

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SAMUEL GUERRA VIEIRA

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UMA NOVA SUPERFÍCIE
SELETIVA PARA COLETORES SOLARES TÉRMICOS

FORTALEZA

2011

SAMUEL GUERRA VIEIRA

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UMA NOVA SUPERFÍCIE
SELETIVA PARA COLETORES SOLARES TÉRMICOS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo de Aguiar Freire

FORTALEZA

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós Graduação em Engenharia

V718o Vieira, Samuel Guerra.

Obtenção, caracterização e aplicação de uma nova superfície seletiva para coletores solares térmicos / Samuel Guerra Vieira. – 2011.

77 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2011.

Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo de Aguiar Freire.

1. Engenharia Mecânica. 2. Materiais. 3. Energia Solar. I. Título.

CDD 620.1

SAMUEL GUERRA VIEIRA

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UMA NOVA SUPERFÍCIE
SELETIVA PARA COLETORES SOLARES TÉRMICOS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de concentração em Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Nivaldo de Aguiar Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profª. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida (Co-Orientadora)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profª. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra
Universidade Federal do Ceará - UFC

À minha família, meu pai (*in memoriam*), minha adorada mãe e minha querida tia Sula que sempre esteve por perto nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

A Deus e toda à minha família, pelo apoio e ensinamentos.

Ao professor Francisco Nivaldo de Aguiar Freire pela orientação segura e dedicação.

À professora Maria Eugênia Vieira da Silva, por sua dedicação, preocupação e competência durante a realização deste trabalho.

Ao Anderson Rodrigues, ao Danilo Rocha, à Maria Elieneide e ao Erielson Barbosa.

Aos alunos da graduação, Francisco Elmo, Akio, Murilo e todos os demais que já passaram um período junto à equipe do LESGN, e que de algum modo contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas bolsistas do LAFFER

Ao CNPq, pela concessão de bolsa e apoio financeiro.

Aos professores do programa de pós-graduação William Barcelos, Paulo Alexandre, Francisco Ilson, Fabíola Leite e aos demais que de várias formas contribuíram com o trabalho.

Enfim, sou grato a todas as pessoas, que porventura não estejam citadas aqui e que, de forma direta ou indireta, tenham contribuído para a concretização deste trabalho.

RESUMO

O estudo de superfícies seletivas para coletores solares térmicos, há alguns anos, enfoca o uso de pastas e tintas para recobrir chapas de cobre ou alumínio, formando a placa absorvedora do coletor. Essas tintas ou pastas são eletrodepositadas em placas metálicas, sendo este processo muitas vezes responsável pelo elevado custo de superfícies seletivas. O uso de compósitos obtidos a partir do óxido de cromo, óxido de ferro e óxido de titânio em um processo cerâmico, utilizando a técnica de deposição por *screen-printing* pode ser uma alternativa para a obtenção de novas superfícies seletivas que tenham eficiência próxima às tintas e pastas já comercializadas e com baixo custo de fabricação. O objetivo deste trabalho é obter e caracterizar superfícies seletivas à base de cromo, ferro e titânio e compará-las com outras superfícies já comercializadas (óxidos metálicos), encontrar os valores da absorvidade e caracterizar as mesmas por espectroscopia raman e infravermelho.

Palavras-chave: coletor placa plana, superfície seletiva, absorvidade, emissividade.

ABSTRACT

The study of selective coating for thermal solar collectors has been carried out with focus on the use of selective paints and coatings for copper and aluminum plates, which are used to manufacture the absorber plate. The processes, such as electrodeposition, used in these paints and coatings are expensive and they increasing the price of the final product. The use of composite obtained from chromium oxide, iron oxide, and titanium oxide in a ceramic process using the screen-printing deposition technique is an alternative to develop new selective coating with approximately the same thermal efficiency, but at a lower cost than the commercial ones. The results show that the absorptivity values measured with the new coatings are close to those presented by the manufacturers in the commercial surfaces. The objective is to obtain and characterize selective surfaces based on chromium, iron and titanium and compares them to other areas already marketed (metal oxides), find the values of absorptivity and characterize them by raman and infrared spectroscopy.

Keywords: Flat plate collector, selective surface, absorptivity and emissivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Superfície corrugada em V (CUOMO, 1975).....	10
Figura 2 - Corte esquemático do obsorvedor seletivo: (1) camadas anti-refletoras; (2) absorvedor de silício; (3) barreira de difusão; (4) metal refletor; (5) substrato de aço inox (SERAPHIN, 1974).....	11
Figura 3-Espectro da Radiação Eletromagnética.....	15
Figura 4 - Programação do forno.....	19
Figura 5 - Superfície de FCTO depositada sobre cobre e lixada.....	20
Figura 6 - Fotografia do coletor.....	21
Figura 7 - Desenho esquemático do coletor (medidas em milímetro).....	21
Figura 8 - Termopares instalados na superfície de cobre.....	22
Figura 9 - Representação do balanço de energia no aparato experimental.	23
Figura 10 - IR dos óxidos precursores dos compostos.....	29
Figura 11- Infravermelho do CRFO.....	30
Figura 12 - Infravermelho da mistura CRFO/FCTO.....	30
Figura 13 - Infravermelho do FCTO.....	31
Figura 14 - Raman do FCTO.....	31
Figura 15 - Raman do CRFO.....	32
Figura 16 - Raman da mistura CRFO/FCTO.....	32
Figura 17-Transmitância do vidro.....	33
Figura- 18 Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 09/03/2010.....	34
Figura 19- Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 10/03/2010.....	34
Figura 20- Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 11/03/2010.....	35
Figura 21 - Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 18/11/2010.....	37
Figura 22 - Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 15/10/2010.....	38
Figura 23 - Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 24/09/2010.....	39

