

# **EFEITO DO FORMATO E DA QUANTIDADE DAS PARTÍCULAS DE CROMO NAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE SUPERFÍCIES SELETIVAS DE Cr-SiO<sub>2</sub>**

**Leonardo Correia** (UFPB) - leonardo.leandro@cear.ufpb.br

**Kelly Cristiane Gomes** (UFPB) - gomes@cear.ufpb.br

**Amanda Bastos Trovão Forte** (UFPB) - amanda.forte@cear.ufpb.br

**José Felix Silva Neto** (UFPB) - josefelix@cear.ufpb.br

**Philippe Pereira Moreira** (UFPB) - philippe.moreira@cear.ufpb.br

## **Resumo:**

*A maneira mais simples de converter a energia proveniente do sol é por meio de sua conversão térmica. Para isso, utilizam-se trocadores de calor chamados de coletores solares. Comumente, os coletores solares apresentam revestimentos em sua superfície capazes de “selecionar” a radiação incidente, seja para absorver mais radiação ou reduzir perdas nesse processo. Esses revestimentos são comumente conhecidos como superfícies seletivas. Nesse contexto, este trabalho se propõe a investigar a influência da morfologia das superfícies seletivas sobre suas propriedades ópticas absorvedoras com o auxílio do modelo do meio efetivo de Polder e Van Santen, que possibilita o cálculo da permissividade relativa efetiva de um meio contendo partículas de diferentes formatos em seu interior (discoidais, esféricas e cilíndricas). Este modelo é aplicável à superfícies seletivas compostas de uma matriz cerâmica contendo partículas metálicas em seu interior, também conhecidas como CERMETS (CERâmica e METal). Com o auxílio do software MATLAB, e as equações ópticas da física do estado sólido, foi simulado em um algoritmo o comportamento óptico (reflectância) da superfície seletiva sobre um determinado substrato dentro de cinco condições de controle, onde foram variadas a espessura do revestimento e a fração volumétrica do metal contido. Ao final do trabalho concluiu-se, para superfícies seletivas que apresentam espessura de 0,05µm, a melhor opção é que ela apresente majoritariamente partículas esféricas. Para filmes mais finos (da ordem de 0,025µm) nenhuma das condições estudadas, no tocante à fração volumétrica das partículas, apresentou resultados suficientemente bons para serem recomendados na construção de revestimentos. No entanto, para superfícies seletivas com espessuras mais elevadas (da ordem de 0,1µm), as partículas discoidais apresentaram excelentes resultados para se trabalhar com a fração volumétrica de 0,4.*

**Palavras-chave:** *Coletores solares, Superfícies seletivas, CerMets*

**Área temática:** *Conversão Térmica com coletores planos*

**Subárea temática:** *Coletores Solares Térmicos e Componentes do Circuito*

# EFEITO DO FORMATO E DA QUANTIDADE DAS PARTÍCULAS DE CROMO NAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE SUPERFÍCIES SELETIVAS DE Cr-SiO<sub>2</sub>

Leonardo Bitu Correia Leandro – leonardo.leandro@cear.ufpb.br  
Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica

José Félix da Silva Neto – josefelix@cear.ufpb.br

Kelly Cristiane Gomes da Silva – gomes@cear.ufpb.br

Amanda Bastos Trovão Forte – amanda.forte@cear.ufpb.br

Philippe Pereira Moreira – philippe.moreira@cear.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis

**Resumo.** *A maneira mais simples de converter a energia proveniente do Sol é por meio de sua conversão térmica. Para isso, utilizam-se trocadores de calor chamados de coletores solares. Comumente, os coletores solares apresentam revestimentos em sua superfície capazes de “selecionar” a radiação incidente, seja para absorver mais radiação ou reduzir perdas nesse processo. Esses revestimentos são comumente conhecidos como superfícies seletivas. Nesse contexto, este trabalho se propõe a investigar a influência da morfologia das superfícies seletivas sobre suas propriedades ópticas absorptivas com o auxílio do modelo do meio efetivo de Polder e Van Santen, que possibilita o cálculo da permissividade relativa efetiva de um meio contendo partículas de diferentes formatos em seu interior (discoidais, esféricas e cilíndricas). Este modelo é aplicável à superfícies seletivas compostas de uma matriz cerâmica contendo partículas metálicas em seu interior, também conhecidas como CERMETS (CERâmica e METal). Com o auxílio do software MATLAB, e as equações ópticas da física do estado sólido, foi simulado em um algoritmo o comportamento óptico (reflectância) da superfície seletiva sobre um determinado substrato dentro de cinco condições de controle, onde foram variadas a espessura do revestimento e a fração volumétrica do metal contido. Ao final do trabalho concluiu-se, para superfícies seletivas que apresentam espessura de 0,05  $\mu\text{m}$ , a melhor opção é que ela apresente majoritariamente partículas esféricas. Para filmes mais finos (da ordem de 0,025  $\mu\text{m}$ ) nenhuma das condições estudadas, no tocante à fração volumétrica das partículas, apresentou resultados suficientemente bons para serem recomendados na construção de revestimentos. No entanto, para superfícies seletivas com espessuras mais elevadas (da ordem de 0,1  $\mu\text{m}$ ), as partículas discoidais apresentaram excelentes resultados para se trabalhar com a fração volumétrica de 0,4.*

