

ESTUDO COMPARATIVO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS PARA COLETORES SOLARES

Vieira, Maria Eugênia

Laboratório de Energia Solar Aplicada, Centro de Tecnologia, Bloco 714, Universidade Federal do Ceará
CEP 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brasil – E-mail: eugenia@les.ufc.br

Schwarzer, Klemens

Ingenieurbüro für Energie – Und Umwelttechnik Tuchbleiche 12, Jülich, Alemanha

Gomes, Carlos Antonio Silva

Laboratório de Energia Solar Aplicada, Centro de Tecnologia, Bloco 714, Universidade Federal do Ceará
CEP 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brasil – E-mail: c-gomes@bol.com.br

Alves, Regio Davis Barros

Laboratório de Energia Solar Aplicada, Centro de Tecnologia, Bloco 714, Universidade Federal do Ceará
EP 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brasil – E-mail: solar09@les.ufc.br

Resumo. *Este trabalho apresenta um estudo comparativo de superfícies seletivas para coletores solares utilizadas nos maiores centros que utilizam energias renováveis. São apresentadas as medições experimentais da temperatura em placas absorvedoras e da radiação solar global e direta incidente sobre as placas em função do tempo. As amostras foram testadas nas condições ambientais de Fortaleza. Os valores experimentais foram usados na determinação da emissividades, após a realização de um balanço de energia em regime permanente nessas amostras. As temperaturas de estagnação nas amostras foram também calculadas mostrando o desempenho desses materiais. São também apresentadas as análises microscópicas (microscópico eletrônico de varredura) das diferentes superfícies. Os resultados mostram claramente o desempenho das amostras quando expostas à radiação solar e que o procedimento desenvolvido para esse trabalho pode ser utilizado na determinação de um valor médio para a emissividade solar a partir de medições mais simples.*

Palavras Chave: *Coletores Solares, emissividade, Radiação Solar*

1. INTRODUÇÃO

Em aplicações práticas de energia solar ativa e passiva, ou para outros fins construtivos, o revestimento superficial do material que absorve a radiação solar tem um papel importante no que concerne à absorção de radiação solar e à emissão de radiação térmica, influenciando diretamente na relação custo-benefício do equipamento. Revestimentos superficiais para as placas absorvedoras da radiação solar, ou superfícies seletivas, alteram as relações de ganho e perda de energia do equipamento e, por isso, o desempenho dos diferentes revestimentos disponíveis, seus tipos e custos, além de áreas potenciais de aplicação devem ser conhecidos.

Embora superfícies seletivas sejam utilizadas pelos fabricantes de coletores solares em vários países, o mesmo ainda não ocorre no Brasil. Empresas nacionais de coletores solares planos, têm mostrado interesse na utilização dessas superfícies, visto que, além de poder aumentar a eficiência dos seus equipamentos, esses revestimentos possibilitam uma temperatura mais elevada na saída no equipamento, aumentando assim o horizonte de novas aplicações.

Quando placas absorvedoras são pintadas com tinta preta fosca, de alta absorvidade no comprimento de onda da radiação incidente, tem-se por objetivo aumentar a coleta de radiação solar (Para as superfícies cinzentas e difusas, a absorvidade e a emissividade direcional espectral e a total hemisférica possuem os mesmos valores Lei de Kirchoff). As tintas pretas foscas com alta absorvidade, possuem também alta emissividade, provocando alta perda por radiação térmica para o ambiente. O propósito da utilização do revestimento seletivo está em diminuir sensivelmente a emissão de radiação térmica, embora ocorra paralelamente uma pequena diminuição na absorvidade do material, mas de forma que, o ganho líquido de energia seja aumentado. A Figura 1 apresenta um desenho em perspectiva de um coletor solar.