Figura 24- Ângulos para posicionamento do sol.....	46
Figura 25 - Piranômetro para medir radiação global.....	47
Figura 26 - Piroheliômetro para medir radiação direta.....	47
Figura 27 - Tipos de coletores de placa plana (SOLAR TÉRMICO, 2004)	49
Figura 28 - Tubo coletor evacuado (SOLAR TÉRMICO, 2004).....	50
Figura 29 – Concentrador solar (SOLAR TÉRMICO, 2004)	51
Figura 30 – A = Chapa Cobre: $\alpha = 5\%$; B = Preto-baço: $\alpha = 15\%$; C = Revestimento seletivo: $\alpha = 85\%$; D = TiNOx: $\alpha = 95\%$ (SOLAR TÉRMICO, 2004)	52
Figura 31- Absorvedor de alumínio roll-ond (SOLAR TÉRMICO, 2004).....	52
Figura 32- Faixa absorvedora de alumínio com tubos de cobre prensados (SOLAR TÉRMICO, 2004)	52
Figura 33- Absorvedor com sistema de tubos prensados entre duas chapas (SOLAR TÉRMICO, 2004)	52
Figura 34- Absorvedor com um sistema de tubos soldados numa chapa de metal (SOLAR TÉRMICO, 2004).....	53
Figura 35 - Absorvedor de aço inoxidável no qual o fluido de trabalho passa através de toda a superfície (SOLAR TÉRMICO, 2004)	53
Figura 36 - Ângulos sólidos subtendido por dA_n em um ponto dA_1 em coordenadas esféricas(INCOPERA e DEWIT, 2003)	54
Figura 37 - Distribuição espectral da radiação de um corpo negro (INCROPERA e DEWITT, 2003).....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m^2]
c_p	Calor específico [$J/kg^{\circ}C$]
g	Gravidade [m/s^2]
G_T	Irradiação total [W]
\bar{h}	Coefficiente de transferência de calor [W/m^2K]
I	Taxa de radiação [W]
\dot{j}	Fluxo de massa [$kg/s \cdot m^2$]
k	Condutividade Térmica [W/m^2K]
L	Comprimento característico [m]
m	Massa [kg]
Q	Calor [kJ]
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor [W]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
T_p	Temperatura da placa [$^{\circ}C$]
T_{∞}	Temperatura da vizinhança [$^{\circ}C$]
U	Coefficiente de perda de calor [W/m^2K]
X	Comprimento Linear [m]
K_1	Coefficiente de perdas no coletor [W/m^2K]

α	Absortividade / difusividade térmica / azimute do coletor
β	Coefficiente de expansão térmica / inclinação do coletor
ε	Emissividade
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica [kg/m ³]
σ	Constante de Stefan Boltzmann [W/m ² K ⁴]
τ	Transmissividade
γ_s	Ângulo de elevação solar
α_s	Azimute solar
λ	Comprimento de onda [nm]
ν	Frequência
c	Velocidade da luz [m/s]
c_0	Velocidade da luz no vácuo [m/s]

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados na preparação dos compostos	17
Tabela 2 - Temperatura de calcinação e tempo tratamento térmico.....	17
Tabela 3 - Valores médios da absorvidade do CRFO e do FCTO	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
3.1	Superfície Seletiva	6
3.1.1	Cobertura Seletiva	7
3.1.1.1	Transparência na Banda Solar e Absorção na Banda de Emissão	7
3.1.1.2	Transparência na Banda Solar e Reflexão na Banda de Emissão	8
3.1.2	Seletividade na Superfície Absorvedora	8
3.1.2.1	Seletividade Direcional ou Armadilha Óptica	9
3.1.2.2	Superfície Seletiva Obtida por Rugosidade	10
3.1.2.3	Superfície Obtida por Interferência de Camadas	11
3.1.2.4	Absorção na Banda de Radiação Solar e Transparência na Banda de Emissão, Depositados em Substrato Refletor	12
3.1.2.5	Transparência na Banda de Radiação Solar e Reflexão na Banda de Emissão, Depositados sobre Substrato Absorvente	12
3.1.2.6	Efeito de Tamanho Quântico	13
3.2	Radiação Térmica	13
3.2.1	Espectro da Radiação Eletromagnética	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1	Preparações da Superfície	16
4.1.1	Preparação dos Compostos (CRFO e FCTO)	16
4.1.2	Superfície Absorvedora	17
4.1.2.1	Materiais Utilizados	17
4.1.2.2	Procedimentos para Obtenção das Superfícies CRFO e FCTO	18
4.2	Aparato Experimental para Teste de Campo	20
4.3	Instalação dos Termopares	22

