍCIES

Na figura 3 os filmes produzidos por *Sputtering* sobre substratos de aço conforme configuração citada na metodologia, onde S1 é composto por multicamadas de Cr₂O₃, Cr e Cr₂O₃, já o filme S2 é revestido por uma camada de Cr₂O₃, uma de Cr/Cr₂O₃ e outra de Cr₂O₃, a amostra S3 é composta por uma camada de Cr/Cr₂O₃ e uma de Cr₂O₃, a S4 por uma camada de Cr/Cr₂O₃ e uma de SiO₂, S5 por uma de Cr₂O₃, S6 por uma camada de Cr, S7 por uma de SiO₂ e S8 por uma camada de Cr/Cr₂O₃.

Os filmes absorvedores produzidos foram submetidos à radiação com comprimentos de onda na faixa de 220nm a 1400nm, de forma que foi determinada a reflectância espectral desses filmes. A Figura 3 exibe os resultados obtidos para as amostras em temperatura ambiente.

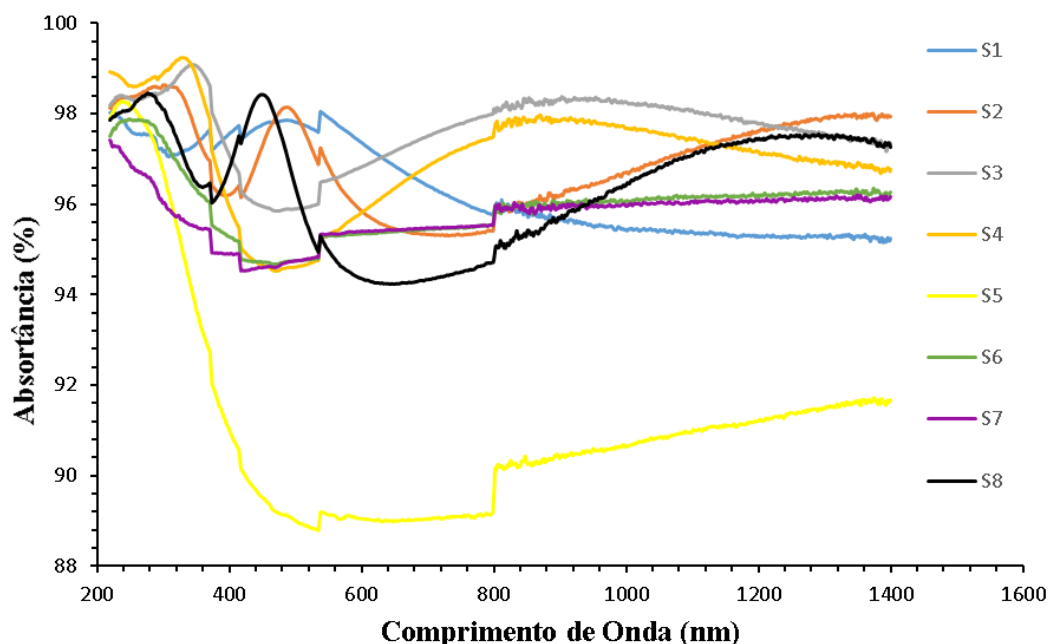
Figura 3 - Filmes produzidos por *Magnetron Sputtering* sobre substratos de Aço.



Fonte: Autoras.

Através da figura 4 é possível observar que as amostras apresentaram absorptâncias espectrais variando entre 89% e 99%, com algumas amostras apresentando homogeneidade de absorção ao longo do espectro e outras apresentando grande variação de absorção.

Figura 4 - Espectro de absorvância para os diferentes filmes absorvedores em temperatura ambiente.



Fonte: Autoras.

A partir dos dados mostrados na figura 4, foram calculadas as médias de absorvância, expostas na Tabela 1. A Tabela 1 também apresenta os valores de espessura dos filmes obtidos por ensaio de perfilometria, obtidos em escala nanométrica em virtude do processo de deposição utilizado.

Tabela 1 - Média das Absorvâncias e espessura dos filmes.