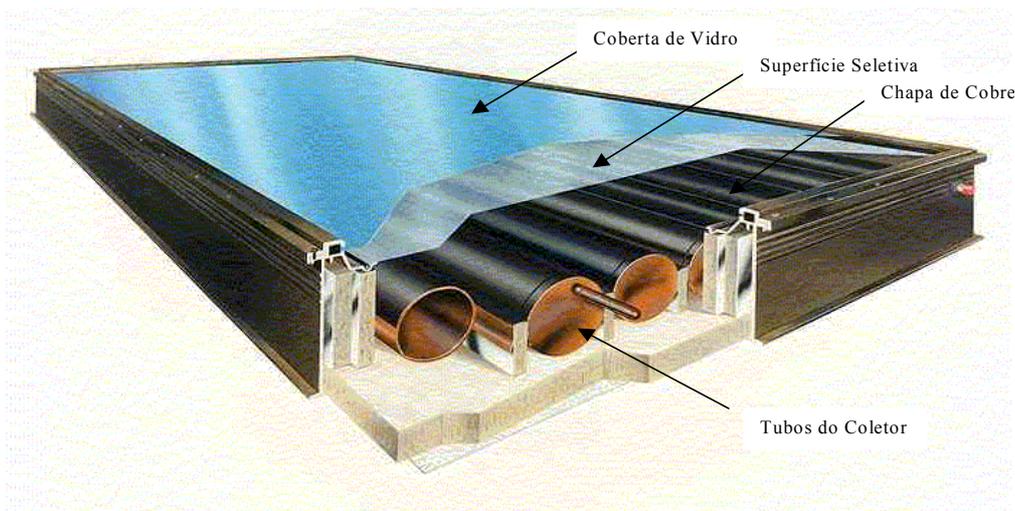


Figura 1. Esquema em perspectiva de um coletor solar com superfície seletiva.

O coletor solar de placa plana é um tipo especial de trocador de calor que transforma a radiação solar em energia térmica.

Em geral, coletores de placa plana sem superfícies seletivas operam em temperaturas menores que 100°C , sendo utilizados nos processos de aquecimento de água, de secagem, etc. Existem aplicações práticas como em fogões solares, sistemas de refrigeração, dessalinizadores solares onde são necessárias temperaturas mais elevadas, tornando essencial o uso de superfícies seletivas.

As superfícies absorvedoras devem exibir seletividade óptica, que variam em função do comprimento de onda e da direção da radiação incidente. No campo da energia solar, a superfície seletiva deve ter alta absortividade na região do visível ($0.2 < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$) e da região do infravermelho próximo ($0.7 < \lambda < 3.0 \mu\text{m}$). Para alta eficiência os coletores solares eles devem possuir máxima de absortividade no espectro solar enquanto mantém um mínimo de emissividade no infravermelho, ou seja, em temperaturas entre $80\text{-}130^{\circ}\text{C}$ e $\lambda > 3,0 \mu\text{m}$ [1].

O objetivo deste trabalho é a realização de um estudo comparativo entre as diferentes superfícies seletivas utilizadas. A realização desse estudo do desempenho térmico nas condições ambientais de Fortaleza auxilia na escolha dos materiais e suas aplicações futuras.

2. METODOLOGIA

2.1 SELEÇÃO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS

A seleção das amostras das superfícies seletivas utilizadas foi definida pela sua utilização no mercado mundial. Para se evitar a utilização do nome comercial do produto, a relação abaixo foi utilizada.

➤ Material A

Tinta comum preta, composta por vários de óxidos e um composto Carbônico como base;

➤ Material B

O material base é o óxido de Crômio e o óxido de Antimônio é o material secundário.

➤ Material C

Óxido de Crômio

➤ Material D

Tinta seletiva composta por uma mistura de óxidos de Manganês, Ferro e Silício.

➤ Material E

Tinta semi-seletiva a base de Carbono.

➤ Material F

Óxido de Titânio.

2.2 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO

Os trabalhos experimentais necessários foram realizados no Laboratório de Energia Solar Aplicada e na Oficina Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará. Foi desenvolvido um aparato experimental para medição das temperaturas das placas quando expostas à radiação solar global.