4.4	Coleta de Dados	23
4.5	Balanço de Energia	23
4.6	Infravermelho e Raman.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
6	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	ANEXO - A	45
A. 1	Radiação Solar	45
A. 2	Coletores Solares Térmicos	48
A. 2.1	Coletor de Placa Plana	48
A. 2.2	Coletor de Tubo Evacuado	49
A. 2.3	Concentrador Solar	50
A. 3	Placa Absorvedora para Coletores Solares	51
A. 4	Intensidade da Radiação	53
A. 5	Radiação do Corpo Negro	54
A. 6	Lei de Planck e Lei do Deslocamento de Wein.....	55
A. 7	Equação de Stefan-Boltzmann.....	56
A. 8	Propriedades Radiantes de Superfícies	57
A. 8.1	Emissividade.....	57
A. 8.2	Absortividade.....	59
A. 8.3	Refletividade.....	60
A. 8.4	Transmissividade	62
A. 9	Lei de Kirchhoff	62
A. 10	Relação entre Absortividade, Emissividade e Refletividade.....	63

1 INTRODUÇÃO

A história da humanidade tem sido também, como se sabe, uma história de interação do homem com o meio ambiente, com a natureza, transformando-os em função de suas necessidades e interesses. Nesses processos interativos, a busca por fontes energéticas tem sido uma constante e ocupa lugar central.

Com o passar do tempo, em todo o mundo, algumas fontes energéticas tradicionais têm se mostrado extremamente prejudiciais ao meio ambiente e ao próprio homem. Assim, nas últimas décadas, a busca de energias renováveis ou fontes alternativas de energias, se constitui numa solução para muitos problemas sociais relacionados ao consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis. O uso de energias renováveis permite uma melhoria da qualidade de vida, diminuindo a dependência econômica e reduzindo os impactos negativos, resultantes da queima dos combustíveis na sua utilização e transformação de energia.

Nessa perspectiva, com apoios institucionais, pesquisadores têm se dedicado à investigação científica cujos resultados são quase sempre empregados na elaboração de modelos relativos ao consumo de energia, contribuindo, assim, para aquilo que, mais recentemente, se convencionou chamar de desenvolvimento sustentável. Ou seja, com as pesquisas, além da busca de soluções para problemas já existentes, associados ao uso da energia, procuram-se novas formas ou maneiras de proteção e manutenção dos sistemas naturais dentro dos quais se desenvolve a própria vida. Desse modo, busca-se diminuir, cada vez mais, o consumo de combustíveis fósseis.

Uma das formas de reduzir essa dependência de combustíveis fósseis é a utilização da energia solar, por meio de conversão térmica. Coletores solares dos tipos: placa plana, concentrador e tubo evacuado captam a radiação solar através da região espectral absorvedora e a transformam em energia térmica. Essa região espectral absorvedora pode ser obtida por uma superfície preta ou uma superfície seletiva, sendo esta última mais eficiente.

Em aplicações práticas para a geração de energia solar térmica, torna-se necessário o revestimento do material que absorve a radiação solar por uma superfície seletiva, ou seja, uma superfície que absorva bem a radiação no espectro solar (ultravioleta e visível) e, ao mesmo tempo, tenha uma baixa emissividade (emita no

infravermelho). O revestimento de superfícies absorvedoras tem a função de aumentar a eficiência do equipamento e fazer com que o mesmo atinja temperaturas de estagnação maiores, o que não ocorre com equipamentos sem a seletividade, os quais funcionam a temperaturas inferiores a 100°C.

As propriedades ópticas dessas superfícies são tais que, devem possuir alta absorção solar para maximizar a fração da energia solar transformada em calor, e baixa emitância térmica para eliminar as perdas de radiação infravermelha. Existem varias técnicas para se obter um revestimento seletivo, algumas delas têm foram relatadas por Niklasson (1983). Revestimentos de cobre preto por meio de técnica de conversão química foram investigados por Hornstrom (1984) e Lampert (1979).

No Brasil esse revestimento eleva o custo do equipamento solar térmico, pois geralmente materiais com características seletivas são importados, aumentando assim os custos com importação e impostos.

Este trabalho tem como objetivo principal obter e caracterizar uma nova superfície através do IR e Raman, e realizar um estudo comparativo entre as superfícies seletivas já comercializadas e as novas superfícies propostas: CRFO ($\text{Cr}_{0,75}\text{Fe}_{1,25}\text{O}_3$), composto obtido através de processo cerâmico à base de óxido de cromo e óxido de ferro e FCTO ($\text{Fe}_{0,5}\text{Cu}_{0,75}\text{Ti}_{0,75}\text{O}_3$), composto obtido através de processo cerâmico à base de óxido de titânio, óxido de ferro e óxido de cobre, seguindo os procedimentos desenvolvidos por Freire (2008) e Rocha (2009). Nesse sentido, um procedimento de obtenção das novas superfícies depositadas sobre chapas de cobre constituídas pelas espécies CRFO e FCTO foi desenvolvido, baseado em procedimentos cerâmicos, na obtenção de tempo e temperatura adequados para depósito as superfícies acima relatadas. Foram calculados os valores médios de absorvidade em cada superfície, através de um balanço de energia, que foi obtido em função dos valores de temperaturas e radiação solar global, durante os dias em que os dados foram coletados.

A superfície que serviu como referência para o estudo comparativo com as novas superfícies propostas foi um óxido metálico comercial (Tinox), depositado sobre uma placa de cobre por eletrodeposição, esta utilizada em coletores de placa plana, fabricados no LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, Universidade Federal do Ceará). Os valores médios da absorvidade das superfícies propostas foram comparados com os valores dessa superfície comercial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca por modelos de desenvolvimento sustentável e a implantação de novas fontes de energia têm sido objeto de discussão em vários encontros internacionais, visando ao desenvolvimento e autonomia dos países e à preservação dos recursos naturais ameaçados pela forma desordenada que tem caracterizado o seu uso, nas intervenções levadas a efeito pelo homem.