Amostra	Configuração	Absorvância solar (%)	Espessura (nm)
S1	Cr ₂ O ₃ – Cr – Cr ₂ O ₃	95,8646	240,5
S2	Cr ₂ O ₃ – Cr/Cr ₂ O ₃ – Cr ₂ O ₃	96,9890	226,5
S3	Cr/Cr ₂ O ₃ – Cr ₂ O ₃	97,8013	159,0
S4	Cr/Cr ₂ O ₃ – SiO ₂	97,1799	215,0
S5	Cr ₂ O ₃	90,6577	301,0
S6	Cr	96,0494	134,0
S7	SiO ₂	95,9331	87,3
S8	Cr/Cr ₂ O ₃	96,6683	64,3

Fonte: Autoras.

A análise da Tabela 1 revela que o filme que obteve maior nível de absorvância foi o S3 seguido do S4, ambos com percentagem de absorvância na ordem de 97%.

Comparando as amostras quanto ao seu desempenho em função da configuração utilizada, multicamadas ou apenas uma camada absorvedora, constata-se que não houve muita diferença nas médias das absorvâncias alcançadas, porém a amostra S5 não manteve uma estabilidade de absorção ao longo da faixa de comprimento de onda em estudo. Em geral, é possível afirmar que o uso de multicamadas proporcionou os melhores resultados, apresentando absorvâncias superiores a 97%.

O uso da camada antirreflexiva, seja Cr₂O₃ na amostra S3 ou SiO₂ na amostra S4, não trouxe grandes alterações na absorvância (aumento de 0,5 a 1,1 no percentual), porém

uma análise de emissividade poderia trazer uma redução dessa propriedade pelo fato deste material atenuar a perda de energia por radiação infravermelha.

3.2 EFEITO DA TEMPERATURA DE USO (ENVELHECIMENTO) NA ABSORTÂNCIA E MORFOLOGIA DAS SUPERFÍCIES PRODUZIDAS

Os espectros de absorvância das amostras envelhecidas foram obtidos através da Espectrofotometria de UV-Vis-NIR tornando possível observar a mudança de comportamento óptico das amostras após os tratamentos térmicos.

Na tabela 2 estão apresentados os valores médios de absorvância e espessura das amostras a temperatura ambiente e após serem submetidas à diferentes temperaturas. Ao lado de cada valor de absorvância está uma seta indicando se o comportamento óptico foi melhorado (seta verde para cima) ou piorado (seta vermelha para baixo) e um símbolo de aproximado (\approx) naquelas que obtiveram valor de absorvância próximo à amostra como depositada. Os melhores resultados estão destacados em negrito.

Tabela 2 - Média das Absorvâncias e espessura dos filmes dos filmes a temperatura ambiente (T1 = 25 °C) e com tratamento térmico (T2 = 100 °C, T3 = 200 °C E T4 = 350 °C).

Amostra	Configuração	Absorvância solar (%) / Espessura (nm)			
		T1	T2	T3	T4
S1	Cr ₂ O ₃ -Cr-Cr ₂ O ₃	95,8646	95,6451 \approx	96,4342 ↑	96,3922↑
		240,5	215	125	141,8
S2	Cr ₂ O ₃ -Cr/ Cr ₂ O ₃ - Cr ₂ O ₃	96,9890	95,0025↓	95,8580↓	96,6884 \approx
		226,5	142	132,5	234,6
S3	Cr/Cr ₂ O ₃ - Cr ₂ O ₃	97,8013	93,4726↓	97,8116 ↑	95,3954↓
		159	142	132,5	91
S4	Cr/Cr ₂ O ₃ -SiO ₂	97,1799	96,0772↓	97,4388 ↑	96,5788↓
		215	213,7	135	103,5
S5	Cr ₂ O ₃	90,6577	89,0311↓	89,8241↓	90,4620 \approx
		49	42	124	166
S6	Cr	96,0494	88,8082↓	96,2313 ↑	95,6760 \approx
		134	88,3	74	249
S7	SiO ₂	95,9331	91,4509↓	94,1651↓	96,3747 ↑
		87,3	83	161,5	136,3
S8	Cr/Cr ₂ O ₃	96,6683	95,2397↓	96,1574 \approx	95,9178 \approx
		64,3	47	270	209,7

Fonte: Autor.

Na Tabela 2 é possível observar que as absorvâncias solares das amostras diminuíram após tratamento térmico a 100 °C, exceto para a amostra S1 cuja absorvância solar manteve-se praticamente constante.

Após o tratamento a 200°C, as amostras S1, S3, S4 e S6 apresentaram um pequeno aumento nos níveis de absorvância em relação às amostras sem tratamento, enquanto as demais amostras apresentaram diminuição da absorvância solar, com exceção da S8 que permaneceu quase estável.