As amostras A, D e E, foram aplicadas no Laboratório, seguindo os seguintes procedimentos:

1. Abrasão da superfície da folha de cobre com uma lixa 400 e uma posterior de 600;
2. Desengorduramento da superfície com ácido nítrico de baixa concentração;
3. Aplicação da tinta com o uso de Spray a uma pressão de 30p.s.i
4. Secagem e Cura da tinta à temperatura ambiente em um intervalo de 1hora;

As demais superfícies B, C e F foram conseguidas aplicadas na folha de cobre, os métodos de fabricação destas são diversos, dentre eles eletrolgalvanização e sputtering.

O aparato é composto de cavidades nas quais as placas com superfícies seletivas de 12cmx12cm foram colocadas, com cobertura de vidro, isolamento térmico, sistema construído de alvenaria, termopares, piranômetros de radiação global, sistema de inclinação para acompanhamento da direção da radiação solar direta e um data-logger para coleta dos dados fixados a cada minuto, como mostra a Figura 2.

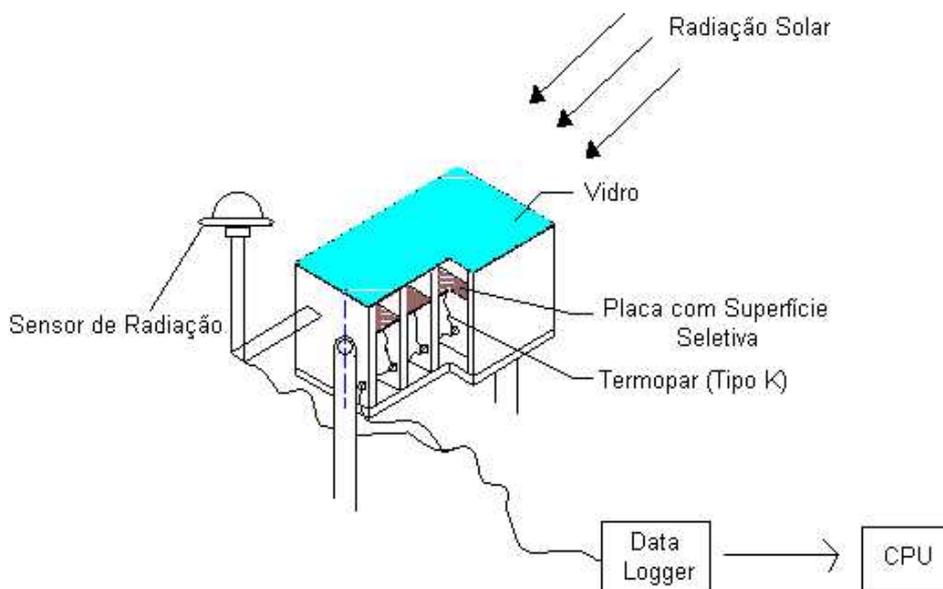


Figura 2. Dispositivo para Avaliação das Superfícies Seletivas

2.3 APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO ANALÍTICO PARA O CÁLCULO DAS EMISSIVIDADES EM FUNÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS.

O modelo analítico está baseado nas equações de conservação de energia entre a placa e o vidro, e a placa e o ambiente, tendo como primordial as medições de radiação global inclinada e as temperaturas da placa e do vidro.

A expressão da energia que chega na placa por radiação solar, Q_R , é a seguinte:

$$\dot{Q}_R = \tau_V \alpha_P R_{SOL} A_P \quad (1)$$

onde τ_V , α_P , R_{sol} , e A_P são respectivamente a transmissividade do vidro, a absorvidade da placa, o fluxo de radiação solar global e a área da placa. Para calcular a energia que sai da placa, é necessário o conhecimento das maneiras pelas quais a placa troca calor com o ambiente e o vidro.

A placa troca calor com o vidro por convecção, Q_C , pela razão das diferenças de temperatura, através da equação:

$$\dot{Q}_C = h_{CONV} A_P (T_P - T_V) \quad (2)$$

onde h_{conv} , T_P , T_V , são respectivamente o coeficiente de convecção e as temperaturas da placa e do vidro.