Neste contexto, segundo Reis (2005), o modelo de desenvolvimento sustentável deve ser capaz não só de contribuir para a solução dos atuais problemas, mas também de garantir a própria vida, por meio da proteção e manutenção dos sistemas naturais que a tornam possível.

No Brasil, como em outros países, a utilização de novas fontes de energia torna-se, assim, necessária para o desenvolvimento e a autonomia da nação, pois a crise do petróleo e a iminente ameaça de escassez dos combustíveis fósseis comprometem o crescimento econômico global, além de exercer grande influência no equilíbrio ambiental do ecossistema. Estas já são justificativas suficientes para a constante realização de novas pesquisas visando à obtenção de novas fontes energéticas.

Analisando o problema em uma perspectiva de aproveitamento energético, pode-se destacar o Sol como maior fonte de energia de nosso planeta. Sabe-se que ele se constitui em um grande potencial energético e que apenas uma pequena parcela desse potencial é realmente aproveitada. A constante solar $G_{SC} = 1367\text{W/m}^2$ que representa a energia recebida do Sol por unidade de tempo em uma área unitária de superfície no espaço, colocada na distância média entre a Terra e o Sol expressa o quão grande é o potencial inutilizado.

Em se tratando de aproveitamento de energia solar, uma importante aplicação é a conversão em energia térmica, utilizando-se coletores solares planos, concentradores, tubo evacuado, entre outros.

A aplicação de sistemas térmicos solares é variada. Além de outras formas, ela pode ser utilizada em processos de secagem, aquecimento de ambientes, refrigeração e, ainda, na dessalinização de água em comunidades que não têm acesso a esgotamento sanitário, entre outros.

No entanto, o grande problema dos equipamentos que convertem energia solar em energia térmica continua sendo a eficiência e o custo dos componentes; daí ser necessário o desenvolvimento de pesquisas que possam minimizar tanto as perdas térmicas e o baixo desempenho dos equipamentos quanto o custo para fabricação e instalação.

Uma das variáveis que podem ser levadas em consideração, quando se pretende melhorar a eficiência e minimizar os custos de um sistema de conversão térmica em coletores, é o desenvolvimento de uma superfície absorvedora que tenha uma alta absorvidade e uma baixa emissividade, fazendo com que a superfície possa atingir temperaturas mais elevadas. Neste sentido, nas últimas três décadas algumas pesquisas foram desenvolvidas em busca de novos tipos de materiais de baixo custo e que tenham características seletivas.

Granqvist (1979) analisou a refletância de pequenas partículas de cromo dispersas em um meio isolante, depositadas sobre um substrato metálico, visando a obtenção dos parâmetros que definem a seletividade do mesmo. Esses parâmetros foram: espessura do revestimento, permeabilidade dielétrica, substrato metálico, forma e orientação das partículas dispersas no isolante.

Krenzinger (1979) fez um estudo experimental das características ópticas de superfícies seletivas, obtidas pela oxidação de placas e tubos de cobre comercial calculando os valores médios da absorbância e emitância do material.

Choudhury (2000) apresenta um estudo comparativo entre diferentes superfícies seletivas à base de óxido de cobre, níquel preto, óxido de cobalto e cromo preto, depositado sobre diferentes substratos por diferentes técnicas de deposição.

Gomes (2001) realizou um estudo comparativo de seis superfícies aplicadas sobre placas de cobre, utilizadas em coletores térmicos, obteve a temperatura de cada superfície e radiação em função do tempo e, posteriormente, fez um balanço de energia para encontrar os valores médios da absorvidade e emissividade das amostras.

Katzen (2005) estudou os valores da absorvidade e emissividade de silício-carbono dissolvido em um meio aquoso e depositado por *spin-coating* em um substrato de vidro com diferentes espessuras, onde, posteriormente passou por um tratamento térmico. Os melhores resultados foram encontrados para filmes com espessura de 1000nm ($\alpha = 0,94$ e $\varepsilon = 0,15$).

Rocha (2006) contribuiu com um estudo estrutural e de transporte dos compósitos magneto-dielétricos processados em escala laboratorial de soluções sólidas,

procedentes dos sistemas $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CuO}/\text{TiO}_2$. Esse material é utilizado na fabricação de antenas.

Freire (2008) obteve, através de reação de estado sólido, matrizes cerâmicas compósitas à base de $\text{Cr}_{0,75}\text{Fe}_{1,25}\text{O}_3$ (CRFO100) / $\text{Fe}_{0,5}\text{Cu}_{0,75}\text{Ti}_{0,75}\text{O}_3$ (FCTO100) para estudo de suas propriedades estruturais e elétricas, visando a sua aplicação em circuitárias eletrônicas de radiofrequência e microondas. Algumas matrizes cerâmicas foram utilizadas na obtenção das superfícies.

Rocha (2009) também analisou, através de MEV e EDX, a estrutura dos compósitos CRFO e FCTO, obtidos estes em um processo cerâmico para aplicação em eletrônica e utilizados na fabricação de antenas dielétricas.