A maioria das amostras que foram submetidas ao tratamento térmico à 350°C manteve-se constante ou aumentaram seus níveis de absorvância em relação a amostra sem tratamento térmico, exceto as amostras S3 e S4, que tiveram seu desempenho

absortivo piorado. A amostra S1 foi a que obteve o maior aumento de absortância comparado a amostra em temperatura ambiente e após os tratamentos térmicos.

Em relação a espessura, quando as amostras foram submetidas a 100°C, elas diminuíram e com a elevação da temperatura, maior parte dos filmes apresentam um aumento na espessura, provavelmente resultante da difusão de átomos do substrato para a superfície.

A tabela 3 mostra a variação dos níveis de absorção ($\Delta\alpha$) que as amostras obtiveram após o último tratamento térmico (T4 = 350 °C) em relação à amostra em temperatura ambiente.

Tabela 3 - Média das Absortâncias dos filmes dos filmes em diferentes temperaturas e variação dos níveis de absorção.

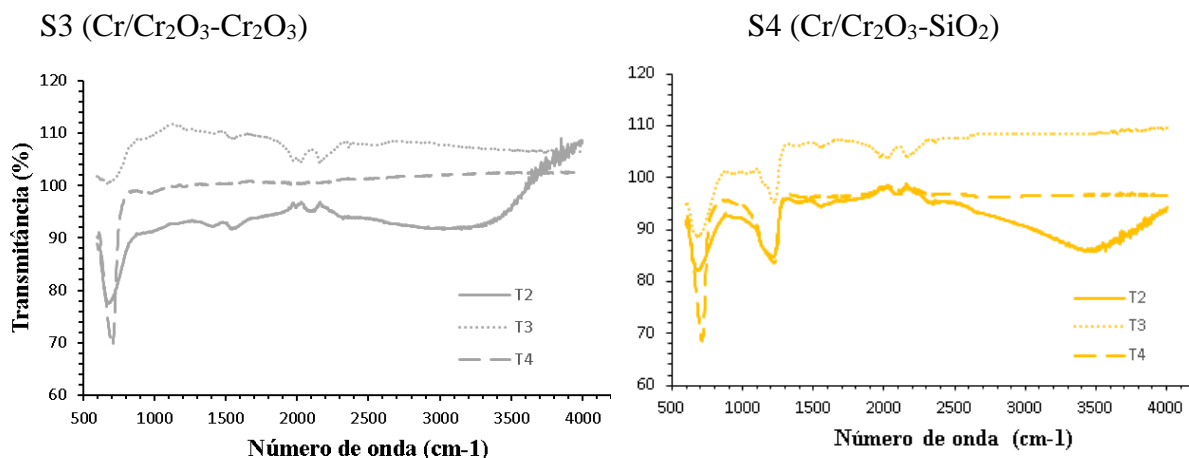
Amostra	Configuração	Absortância Solar (%)				$\Delta\alpha$
		T1	T2	T3	T4	
S1	Cr2O3-Cr-Cr2O3	95,8646	95,6451	96,4342	96,3922	0,5276
S2	Cr2O3-Cr/Cr2O3-Cr2O3	96,9890	95,0025	95,8580	96,6884	-0,3006
S3	Cr/Cr2O3-Cr2O3	97,8013	93,4726	97,8116	95,3954	-2,4059
S4	Cr/Cr2O3-SiO2	97,1799	96,0772	97,4388	96,5788	-0,6011
S5	Cr2O3	90,6577	89,0311	89,8241	90,4620	-0,1957
S6	Cr	96,0494	88,8082	96,2313	95,6760	-0,3734
S7	SiO2	95,9331	91,4509	94,1651	96,3747	0,4416
S8	Cr/Cr2O3	96,6683	95,2397	96,1574	95,9178	-0,7505

Fonte: Autor

Em geral as superfícies apresentaram boa estabilidade térmica, uma vez que as absortâncias não sofreram quedas superiores a 2,41% após todos os tratamentos térmicos. Desconsiderando a variância de emitância, as amostras atendem ao critério de desempenho proposto pela Norma Internacional ISO 22975 (ISO, 2014) que sugere que a eficiência das amostras não deva cair em mais que 5% durante uma vida útil de 25 anos. Algumas amostras apresentaram quedas severas entre as condições como depositada e após tratamento a 100°C, como as amostras S3, S6 e S7, entretanto essas absortâncias voltaram a crescer após tratamento térmico a 200°C.