A energia perdida por reflexão por unidade de tempo, Q_{Rf} , é o resultado da reflexão na superfície da placa, e é expressada pela equação(3):

$$\dot{Q}_{Rf} = (1 - \alpha_p) R_{SOL} A_P \quad (3)$$

A energia perdida pelas faces lateral e inferior da placa absorvedora ocorre através do isolamento térmico por condução. Essa perda de energia é proporcional à área da placa, à condutividade térmica e ao inverso da espessura do isolamento, podendo ser expressa por:

$$\dot{Q} = \frac{\kappa}{L} A_P (T_P - T_b) \quad (4)$$

Para finalizar, temos a energia perdida por radiação da placa para o meio ambiente, Equação(5), na qual estamos interessados em calcular a emissividade de cada superfície seletiva.

$$\dot{Q}_P = \varepsilon_p A_P \sigma (T_P^4 - T_{AMB}^4) \quad (5)$$

onde ε_p , σ , e T_{amb} , são respectivamente, a emissividade da placa, a constante de Stefan-Boltzmann, e a temperatura ambiente. Como a radiação da placa “se perde no espaço”, é tradicional utilizar a “temperatura efetiva do céu” ao invés da temperatura ambiente[9], Equação(6).

$$T_{céu} = 0.0552 T_{AMB}^{1.5} \quad (6)$$

A equação que descreve todo o balanço de energia, Equação (7), onde se considera que as placas estão no estado permanente quando havia pouca variação na sua temperatura.

$$\tau_V \alpha_p R_{SOL} A_P = \varepsilon_p A_P \sigma (T_P^4 - T_{céu}^4) + h_{CONV} A_P (T_P - T_V) + (1 - \alpha_p) R_{SOL} A_P + \frac{\kappa}{L} A_P (T_P - T_b) \quad (7)$$

2.4 SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DE ESTAGNAÇÃO DE UM COLETOR SOLAR EM FUNÇÃO DOS VALORES DAS EMISSIVIDADES ENCONTRADAS.

O coletor solar utilizado neste cálculo foi um coletor de 4m2 utilizado no sistema fogão solar, então se deseja calcular a temperatura de estagnação, ou seja, temperatura alcançada quando a vazão de fluido no coletor é praticamente zero, sendo está temperatura a máxima atingida no coletor. A equação (8) descreve como se calcula a temperatura de estagnação.

$$T_{stag}(t) = T_a(t) + \frac{(\tau\alpha)_{eff} A_c q_s(t)}{U_L A_e} \quad (8)$$

onde T_a , τ , α , q_s , U_L , A_c e A_e , são respectivamente a temperatura ambiente, a transmissividade do vidro, a absorvidade da placa, a radiação solar média, o coeficiente de perda total no coletor, e as áreas do coletor e efetiva.

Para calcular o coeficiente de perda total no coletor, é necessário a calcular o U_t [2] perda de topo, U_b , perda para o isolamento de fundo e U_e , perda para o isolamento lateral. A equação para o cálculo das perdas de topo foi desenvolvida por Klein [5], para a placa do coletor operando entre $40 < T_e < 130^\circ C$.

2.5 ANALISAR A ESTRUTURA MICROSCÓPICA DESSAS SUPERFÍCIES

Paralelamente aos testes de campo, foram realizadas verificações e caracterização da superfície seletiva de natureza microscópica, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (Modelo XR-30 – PHILIPS).

As diferentes superfícies foram aplicadas em chapas metálicas para estudo de sua microestrutura e da sua forma superficial, como também Análises de Raio-X foram realizadas, com o intuito de sabermos a composição exata da camada seletiva.

3. RESULTADOS

A Figura 3 apresenta o gráfico das temperaturas das placas e do vidro do dia 14 de fevereiro de 2001, neste gráfico é observado que o material F obteve o melhor resultado de aquecimento.