**Palavras-chave:** *Coletores solares, Superfícies seletivas, CERMET.*

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o esgotamento das reservas de energia não renováveis tem estado cada dia mais em evidência e apresenta-se como uma das principais problemáticas a serem resolvidas pelo homem. Essa discussão ganhou força a partir do final da década de 90 com a crise do petróleo e a assinatura do protocolo de Kyoto. Para os próximos 50-100 anos é necessária uma redução de aproximadamente 50% na emissão de gases que provocam o efeito estufa (Selvakumar; Barshilia, 2012). Sendo assim resta a humanidade explorar e desenvolver pesquisas ligadas ao aproveitamento de fontes alternativas e renováveis de energia, notadamente a energia solar.

A conversão solar térmica é a maneira mais simples de aproveitar a energia da radiação solar, é usada atualmente no aquecimento de água para o uso residencial, na geração de vapor para processos diversos e em ciclos de potência para geração de eletricidade (Weiss; Rommel, 2008). Os trocadores de calor envolvidos nessa modalidade de aproveitamento de energia são chamados de coletores solares. No entanto, apesar da conversão solar térmica apresentar uma boa relação custo benefício (Sani et al., 2012), esta utilização encontra limitações quando se busca aquecer fluidos a uma temperatura entre 100°C e 400°C (coletores de média temperatura) ou acima de 400°C (coletores de alta temperatura). Estas limitações estão associadas à alta emissão de calor por radiação (Incropera, 1992) e a baixa estabilidade térmica e ótica dos materiais nas faixas de temperatura mencionadas.

Os coletores solares de alta ou média temperatura trabalham por concentração de radiação e são chamados de coletores cilindro-parabólicos. Fazem parte desse tipo de coletor: receptor, tubo evacuado e o concentrador. O funcionamento desse tipo de coletor ocorre de maneira diferente ao coletor solar plano, pois o concentrador irá redirecionar a radiação incidente para uma área menor, onde estão o tubo evacuado e o receptor. O tubo evacuado é usado para isolar o receptor do ar atmosférico e por consequência reduzir as perdas térmicas. O receptor é formado pelo tubo metálico, normalmente aço inox, e o fluido que será aquecido (Correia, 2018).

Como a emissão de calor por radiação é um fenômeno de superfície (Incropera, 1992), Tabor (1961) e outros autores (Kokoropoulos et al., 1959; Shaffer, 1958) propuseram que os coletores solares fossem revestidos superficialmente com materiais que fossem bons absorvedores de radiação e por outro lado emitissem pouco

calor. Esses revestimentos receberam o nome de *superfícies seletivas*. Desde então, alguns autores (Ehrmann; Reineke-koch, 2012; Petitjean; Vander, 1980; Sani et al., 2012) têm se preocupado em melhorar a relação entre absorvidade e emissividade dessas superfícies visando um melhor rendimento dos coletores solares. Os materiais mais utilizados em coletores solares como absorvedores seletivos são o cromo negro, níquel negro, NiS-ZnS e o óxido de cobre negro (Kennedy, 2002; Selvakumarç Barshilia, 2012). Com o tempo chegou-se a resultados satisfatórios utilizando-se revestimentos a base de silício, óxido de estanho, óxido de cobre e óxido de cobalto (Kennedy, 2012).

Geralmente quando se deseja obter uma superfície seletiva de alta eficiência, é necessário incrementar as propriedades ópticas intrínsecas do material a partir de parâmetros associados à sua geometria construtiva. Isto significa que algumas características do revestimento seletivo como, por exemplo, sua espessura, a quantidade de camadas de revestimento e sua rugosidade influenciam diretamente o rendimento da absorção da radiação solar (Bass, 1995). Convém notar também que, para alcançar as características construtivas convenientes à alta seletividade óptica, é necessário um rigoroso controle do processo construtivo desses revestimentos.

Dentre os principais tipos de superfícies seletivas, destaca-se o tipo CERMET que consiste em um compósito formado por materiais cerâmicos (CER) e metálicos (MET), sendo extremamente resistente ao calor e ideal para fabricação de superfícies seletivas.

Quando se deseja avaliar qual a melhor geometria construtiva de um revestimento do tipo CERMET, é necessário o conhecimento de modelos matemáticos que possam estimar o comportamento óptico deste tipo de revestimento. As teorias que contêm esse tipo de descrição matemática são as Teorias de Meio Efetivo (Scheller et al, 2010). Estas teorias equacionam a constante dielétrica (permissividade dielétrica relativa) de materiais compósitos, calculada a partir das contribuições da fase matriz e da fase particulada.

Dentre as principais Teorias de Meio Efetivo destaca-se o modelo proposto por Polder e Van Santen (Scheller et al, 2010). Nesse modelo, a permissividade dielétrica efetiva do conjunto fase matriz (hospedeiro) e fase particulada (partículas) são determinadas a partir das Eqs. (1), (2) e (3). Essas equações mostram a permissividade dielétrica efetiva do filme para três tipos diferentes de partículas: Esféricas, discoidais e cilíndricas.