Apesar de estes últimos materiais apresentarem aplicações em outro ramo de estudo, estas cerâmicas, obtidas por reação de estado sólido, podem ser utilizadas em coletores solares térmicos, pois apresentam elementos químicos com potencialidade de uso neste tipo de aplicação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Superfície Seletiva

Como foi citado na Introdução deste trabalho, uma das partes fundamentais de um coletor solar térmico é a placa absorvedora de radiação, esta responsável pela absorção de radiação, conversão em energia térmica, e transmissão de calor para o fluido de trabalho através dos tubos de escoamento, caso em que os coletores são do tipo placa plana. Entretanto, para que se possa aumentar a eficiência de conversão de energia e, conseqüentemente, aumentar a temperatura de estagnação do sistema, a placa absorvedora deve possuir um revestimento com características seletivas, absorvendo o máximo de radiação no espectro ultravioleta, visível e infravermelho próximo (até 3,0 μ m) e tendo uma refletância mínima na região do infravermelho; daí se pode concluir que um revestimento seletivo ideal deve possuir uma transição abrupta entre as regiões de alta e baixa refletividade. Essas duas regiões são denominadas de banda solar, para especificar a banda de alta absorvidade, e banda de emissão o limite em que a superfície passa a emitir radiação. Esta última determinação consistindo na região do infravermelho longínquo.

Existem diversas maneiras de fazer com que um material obtenha características seletivas e diferentes custos, tais como: tornar o material mais aderente possível à superfície de cobre, usar técnicas de deposição que torne a superfície a mais homogênea possível, usar materiais compósitos a base de ferro, titânio e cromo, que apresentam bons resultados em superfícies seletivas. Nem sempre a melhor superfície significa a mais eficiente, em se tratando de custo benefício, ou nem sempre a superfície com maior absorvidade é a que possui melhor seletividade.

No que concerne a coletores do tipo placa plana, existem duas maneiras de aumentar a eficiência de conversão térmica: a primeira é obter uma seletividade na cobertura; a segunda é obter seletividade na placa absorvedora.

3.1.1 Cobertura Seletiva

Um coletor solar do tipo “placa plana” pode possuir uma cobertura, geralmente um vidro com baixo teor de ferro para possibilitar uma maior transmissividade. Essa cobertura pode ter a função de evitar tanto as perdas de calor por convecção, pois impossibilita a circulação de fluido (correntes de convecção) para a parte externa do coletor, como também pode servir como um refletor para a radiação refletida pela superfície. Ou seja, uma parte da radiação refletida retorna para a placa absorvedora e outra parte é transmitida por condução através do vidro. Esse processo faz com que a placa absorvedora, mesmo não tendo um revestimento seletivo, absorva mais que emita e tenha um comportamento seletivo.

3.1.1.1 Transparência na Banda Solar e Absorção na Banda de Emissão

Nesse tipo de seletividade, utiliza-se uma cobertura que tenha alta transparência à radiação solar e, ao mesmo tempo, tenha alta absorção no comprimento de onda da radiação refletida pelo absorvedor, não necessitando que a placa absorvedora seja seletiva.

O vidro, utilizado como cobertura em coletores planos, possibilita a passagem da radiação incidente sobre ele mesmo, devido à alta transparência na banda solar, chegando à placa absorvedora. Parte da radiação incidente sobre o absorvedor é refletida e absorvida pela cobertura, havendo, assim, um aquecimento da parte inferior do vidro, mesmo não ocorrendo transmissão de calor por convecção devido ao vácuo. A baixa transmissividade do vidro na banda de emissão é devida à quase total absorção que o mesmo apresenta a partir de um comprimento de onda de $5\mu\text{m}$, e não à reflexão como alguém poderia supor.

Parte do calor absorvido na cobertura é transmitida por condução devido ao gradiente de temperatura entre a parte interna e a parte externa. Outra parte, devido ao aquecimento da superfície interna da cobertura, é emitida de volta para a placa absorvedora. O funcionamento se assemelha ao efeito estufa.

Segundo Krenzinger (1979), em absorvedores cinza, o efeito estufa pode render de 100 a 300W/m² na radiação incidente a mais do que em coletores com coberturas completamente transparentes.

3.1.1.2 Transparência na Banda Solar e Reflexão na Banda de Emissão

Esse efeito se assemelha bastante àquele descrito anteriormente, pois a cobertura deve ter alta transparência na banda de radiação solar. O que diferencia os dois efeitos é a alta refletividade da segunda cobertura na banda de emissão, possibilitando, assim, um maior aproveitamento de energia, pois elimina uma etapa já que a radiação refletida pelo absorvedor é também refletida pela cobertura de volta, não necessitando da absorção e posterior emissão.

Alguns materiais podem ser depositados na cobertura para que se possa alcançar o efeito seletivo desejado. Dentre outras possibilidades, o Óxido de Estanho (SnO₂) e o Óxido de Índio (InO₃) são alguns dos materiais utilizados para esta aplicação. Ambos são materiais seletivos, apresentam alta transparência na banda de radiação solar e alta refletividade na banda de emissão '0,75 e 0,70, respectivamente, (KENZINGER,1979)'.

Coletores com cobertura que preenchem as características descritas acima apresentam resultado similar aos coletores com cobertura de vidro e superfície absorvedora seletiva. Portanto, se um coletor solar possui absorvedor seletivo, não há necessidade de colocar cobertura como descrita anteriormente (a seletividade elimina grande parte da radiação refletida).