Os resultados de emissividades das placas absorvedoras, apresentados na tab.1 foram encontrados através das medições de temperatura das placas, do vidro e do ambiente, e de medições do fluxo de radiação solar global e aplicação na Eq.(6).

No intervalo até 10:51 h, observa-se o comportamento transiente em todas as placas. De 10:51 h à 15:57 h, o regime permanente pode ser observado no gráfico, tendo sido utilizado nas determinações numéricas.

Os valores de temperatura e radiação foram coletados a cada dois segundos e armazenados a cada minuto no coletor de dados, e posteriormente transferidos para o computador para serem filtrados e analisados.

Observou-se que o material F apresentou a maior temperatura ao longo do dia, 130°C, enquanto o material A apresentou o menor valor, 97°C.

Esses dados medidos foram usados na Eq.(7) (equação do balanço de energia) para a determinação da emissividade média de cada material. A absorvidade das placas foi considerada ser um valor médio de 0,90.

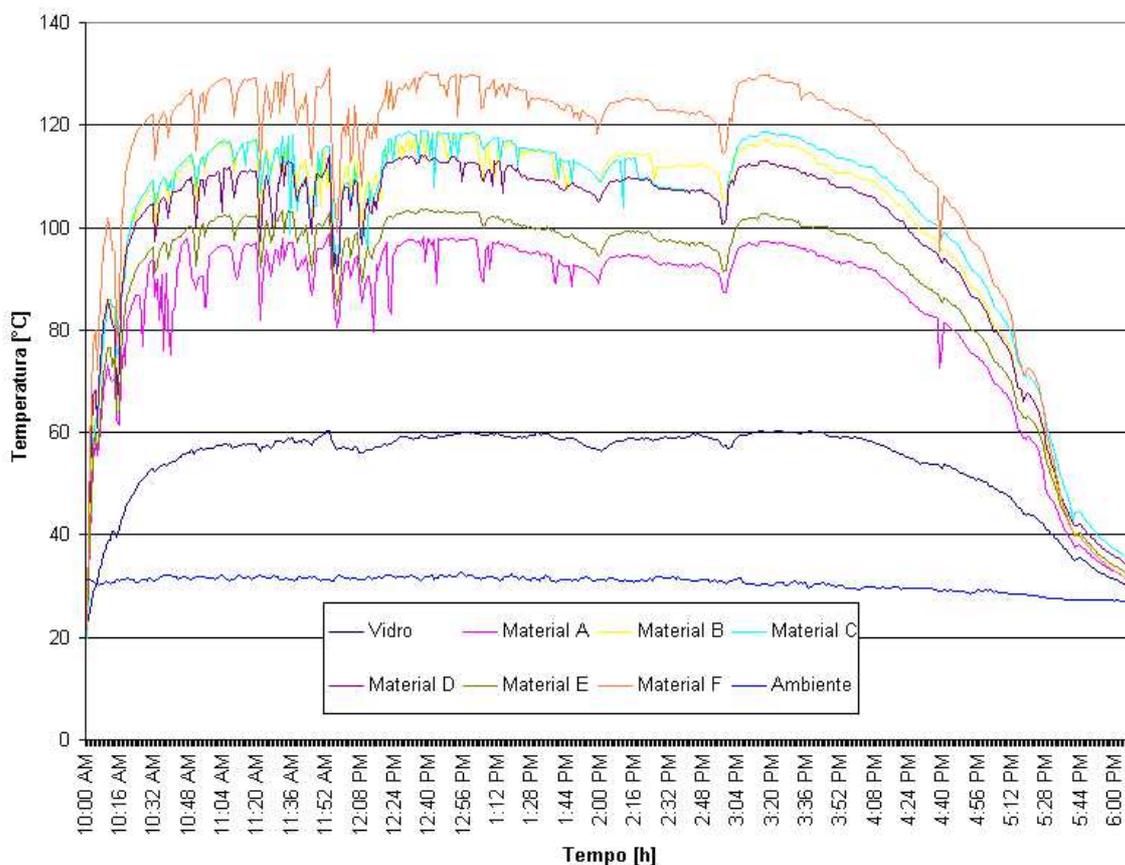


Figura 2. Gráfico das temperaturas das placas e do vidro e do ambiente em função do tempo do dia 14.02.2001.