Esféricas:

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{3\epsilon_r} = f_p \frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{\epsilon_p + 2\epsilon_r} \quad (1)$$

Discos:

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{\epsilon_r + 2\epsilon_p} = f_p \frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{3\epsilon_p} \quad (2)$$

Cilindros:

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{6\epsilon_r} = f_p \frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{3(\epsilon_p + \epsilon_r)} \quad (3)$$

onde  $\epsilon_r$  representa a permissividade dielétrica efetiva do meio,  $\epsilon_h$  representa a permissividade dielétrica do material hospedeiro,  $\epsilon_p$  é a permissividade das partículas e por fim  $f_p$  é a fração volumétrica de partículas da fase particulada.

Assim, o objetivo principal desse trabalho é simular e avaliar o potencial absorptivo de um filme CERMET formado por uma camada de sílica (SiO<sub>2</sub>) e cromo metálico (Cr), e outra camada apenas de cromo, como um revestimento opticamente seletivo para coletores solares que operam nas faixas de temperatura média e alta.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

Com o intuito de estimar reflectância do conjunto filme-substrato é necessário conhecer duas propriedades desse conjunto: o índice de refração e o coeficiente de extinção. Essas propriedades correspondem, respectivamente, a razão entre a velocidade da luz no material e a velocidade da luz no vácuo, e a quantidade de radiação absorvida por um meio.

A permissividade dielétrica do meio pode ser relacionada com o índice de refração pela Eq. (4), conhecida como equação de Maxwell (Fox, 2001):

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

Dessa forma a permissividade dielétrica do meio é uma função complexa de duas constantes,  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , como mostra a Eq. (5):

$$\epsilon_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (5)$$

O índice de refração e o coeficiente de extinção relacionam-se com essas constantes partir das Eqs. (6) e (7) (Fox, 2001):

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}}(\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{0.5})^{0.5} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{0.5})^{0.5} \quad (7)$$

Se o filme é suficientemente fino (aproximadamente  $0,1\mu\text{m}$ ) a reflectância do conjunto filme-substrato será uma combinação entre a reflectância intrínseca do filme e a reflectância induzida no substrato. Para isso será utilizada a equação de Fresnel, representada pela Eq. (8) (Karlsson et al, 1982).

$$r_0 = \frac{r_1 + r_2 \cdot e^{-2i\varphi}}{1 + r_1 + r_2 \cdot e^{-2i\varphi}} \quad (8)$$

onde  $r_1$  e  $r_2$  são os coeficientes para a interface ar-filme e a interface filme-substrato respectivamente, e  $\varphi$  é o coeficiente de mudança de fase entre o filme e substrato. Sendo assim, o coeficiente  $r$ , sendo ele  $r_1$  e  $r_2$ , está explicitado na Eq. (9) e a mudança de fase  $\varphi$  está mostrada na Eq. (10). Essas equações estão escritas a seguir.

$$r = \frac{n_a - (n_b - ik_b)}{n_a + (n_b - ik_b)} \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{2\pi n_1 d}{\lambda} \quad (10)$$

os subíndices a e b representam as duas fases para o conjunto, podendo ser ar-filme e filme-substrato na mesma ordem.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação das características do modelo de Polder e Van Santen será considerado um revestimento formado por duas camadas, sendo uma delas o CerMet de Cr-SiO<sub>2</sub> e outra de Cr metálico, ambas estão sobre o substrato de aço inox. O uso do aço inox como substrato é importante para resistir às intemperes climáticas e o mesmo possui alta resistência a corrosão. Segundo Forte (2019), a radiação que atinge uma camada de cromo puro com espessura de 150 nm não é transmitida por ele, assim, este material será considerado como substrato para fins de cálculo.

O índice de refração e o coeficiente de extinção das partículas do cromo foi determinado por duas curvas em função do comprimento de onda da luz incidente ( $\lambda$ ) (Gao et al., 2012; Rakic et al., 1998), como mostrada na Fig. 1. As curvas foram obtidas no site: refractiveindex.info. Essas constantes podem ser aproximadas por equações polinomiais, as Eqs. (11) e (12), que dependem do comprimento de onda  $\lambda$ . A aproximação polinomial das curvas n e k foram feitas no Software Excel.

$$n_p(\lambda) = -0,3295\lambda^4 + 3,242\lambda^3 - 10,985\lambda^2 + 14,7\lambda - 2,425 \quad (11)$$

$$k_p(\lambda) = -0,3035\lambda^6 + 3,6626\lambda^5 - 17,673\lambda^4 + 42,909\lambda^3 - 53,131\lambda^2 + 31,472\lambda - 2,816 \quad (12)$$