Foi possível observar diferenças nos espectros das amostras S3 e S4 após realização dos tratamentos térmicos. Nota-se que em aproximadamente 700 cm⁻¹, a vibração característica do material depositado torna-se mais acentuada e a banda próxima a 3500 cm⁻¹ desaparece após o aumento da temperatura para T2 = 200 °C e T3 = 350 °C, provavelmente resultante da oxidação térmica desse material.

Figura 5 - Espectros de ATR em modo transmitância das amostras S3 e S4 após tratamentos térmicos (T2 = 100 °C, T3 = 200 °C e T4 = 350 °C).



Fonte: Autor.

Tabela 4 - Rugosidades superficiais (Ra e Sa) das amostras em diferentes temperaturas.

Amostra	Configuração	Ra (nm)				Sa (nm)			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
S1	Cr ₂ O ₃ -Cr-Cr ₂ O ₃	24,7	19,9	18,7	81,9	28	19	20	88
S2	Cr ₂ O ₃ -Cr/Cr ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	24,8	19,4	29	113,2	30	24,5	35	126,5
S3	Cr/Cr ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	20,9	23,7	20,6	21,7	23,5	29	26,3	27
S4	Cr/Cr ₂ O ₃ -SiO ₂	21,8	21,6	19,6	17	20,5	28	23	22
S5	Cr ₂ O ₃	31,8	15,4	39,9	43,4	34,5	19	39,5	46,5
S6	Cr	22,6	17,2	15,1	35,9	25	17	17,5	38,5
S7	SiO ₂	15,1	24,8	22,4	37,8	17,5	25,5	25,5	42,5
S8	Cr/Cr ₂ O ₃	27,2	26,6	18,2	32,9	25,5	31,5	21,5	34

Fonte: Autor.

Ao avaliar a tabela 4, percebe-se que, os valores de Ra e Sa são bem próximos, sendo Sa um pouco maior. Por intermédio das tabelas 2 e 4, é possível notar que a morfologia dos filmes que foram submetidos ao tratamento térmico apresentou certa influência nos percentuais de absorvância obtidas, principalmente nas amostras S1 e S7 que aumentaram seus níveis de absorvância em relação a amostra sem tratamento térmico.

A formação de armadilhas ópticas pode ter corroborado para esse acréscimo, visto isso, a tabela 5 apresenta as distâncias dos picos máximo à linha média (Rp) e distâncias dos vales mais profundo à linha média (Rv).

Tabela 5 - Rp e Rv das amostras em diferentes temperaturas.

Amostra	Configuração	Rp (nm)				Rv (nm)			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
S1	Cr ₂ O ₃ -Cr-Cr ₂ O ₃	78,7	40,5	74,5	294	92,1	74,4	83	339
S2	Cr ₂ O ₃ -Cr/Cr ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	104,4	99,9	76,8	333,3	154,7	108,2	148,7	539,9
S3	Cr/Cr ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	56,1	57	65,2	63,2	96,8	124	133,5	101,8
S4	Cr/Cr ₂ O ₃ -SiO ₂	52,2	52,3	54,3	66,2	70,5	96,2	107,1	76,2
S5	Cr ₂ O ₃	118,1	37,1	93,3	235,8	153,6	70,6	187,9	224,4
S6	Cr	65,9	38,5	38,4	284,5	118,5	68,5	114,4	316,1
S7	SiO ₂	49,8	58,6	56,4	264,5	83,8	118,5	113,9	253,9
S8	Cr/Cr ₂ O ₃	75,5	67,7	66	134,1	115,1	135,8	84,9	172,4

Fonte: Autor.

Segundo Cuomo et al. (1975), uma superfície constituída por uma rigorosa floresta de agulhas alinhadas com diâmetros de mesma dimensão que o comprimento de onda da luz visível, permite a absorção com elevada eficiência em função das múltiplas reflexões à proporção que os fótons penetram o labirinto de agulhas. Dessa maneira, observando as tabelas acima, é possível constatar que o aumento dos parâmetros Rp, Rv e Ra podem ter promovido essa construção de “labirinto de agulhas” que favoreceu a absorção.