3.1.2 Seletividade na Superfície Absorvedora

Uma superfície seletiva ideal na placa absorvedora de um coletor solar térmico consiste em um material que tenha alta absorção na banda de radiação solar e

alta reflexão na banda de emissão, o que significa baixa emissividade na temperatura de operação. São apresentados, a seguir, alguns tipos de absorvedores seletivos.

3.1.2.1 Seletividade Direcional ou Armadilha Óptica

A radiação solar direta incidente sobre a superfície da terra é confinada em um intervalo angular e as perdas em um coletor são hemisféricas. Mesmo que se tenha uma superfície absorvedora com características de uma superfície cinza, pode-se obter uma placa absorvedora com características seletivas; basta que para tanto a superfície absorva mais radiação que emita.

Para se obter uma superfície seletiva direcional ideal, considera-se uma superfície cinza com inclinação ϕ , para que a radiação incida perpendicular à superfície. E que a radiação incida dentro de um intervalo angular 2β cuja bissetriz é a latitude geográfica local. Qualquer radiação que não chegue à superfície dentro do intervalo angular será totalmente refletida, o que implica uma absorvidade nula. Pode-se então afirmar que a absorvidade de tal superfície está intimamente ligada ao número de ocasiões em que a radiação solar direta está incidindo dentro do intervalo angular 2β . Segundo Hollands (1963), para um valor $\beta=35^\circ$, a absorvidade diária seria de pelo menos 0,97 em um dia de equinócio.

Uma das maneiras de se obter uma superfície seletiva direcional é fazer um absorvedor em forma de uma superfície corrugada, em formato de uma seqüência de letras V como mostrado na Figura 1. A Radiação incidente normal sofre diversas reflexões internas, sendo parcialmente absorvida em cada reflexão. À medida que o ângulo de incidência vai aumentando, há uma diminuição no número de reflexões, o que acarreta uma diminuição na quantidade de radiação absorvida pela superfície.

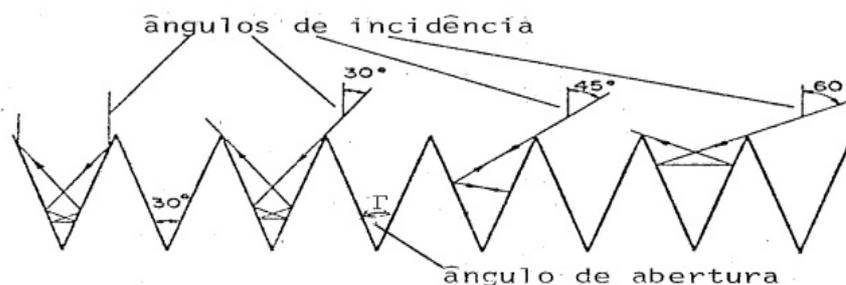


Figura 1 – Superfície corrugada em V (CUOMO, 1975)

Apesar do aumento na absorção da radiação em uma superfície corrugada em V, há também uma ampliação da superfície do absorvedor, o que aumenta as perdas por convecção natural entre a placa e o absorvedor.

Cuomo *et al* (1975) sugeriram uma superfície formada por uma densa floresta de agulhas, estas alinhadas com diâmetro da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz visível e com espaçamento da ordem de vários comprimentos de onda. Assim, a superfície absorveria mais, devido às múltiplas reflexões, à medida que os fótons penetrassem no labirinto de agulhas.

3.1.2.2 Superfície Seletiva Obtida por Rugosidade

A variação das propriedades da radiação com as irregularidades da superfície depende da relação entre a rugosidade da superfície e o comprimento de onda da radiação. De acordo com a relação entre essas grandezas, se pode ter uma radiação refletida especular ou difusa e a seletividade da superfície poderá ser classificada em duas categorias: a primeira, na qual a inclinação das irregularidades da superfície é muito pequena, pode ser considerada polida, ou seja, desconsideram-se as múltiplas reflexões da radiação. O efeito principal da rugosidade é converter um refletor especular em um refletor parcialmente difuso e parcialmente especular. Uma segunda categoria é aquela em que a superfície está coberta por cavidades profundas, o que possibilita uma maior absorção devido às múltiplas reflexões que ocorrem no interior das cavidades antes que a radiação deixe a superfície. Em micro cavidades, devido a relação de

espalhamento por difração, a refletividade da superfície tem grande dependência do comprimento de onda λ , uma vez que o efeito cavidade altera a absortividade da superfície.

3.1.2.3 Superfície Obtida por Interferência de Camadas

A deposição alternada de dielétricos e metais semitransparentes pode produzir um efeito seletivo quando depositados sobre um material refletor, devido à interface formada entre materiais diferentes, com diferentes constantes ópticas. Esse efeito pode ser utilizado tanto para melhorar as características de um material seletivo, como também para obter superfícies seletivas cujas propriedades se devam, exclusivamente, à interferência entre camadas.

Quando há uma reflexão na interface entre duas superfícies de índices de refração diferentes, a cada reflexão há uma mudança de fase da onda refletida. Os fatores que controlam a interferência são: a diferença de percurso ótico e a defasagem na reflexão.

Seraphin (1974) usou uma camada de Si_3N_4 de espessura ótica de $0,16\mu\text{m}$ para diminuir por interferência a sua superfície de silício sobre prata, ilustrado na Figura 2.