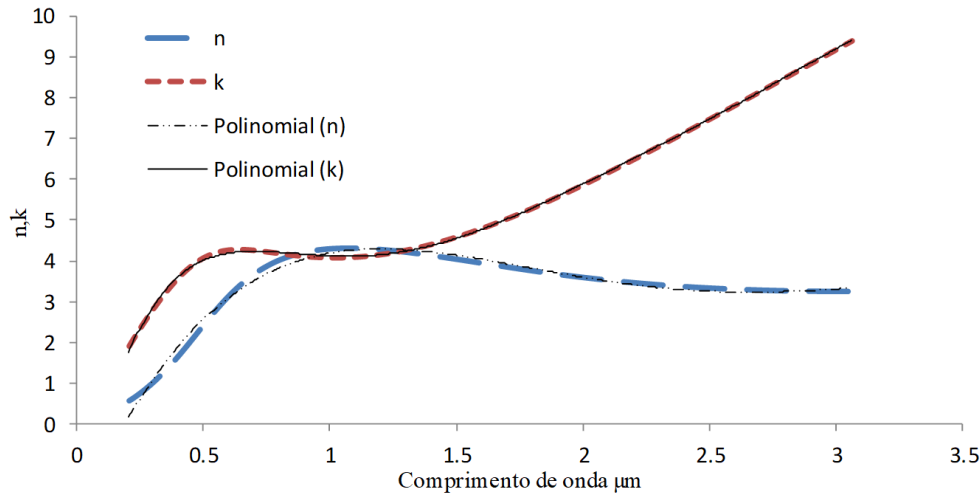


Figura 1 - Curvas para o  $n$  e o  $k$  com seus respectivos polinômios de aproximação.

Para utilizar a Eq. (8) de maneira correta é necessário levar em consideração a reflectância do conjunto ar-filme ( $r_1$ ) e filme-substrato ( $r_2$ ). Dessa forma para o conjunto ar-filme, a Eq. (9) se simplifica para a forma da Eq. (13). O mesmo acontece para o conjunto filme-substrato que se transforma na Eq. (14) mostrada abaixo.

$$r_1 = \frac{1 - n_1}{1 + n_1} \quad (13)$$

$$r = \frac{n_1 - (n_2 - ik_2)}{n_1 + (n_2 - ik_2)} \quad (14)$$

onde os subíndices 1 e 2 corresponde às propriedades do filme e do substrato, respectivamente.

Com o intuito de avaliar a influência do formato das partículas sobre as propriedades ópticas do filme, foram avaliadas condições que mostrassem a influência da espessura do filme e a influência das frações volumétricas das partículas na reflectância resultante da superfície. Dessa forma foram selecionadas cinco condições, sendo 1, 2 e 3 as condições onde variou-se a fração volumétrica das partículas para uma espessura constante de  $0,05 \mu m$ , e as condições 3, 4 e 5, onde foram avaliados os efeitos da variação da espessura para uma fração volumétrica fixa em 0,4. Na Tab. 1 estão mostradas todas as condições estudadas.

Tabela 1 – Tabela com as cinco condições para avaliação dos parâmetros do filme.

Condição	$d (\mu m)$	$fp$
1	0,05	0,2
2	0,05	0,3
3	0,05	0,4
4	0,025	0,4
5	0,1	0,4

Utilizando da ajuda do MATLAB, foi criado um algoritmo capaz de calcular a reflectância do filme de CERMET (sílica, cromo) junto com o substrato de aço inox de acordo com uma série de passos, descritos abaixo:

- 1) Selecionar os dados do índice de refração da sílica e com ajuda da Eq. (4) encontrar a sua permissividade dielétrica;
- 2) Calcular, para o comprimento de onda ( $\lambda$ ) variando de  $0,3 \mu m$  até  $2,5 \mu m$ , os valores de  $n$  e  $k$  para o cromo;
- 3) Utilizar as Eqs. (6) e (7) para encontrar a parte real e imaginária da permissividade dielétrica do cromo;

- 4) Escolher um dos três formatos de partículas das equações de Polder e Van Santen para estimar a permissividade dielétrica efetiva do meio;
- 5) Utilizar novamente as Eqs. (6) e (7) para encontrar o índice de refração e o coeficiente de extinção efetivo para o filme;
- 6) Calcular a reflectância do sistema com ajuda das Eqs. (13) e (14);
- 7) Construir o gráfico da reflectância do conjunto filme-substrato com ajuda da Eq.(8) em função do comprimento de onda da radiação solar.

#### 4. RESULTADOS

Primeiramente, analisaram-se os efeitos da variação fração volumétrica das partículas no filme para uma mesma espessura de filme e um mesmo formato de partícula. As Figs. 2, 3 e 4 indicam a reflectância dos conjuntos filme-substrato contendo partículas com morfologia de esferas, discos e cilindros, respectivamente. A espessura foi mantida constante em  $0,05 \mu\text{m}$  e a fração volumétrica das partículas foi variada em 0,2, 0,3 e 0,4 (condições 1, 2 e 3).

A Fig.2 mostra que existe uma diferença na reflectância para partículas com formato esférico, sendo menor para menores frações volumétricas. Nota-se também que essa diferença é mais notável para comprimentos de onda a partir de  $1,1 \mu\text{m}$ . Na faixa de comprimentos de onda entre  $0,5 \mu\text{m}$  até  $1,1 \mu\text{m}$  a diferença se torna desprezível. Partículas com superfícies curvilíneas fazem com que a radiação solar seja espalhada para outras direções no interior do filme (Schmitz, 1990). Dessa forma, quando a radiação solar interage com as partículas esféricas, sofre espalhamento para o interior do filme, assim, comprimentos de onda menores com maiores poder de penetração são mais facilmente absorvidos (Gouesbet, 2018).