Apesar da amostra S2 apresentar maiores diferenças na rugosidade em função do aumento da temperatura (Ra = 24,8 nm para T1, Ra = 113,2 nm para T4) e nas distâncias dos picos máximo (Rp) e vales mais profundo (Rv), não teve grande influência na absortância, uma vez que se manteve constante. A amostra S6 também teve níveis de absortância constante e não apresentou grande diferença no parâmetro Ra, mesmo tendo uma diferença considerável entre os parâmetros Rp e Rv, porém agulhas muito próxima podem impedir múltiplas reflexões e conseqüentemente não elevar a absorção dos filmes.

As amostras S3 e S4 foram as que tiveram menores diferenças de Rp e Rv, e de rugosidade com o tratamento térmico, S3 apresentando Ra = 20,9 nm para T1 e Ra = 21,7 nm para T4, e S4 tendo até uma redução desse parâmetro de 21,8 nm para T1 e 17 nm para T4, fato este que pode ter refletido na diminuição das suas absortâncias.

O choque térmico contínuo ocasionado pelo recozimento contribui para processo de envelhecimento das superfícies, dessa forma se faz importante o estudo da capacidade dos materiais de resistir a mudanças de estrutura e desempenho em diferentes temperaturas, tais características representam a estabilidade térmica do material. De acordo com Zhang *et al.* (2017) o choque ocasionado pelo ciclo térmico em revestimentos solares absorvedores multifásicos, cujas diferentes fases têm diferentes coeficientes de expansão, irão gerar tensões locais entre as fases, podendo acarretar desde microfissuração, até o abaulamento e derramamento da estrutura.

4. CONCLUSÕES

Nos últimos anos, os estudos sobre superfícies seletivas têm focado bastante nas aplicações sustentáveis, principalmente no que se refere à eficiência e eficácia de suas

aplicações. Verificou-se que as superfícies seletivas estudadas conseguem promover uma melhoria no desempenho dos coletores solares.

A obtenção de superfícies multicamadas de cromo, óxido de cromo, *cermet* e sílica pelo processo de *magnetron sputtering* mostrou-se bastante satisfatória, uma vez que, segundo os experimentos realizados, S3 (Cr/Cr₂O₃-Cr₂O₃) e S4 (Cr/Cr₂O₃-SiO₂) foram os filmes com os maiores níveis de absorvância, superiores a 97%. Em geral, o uso de multicamadas para a formação dos filmes possibilitou alta eficiência nas propriedades ópticas das superfícies seletivas.

O desenvolvimento de superfícies seletivas está diretamente relacionado com práticas sustentáveis, conseguindo auxiliar no processo de retomada da transição energética no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª Edição. Brasília, 2008.

CARVALHO, M.; DELGADO, D.B.M. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CUOMO, J.J.; ZIEGLER, J.F.; WOODALL, J.M. A new concept for solar energy thermal conversion. **Applied Physics Letters**, v. 26, n. 10, p. 557-559, 1975.

FAN, J. C.C.; SPURA, S. A. Selective black absorbers using rf-sputtered Cr₂O₃/Cr cermet films. **Applied Physics Letters**, v. 30, n. 10, p. 511-513, 1977.

GOLDEMBEGR, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 22975-3: Solar Energy – Collector Components and Materials– Part 3: Absorber Surface Durability**. Suíça, 2014.

KENNEDY, C. E. **Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials**. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2002.

KOKOROPOULOS, P.; SALAM, E.; DANIELS, F. Selective Radiation Coatings. Preparation and high temperature stability. **Solar Energy**, v. 3, p. 19-23, 1959.

LIMA, J.B.A. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS**. 2003. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LIN, C. C.; HU, C. C. Electropolishing of 304 stainless steel: Surface roughness control using experimental design strategies and a summarized electropolishing model. **Electrochimica Acta**, v. 53, n. 8, p. 3356–3363, 2008.

MENEZES, V. L.; GOMES, K. C.; CARVALHO, M. Evaluation of the manufacturing processes for solar selective surfaces based on Cr_xO_y from a carbon footprint perspective. **Cleaner Materials**, v. 3, p. 100035, 2022.

PILLAI, P. K. C.; AGARWAL, R. C. Preparation and characterisation of a spectrally selective black chrome coating for solar energy applications. **Applied Energy**, v. 7, n. 4, p. 299-303, 1980.

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

ZHANG, K. *et al.* A review on thermal stability and high temperature induced ageing mechanisms of solar absorber coatings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1282–1299, 2017.