A eficiência de um filme refletor pode ser aumentada na banda de radiação solar, se o índice de refração (n) diminui desde o metal (substrato) até a superfície.



Figura 2 - Corte esquemático do observador seletivo: (1) camadas anti-refletoras; (2) absorvedor de silício; (3) barreira de difusão; (4) metal refletor; (5) substrato de aço inox (SERAPHIN, 1974)

3.1.2.4 Absorção na Banda de Radiação Solar e Transparência na Banda de Emissão, Depositados em Substrato Refletor

A sobreposição de um metal altamente refletor (pelo menos na banda de emissão) por uma camada de um material que tenha alta absorvidade na banda de radiação solar e alta transparência na banda de emissão consiste em uma das maneiras de se obter uma superfície seletiva. Tem-se um empilhamento que absorve radiação solar e cuja emissividade, devido à transparência da camada superior, é de responsabilidade do metal base.

A camada superior é, em geral, um semicondutor apropriado que não tem condições de interagir fortemente com fótons de energia menor que o intervalo da banda proibida, sendo assim transparente a esse comprimento de onda. As transições na transmissividade monocromática dos semicondutores, muitas vezes, não se dão em comprimentos de ondas desejáveis, sendo necessário dopar o semicondutor com impurezas que alterem as propriedades ópticas intrínsecas. Em outras situações, quando a transição está melhor posicionada, o alto índice de refração provoca uma reflexão sobre uma camada que perde uma quantidade considerável de energia incidente, sendo necessário o uso de uma camada anti-refletora sobre o semicondutor.

3.1.2.5 Transparência na Banda de Radiação Solar e Reflexão na Banda de Emissão, Depositados sobre Substrato Absorvente

O revestimento de um substrato absorvente por um material que seja transparente na banda de radiação solar e que reflète na banda de emissão é também uma forma de se obter um absorvedor com características seletivas. A superposição de um material absorvente por outro material que reflète na banda de emissão terá o mesmo comportamento de uma superfície seletiva, devido à reflexão das ondas refletidas pelo substrato na interface entre os dois. Dessa forma, há uma diminuição da radiação emitida e um aumento da energia absorvida.

Goldner e Haskal (1975) usaram os óxidos de estanho e índio ($\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$) depositados sobre silício como a camada refletora.

3.1.2.6 Efeito de Tamanho Quântico

Os efeitos de tamanho quântico (QSE) ocorrem em filmes ultrafinos de semicondutores degenerativos e resultam em alta absorvidade à radiação solar e, simultaneamente, alta refletividade térmica. A combinação de um material de QSE com um substrato de alta refletividade pode fazer um bom absorvedor solar para conversão térmica.

Segundo Gomes (2001), esse efeito pode ser observado na deposição a vácuo do Antimônio de Índio (InSb) sobre um substrato de prata ou alumínio.

O QSE é importante em absorvedores seletivos de multicamadas. Frequentemente, finas camadas metálicas são usadas entre camadas dielétricas. Essas camadas são responsáveis pela alta absorção de energia solar.

A maior desvantagem no uso de superfícies seletivas à base de QSE é sua instabilidade frente à variação de temperatura e exposição atmosférica.

3.2 Radiação Térmica

O processo de transferência de calor por radiação é caracterizado por ser o único modo de transferência de calor com ausência de meio material. Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura acima de zero Kelvin. A taxa líquida de transferência de calor por radiação \dot{Q}_{rad} para o caso de uma pequena superfície na temperatura T_p envolvida por uma vizinhança isotérmica na temperatura T_∞ é expressa pela Equação 3.3, na qual ϵ representa a propriedade radiante

da superfície denominada emissividade, A representa a área da placa emissora, e σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma(T_P^4 - T_\infty^4) \quad (3.3)$$

Radiação eletromagnética é constantemente emitida, em todas as direções, por todo objeto que estiver a uma temperatura acima de zero Kelvin (zero absoluto) devido à agitação atômica e molecular combinada com a sua energia interna. Pode-se entender que radiação eletromagnética corresponde a uma quantidade de energia em movimento entre dois ou mais corpos, e essa transmissão não depende de um meio material para ocorrer. O fluxo radiante depende da forma, do tamanho e, principalmente, da temperatura dos objetos envolvidos na transmissão de calor e todos os objetos que estejam acima do limite de temperatura citado anteriormente emitem e absorvem radiação eletromagnética, ou fótons, aumentando ou diminuindo os níveis de energia.

A radiação térmica incidente em uma superfície pode ser absorvida, refletida, transmitida ou espalhada em todas as direções, dependendo da forma e composição do material incidido. Posteriormente, será detalhada, neste trabalho, cada propriedade.

Na maioria de sólidos e líquidos, a radiação emitida por átomos internos é fortemente absorvida pelos átomos adjacentes. Assim, a radiação emitida por sólidos e líquidos é originada de átomos que se encontram a distâncias não superiores a $1 \mu\text{m}$ da superfície exposta. É por essa razão que a emissão de sólido ou líquido pode ser considerada como um fenômeno de superfície.

3.2.1 Espectro da Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética é usualmente descrita de duas maneiras diferentes. A primeira refere-se à radiação como um deslocamento de fótons ou quanta; a radiação como um deslocamento de fótons. A segunda descrição refere-se à radiação como uma propagação de ondas eletromagnéticas independente de um meio. Estes

conceitos são conhecidos teoricamente como dualidades onda-partícula, ou seja, a luz pode ser tratada tanto como um deslocamento de partículas quanto como uma propagação de ondas.