Tabela1. Valores de emissividades das Superfícies Seletivas.

Superfícies	A	B	C	D	E	F
Emissividades	0,3	0,12	0,11	0,14	0,22	0,05

Com esses valores de emissividades foi possível simular uma temperatura de estagnação para um coletor solar em certas condições ambientais. Os valores do coeficiente de perda global, e da temperatura de estagnação foram calculados para um coletor de 4m² de área efetiva nas condições de temperatura do ambiente em 40°C, e temperatura da placa de 100°C e velocidade do vento de 2m/s, são mostrados na Tabela2.

Tabela2. Valores do Coeficiente de Perda total e da Temperatura de Estagnação.

Superfícies	A	B	C	D	E	F
Coeficiente de Perda total UI [W/m².°C]	5,59	4,48	4,40	4,62	5,13	3,96
Temperatura de Estagnação[°C]	145,6	171,8	174,2	167,8	155,1	189,0

Foram realizados EDX (Energy Dispersive X-Ray) para todas as amostras. Um exemplo está mostrado na Figura 4, EDX do Material B.

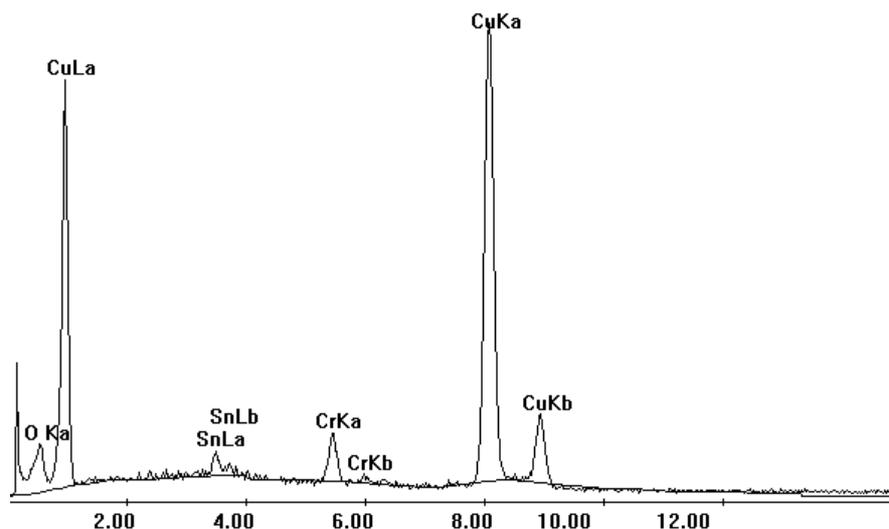


Figura 4..EDX do material B

Com os resultados de EDX encontrados, observou-se que:

- O Material A apresenta vários constituintes na sua composição, mas o material base é o carbono e alguns óxidos de alguns elementos.
- O Material B é constituído a base de óxido de crômio, semiconductor, responsável pela absorção, e uma cobertura óxido de antimônio, responsável pela característica de anti-reflexão.
- O Material C é constituído a base de óxido de crômio, semiconductor, com traços de níquel e ferro resultantes do processo de fabricação.
- Material D é constituída de uma mistura de óxidos de manganês, ferro, e de silício, responsáveis por suas propriedades ópticas, e com um solvente a base de carbono.
- Material E é a base de carbono, cujo solvente também é a base de carbono, com traços de titânio e tálio.
- Material F, é constituído de óxido de titânio, um semiconductor, responsável pela sua alta absorvidade e baixa emissividade.