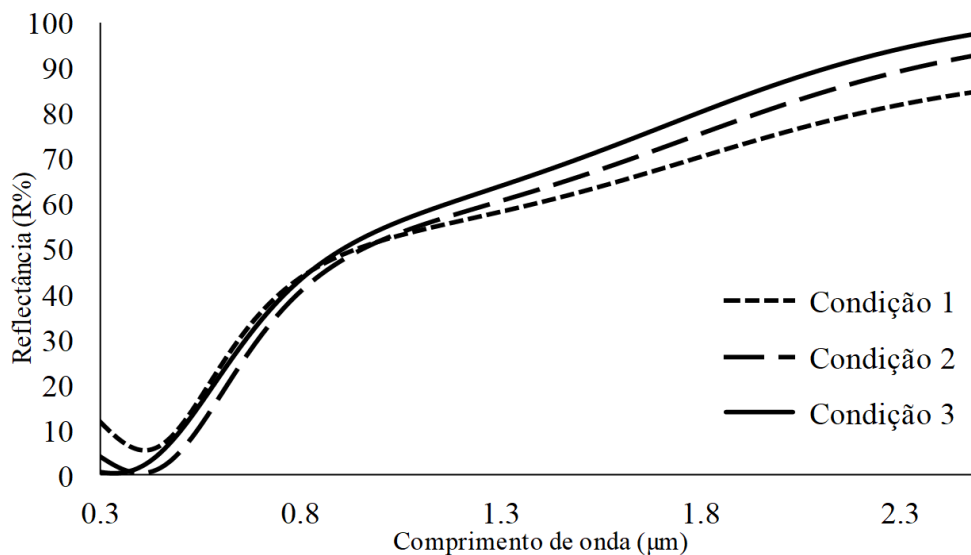


Figura 2- Variação da reflectância do sistema com partículas esféricas para três diferentes frações volumétricas.

Para as partículas com formato de discos (Fig. 3) a reflectância se apresenta em valores altos, e ao contrário das esferas, a curva que apresenta a menor reflectância foi a que correspondeu a condição 3. A diferença entre as três curvas é elevada ao longo de praticamente todo o intervalo de comprimento de onda, sendo máxima em aproximadamente  $0,5 \mu\text{m}$ . A interação da radiação solar com as partículas discoidais tende a provocar maiores efeitos de reflexão por apresentar uma superfície plana. Um outro ponto importante é que o aumento do número de partículas discoidais aumenta a probabilidade de existirem outras reflexões que agora ajudarão o espalhamento para o interior do filme, isso justifica o menor valor de reflexão para o maior valor de fração mássica. (Schmitz, 1990)

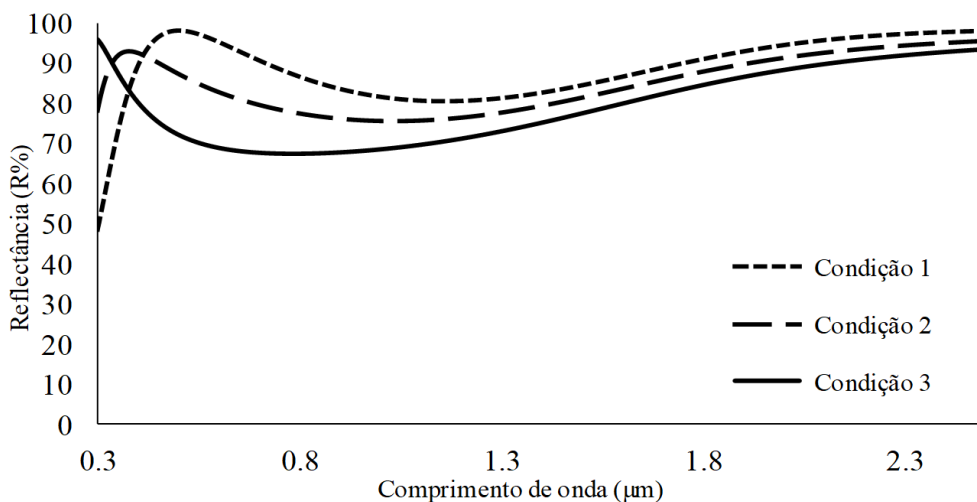


Figura 3- Variação da reflectância em partículas com formato de discos para três diferentes frações volumétricas.

Para as partículas que apresentam formato cilíndrico (Fig. 4), o aumento da fração mássica provocou a redução na reflectância do filme na faixa de  $0,3 \mu\text{m}$  até  $1,5 \mu\text{m}$ . Depois de  $1,8 \mu\text{m}$  o aumento da fração mássica provocou o efeito contrário. a curva para condição 3 apresenta a menor reflectância no intervalo de  $0,3 \mu\text{m}$  até  $1,5 \mu\text{m}$ , que é onde existe apresenta a maior taxa de radiação solar. A curva para a condição 2 pode representar um valor médio de reflectância em relação às outras duas. Partículas cilíndricas apresentam duas superfícies diferentes, a borda arredondada e a plana, dessa forma as interações entre a radiação e as partículas se dá semelhante às esferas e aos discos dependendo da superfície de encontro.

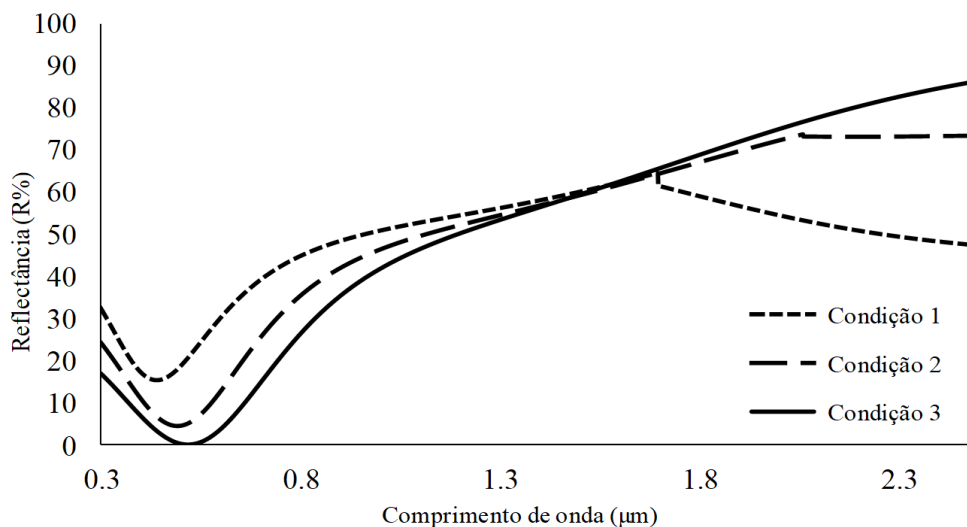


Figura 4- Variação da reflectância em partículas cilíndricas para três diferentes frações volumétricas.

Agora, para avaliar os efeitos da variação da espessura nos filmes, fixando as frações volumétricas das partículas, foram usadas as condições 3, 4 e 5. As Figs. 5, 6 e 7, mostram gráficos com o comportamento do conjunto filme-substrato considerando os três formatos de partículas nas três condições mencionadas.

Observa-se na Fig. 5 que o tamanho do filme fabricado a partir de partículas esféricas altera consideravelmente suas características ópticas. Os filmes fabricados a partir da condição 3 possuem baixa reflectância para baixos comprimentos de onda. A condição 4 mostrou alta reflectância para todo o espectro de radiação analisado. Para a condição 5, observou-se pequenos valores de reflectância para a faixa de  $0,8 \mu\text{m}$  até  $1,3 \mu\text{m}$ .

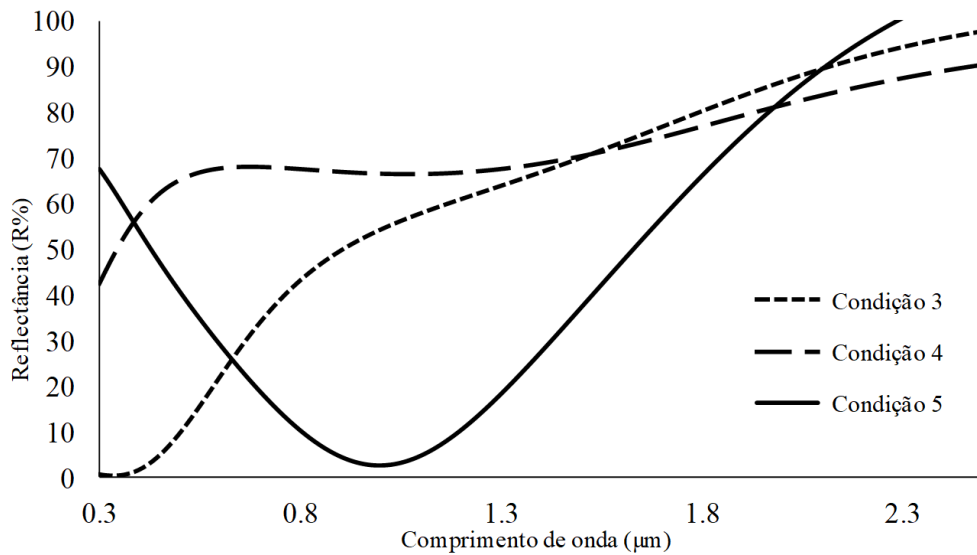


Figura 5- Variação da reflectância em partículas esféricas nas condições 3, 4 e 5 em fração volumétrica constante para diferentes espessuras.