5. CONCLUSÕES

O procedimento desenvolvido para a determinação da emissividade térmica das superfícies seletivas foi adequado. Para as superfícies cujos fabricantes apresentam os valores, os resultados apresentados na tab.(1) são aproximados mesmo partindo de medições de temperatura e radiação, ou seja, medições simples que tornou o custo de montagem do sistema pequeno, se comparado ao custo de compra de um equipamento específico.

Para as superfícies cujos fabricantes não apresentam esses valores, o valor encontrado pode ser considerado como referência para trabalhos futuros.

A determinação da temperatura de estagnação possibilita a definição no uso apropriado dos materiais de fabricação, pois em certas aplicações, como fogões solares, dessalinizadores, etc, são necessárias temperaturas elevadas para se obter uma boa eficiência, e em outros casos a necessidade são temperaturas somente para o aquecimento d'água.

Os resultados apresentados no MEV (microscópio eletrônico de varredura), através da sonda EDX (Energy Dispersive X-Ray) mostram que as superfícies constam de elementos químicos, ou a combinação deles, com propriedades para absorver e diminuir a reflexão da radiação solar quando utilizados na manufatura de superfícies seletivas.

6. AGRADECIMENTOS

À FUNCAP pelo apoio financeiro.

Ao Prof^o Klemens Schwaezer pela colaboração ao experimento.

7. REFERÊNCIAS

- Agnihotri, O. P. & Gupta, B. K., 1981, Solar Selective Surfaces. Wiley Interscience.
- Duffie, J. A. & Beckman, W.A., 1980, Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons.
- Incropera, F.P. & Dewitt, D.P., 1992, Fundamentos de transferência de calor e de massa. 3. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Hollands, K. G. T., T.E. Unny, G.D. Raithby, and L. Konicek, 1976., *Transactions of the american society of Mechanical Engineers, Journal of Heat Transfer*, **98**, 189-193. “Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers.”
- Klein, S.A, 1975, *Calculation of Flat-Plate loss Coefficients*, Solar Energy, 17, 79.
- Ladener, H. & Spate, F., 1999, Solaranlagen: Handbuch der thermischen Salarerergienutzung. Okobuch.
- McAdams, W.H., 1954, *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York
- Schwarzer, K., 2001, Comunicação Pessoal.
- Swinbank, W.C., 1963, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **89**. “Long-Wave Radiation From Clear Skies.”

COMPARATIVE STUDY OF SELECTIVE SURFACES FOR SOLAR COLLECTORS

Vieira, Maria Eugênia

Laboratório de Energia Solar Aplicada, Centro de Tecnologia, Bloco 714, Universidade Federal do Ceará
CEP 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brasil – E-mail: eugenia@les.ufc.br

Schwarzer, Klemens

Ingenieurbüro für Energie – Und Umwelttechnik Tuchbleiche 12, Jülich, Alemanha

Gomes, Carlos Antonio Silva

Laboratório de Energia Solar Aplicada, Centro de Tecnologia, Bloco 714, Universidade Federal do Ceará
CEP 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brasil – E-mail: c-gomes@bol.com.br

Alves, Regio Davis Barros

Laboratório de Energia Solar Aplicada, Centro de Tecnologia, Bloco 714, Universidade Federal do Ceará
EP 60455-760 Fortaleza, Ceará, Brasil – E-mail: solar09@les.ufc.br

Abstract. *This work presents a comparative study of selective surfaces for solar collectors that are used in the centers with greater utilization of renewable energy. Temperature measurements and global and direct solar fluxes in the absorber plates as a function of time are presented. The samples were tested under the ambient conditions found in Fortaleza. The experimental values were used to determine the emissivity, after steady state energy balance were performed in the samples. The stagnation temperatures were also calculated and show the behavior of the samples. Microscopic analyses were also made (scanning microscopic electronic) for each sample. The results clearly show the sample performances when exposed to solar radiation and that the procedure developed in this work can be used to determine an average value for the solar emissivity from simpler measurements.*

Keywords: Solar Collectors, emissivity, Solar Radiation