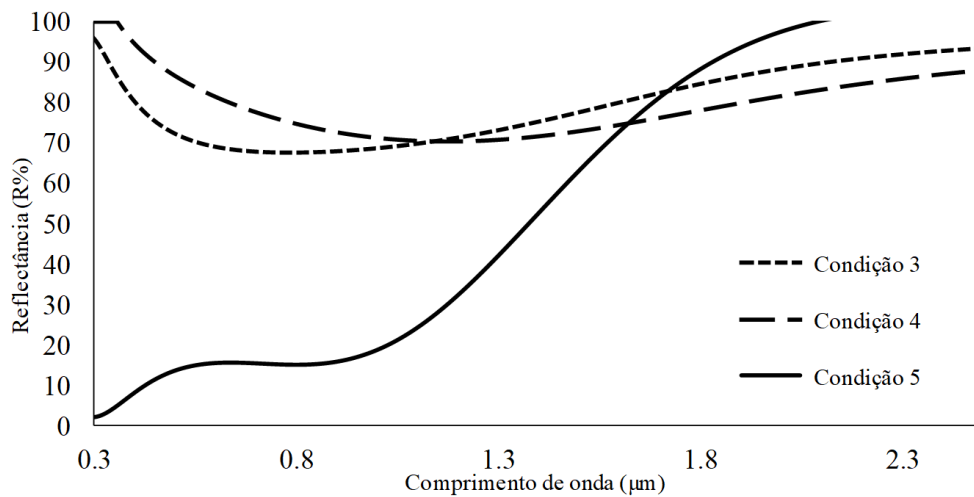


Figura 6- Variação da reflectância em partículas discoidais nas condições 3, 4 e 5 em fração volumétrica constante para diferentes espessuras.

A partir da Fig. 6, observou-se que os valores de reflectância para o intervalo de comprimento de onda da luz visível são elevados para as partículas discoidais, porém, ao aumentar o tamanho do filme a reflectância caiu bruscamente para os menores valores da radiação solar. As curvas das condições 3 e 4 apresentam valores próximos para todo o espectro solar avaliado. As sucessivas reflexões provocadas pelas partículas discoidais são responsáveis por fazer a curva da condição 5 ter baixa reflectância entre  $0,1 \mu\text{m}$  e  $0,2 \mu\text{m}$ .

Na Fig. 7, todas as condições apresentam elevados valores de reflectância em boa parte do espectro de luz estudado, exceto uma pequena porção de  $0,3 \mu\text{m}$  até  $0,5 \mu\text{m}$  para a condição 3 e outra pequena porção de  $0,8 \mu\text{m}$  até  $1,4 \mu\text{m}$  para a condição 5. Nota-se que a reflectância do filme é mínima para os comprimentos de onda na ordem de 10 vezes a espessura.



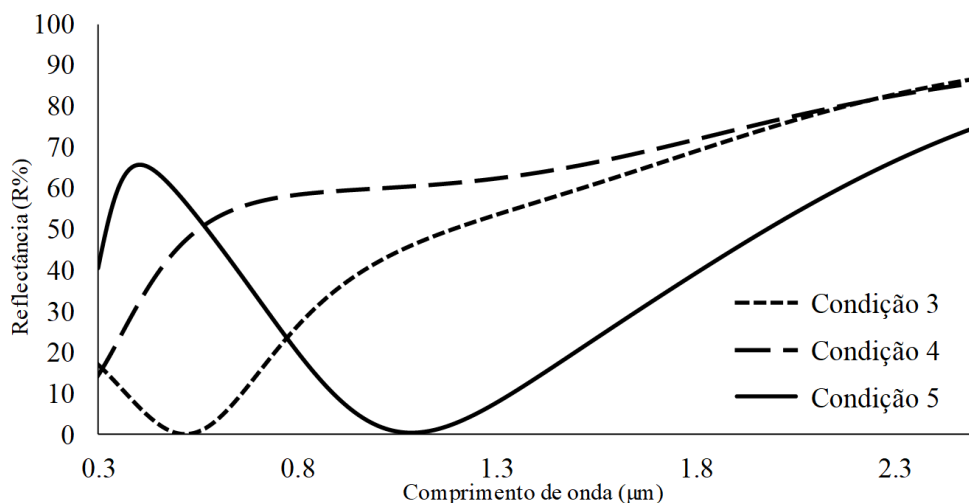


Figura 7- Variação da reflectância em partículas cilíndricas nas condições 3, 4 e 5 em fração volumétrica constante para diferentes espessuras.

Pela análise das condições 3, 4 e 5 para os três tipos de partículas, é possível ver como a variação da espessura pode influenciar na reflectância do filme. Para as partículas esféricas, a condição 3 apresenta os menores valores de reflectância no intervalo da luz visível em relação as condições 4 e 5. Para as partículas discoidais, o aumento da espessura do filme conduz a redução considerável na reflectância do filme no intervalo da luz visível. Nas partículas cilíndricas, nota-se uma redução da reflectância no intervalo de radiação de cerca de 10 vezes a espessura do filme.

## 5. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, pode-se concluir que filmes com as partículas discoidais apresentam elevados valores de reflectância para filmes com espessura menor ou igual a  $0,05 \mu\text{m}$ , sendo relativamente considerado um bom formato para se trabalhar em grandes espessuras ( $0,1 \mu\text{m}$ ). Essa vantagem ocorre, pois, abrange valores de baixa reflectância em um maior intervalo de comprimento de onda ( $0,3 \mu\text{m}$  até  $1,0 \mu\text{m}$ ).

Por outro lado, filmes feitos a partir de partículas esféricas com média espessura ( $0,05 \mu\text{m}$ ) apresentam baixos valores de reflectância para uma menor fração volumétrica (0,2). O aumento da fração volumétrica acarreta um pequeno crescimento da reflectância. O mesmo nas cinco condições ocorre para as partículas com formato cilíndrico, porém os valores de reflectância (em relação às partículas esféricas) são ligeiramente maiores. Essa pequena diferença ocorre devido ao fator de despolarização, que é maior para as partículas cilíndricas.

Finalmente, conclui-se que para superfícies seletivas que apresentam espessura de  $0,05 \mu\text{m}$ , a melhor opção é que ela apresente majoritariamente partículas esféricas. Para filmes mais finos (da ordem de  $0,025 \mu\text{m}$ ) nenhuma das condições estudadas, no tocante a fração volumétrica das partículas, apresentou resultados suficientemente bons para serem recomendado na construção de revestimentos. Já para superfícies seletivas com espessuras mais elevadas (da ordem de  $0,1 \mu\text{m}$ ), as partículas discoidais apresentaram excelentes resultados para se trabalhar com a fração volumétrica de 0,4.

## REFERÊNCIAS

- Bass, M., 1995. Handbook of Optics, 2nd Ed. McGraw-Hill Inc.
- Chakka, V.M., Altuncevahir, B., Jin, Z. Q., Li, Y., Liu, J. P., 2006. Magnetic nanoparticles produced by surfactant-assisted ball milling. Journal of Applied Physics, v. 99.
- Correia, L. B. L, 2018. Análise da viabilidade de um modelo parabólico de condução de calor para o estudo do comportamento térmico de superfícies seletivas. Monografia (Graduação), UFPB/CEAR
- Ehrmann, N., Reineke K. R., 2012. Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors. Thin Solid Films, v. 520, p. 4214-4218.
- Fox, M. 2001. Optical Properties of Solids, 1ª Edição, Oxford University Press, p. 5-7.
- Gao, L., Lemarchand, F., Lequime, M., 2012. Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering. Optics express. 14. v. 20. França.
- Goesbet, G., Yang, P., Onofri, F. 2019,. Afterword. Laser-light and interactions with particles (LIP).Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Volume 225, Pages 45-49.

- Incropera, W. D. P., 1992. Fundamentos da transferência de calor e massa, 3ª Edição. Rio de Janeiro. LTC.
- Karlsson, B., Ribbing, C.G., Roos, A., Valkonen, E., Karlsson, T., 1982. Optical Properties of Some Metal Oxides in Solar Absorbers, Department of Solid State Physics, Institute of Technology, Uppsala University, Box 534, S-75 1 21 Uppsala, Suécia; 11 de março.
- Kennedy, C. E., 2002. Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials, NREL/TP-520-31267, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, Julho.
- Kenneth S. S., 1990. Dynamic Light Scattering by Macromolecules. Academic Press, 1st Ed., Inc.
- Kokoropoulos, P., Salam, E., Daniels, F., 1959. Selective Radiation Coatings. Preparation and high temperature stability. Solar Energy, v. 03, p. 19-23.
- Rakic, A. D., Djurisic, A. B., Elazer, J. M., Majewski, M. L., 1998. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices, Appl. Opt. 37.
- Sani, E., Mercatelli, L., Janfrancesco, D., Sans, J. L., Sciti, D., 2012. Ultra-High Temperature Ceramics for solar receivers: spectral and high-temperature emittance characterization. Journal of The European Optical Society-Rapid Publications, v. 7, article number 12052.
- Scheller, M., Jansen, C., Koch, M., 2010. Applications of Effective Medium Theories in the Terahertz Regime, Institute for High-Frequency Technology, Technische Universität Braunschweig Schleinitzstr, 01, January.
- Selvakumar, N., Barshilia, H.C., 2012. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications. Solar Energy Materials Solar Cells, v. 98, p. 1-23,.
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R., 2012. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1ª Edição. São Paulo. Editora Érica.
- Weiss, W., Rommel, M., 2008. Process Heat Collectors: State-of-the-Art Within Task 33/IV, IEA SHC-Task 33 and Solar PACES-Task IV: Solar Heat for Industrial Processes.

## EFFECT OF FORMAT AND CONTENT OF CHROME PARTICLES ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF Cr-SiO<sub>2</sub> SELECTIVE SURFACES

**Abstract.** *The simplest way to convert the solar energy is by the thermal conversion. Heat exchangers called solar collectors are used for this. Generally, solar collectors have surface coatings capable of "selecting" the incident radiation with the intention of absorbing more radiation or reducing losses in this process. These coatings are commonly known as selective surfaces. In this context, this work intends to investigate the influence of surface selectivity morphology on their absorptive optical properties with the aid of the effective medium model of Polder and Van Santen, which allows the calculation of the effective relative permittivity of a medium containing particles of different shapes in its interior (discoid, spherical and cylindrical). This model is applicable to selective surfaces composed of a ceramic matrix containing metallic particles inside, also known as CERMETS. With the aid of the MATLAB software and the optical equations of solid state physics, the optical behavior (reflectance) of the selective surface on a given substrate was simulated in five control conditions, where the thickness of the coating and the volumetric fraction of the contained metal were varied. At the end of the work it was concluded, for selective surfaces that have a thickness of 0.05µm) the best option is the one with mostly spherical particles. For thinner films (on the order of 0.025µm)) none of the conditions studied, regarding the volume fraction of the particles, presented good enough results to be recommended in the construction of coatings. However, for selective surfaces with higher thicknesses (on the order of 0.1µm), the discoid particles presented excellent results to work with the 0.4 volumetric fraction.*

**Key-words:** *Solar collectors, Selective surfaces, CERMET.*