Em qualquer caso, se atribuem à radiação térmica as propriedades de uma onda eletromagnética tais como frequência (ν) e comprimento de onda (λ), e estas estão relacionadas com a velocidade de propagação (c) em um meio através da equação 3.4

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (3.4)$$

onde o valor de c representa a velocidade da luz no meio (a velocidade da luz no vácuo é $c_0=2,998 \cdot 10^8$ m/s).

O espectro da radiação eletromagnética é determinado pelo comprimento de onda de propagação da radiação e é mostrado na Figura 3. Nesta, pode ser observado que a radiação térmica é apenas uma parte da radiação compreendida entre o ultravioleta e parte do infravermelho.

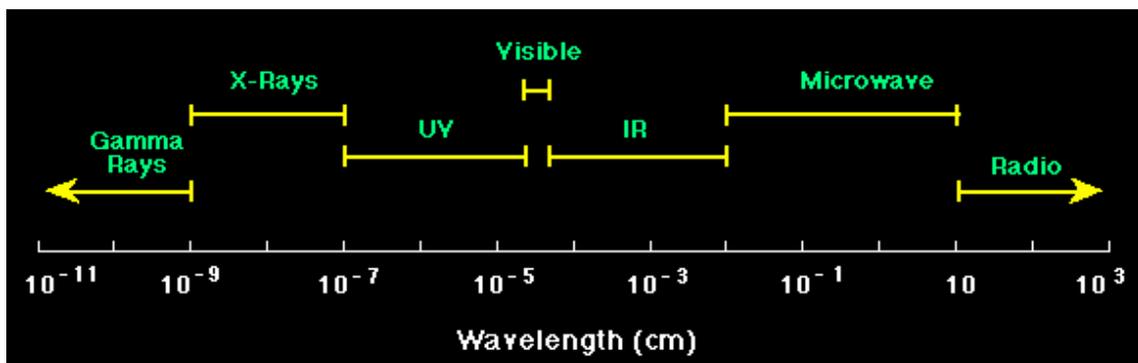


Figura 3-Espectro da Radiação Eletromagnética

4 MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados neste capítulo os procedimentos para a fabricação das superfícies em estudo, preparação do aparato experimental para testes de campo, do sistema de coleta de dados e balanço de energia para a obtenção dos valores médios da absorvidade das superfícies propostas.

4.1 Preparações da Superfície

A preparação das superfícies que foram testadas como superfícies absorvedoras em um coletor solar térmico obedeceram à programação descrita adiante. A obtenção dos compostos partiu de um processo de homogeneização em reatores de metal misturados a esferas de aço, obedecendo a uma proporção de 10 esferas de 10 mm de diâmetro para cada 20g de amostra, posteriormente o material homogeneizado passou tratamento térmico, para que houvesse a sinterização do material, em um forno resistivo obedecendo à programação descrita adiante. A próxima etapa foi quebrar os grãos do composto por um processo de maceração para facilitar a deposição sobre o substrato. A última etapa da preparação da superfície foi a mistura com um ligante e a deposição do material sobre o substrato.

4.1.1 Preparação dos Compostos (CRFO e FCTO)

A preparação do material utilizado na fabricação dos óxidos (compostos) que foram depositados como superfícies seletivas (FREIRE, 2008, ROCHA *et al*, 2009) foi obtida conforme relatado nas Tabelas 1 e 2. A Tabela 1 representa os óxidos precursores e a quantidade de material utilizado em cada composto, a Tabela 2 expressa a temperatura de calcinação de cada composto e o tempo de forno durante o tratamento térmico.

Tabela 1 - Materiais utilizados na preparação dos compostos

Óxidos Precursores / massa da amostra	FCTO	CRFO
CuO(Vetec, 99%)	5,61g	
Fe ₂ O ₃ (Aldrich, 99+%)	3,75g	12,73g
TiO ₂ (Vetec, 98%)	5,63g	
Cr ₂ O ₃ (Reagen, 99.8%)		7,27g
Total da Amostra	15g	20g

Tabela 2 - Temperatura de calcinação e tempo tratamento térmico

Compostos/ Temperatura e tempo	FCTO	CRFO
Temperatura de Calcinação (°C)	990	1300
Tempo (h)	5h	5h

4.1.2 Superfície Absorvedora

Na obtenção da superfície proposta, o primeiro passo foi a deposição do material, CRFO, FCTO ou a mistura dos dois componentes, em um substrato de cobre através de um método de espalhamento adequado para o tipo de material que se pretende depositar e foi descrito adiante.

4.1.2.1 Materiais Utilizados

A escolha do material aditivo (ligante) para melhorar a aderência das amostras sobre o substrato (chapa de Cobre) foi baseada nos trabalhos de (FREIRE, 2008, ROCHA et al, 2009); porém, os autores relatados utilizaram a Araldite tipo A em suas amostras. Neste trabalho, foi utilizada como ligante a Araldite tipo B comercial,

numa proporção de 30% da quantidade total da amostra, no caso do CRFO, e 25% da quantidade total da amostra, no caso do FCTO. Este componente foi utilizado para que a amostra que anteriormente apresentava-se em forma de pó adquirisse uma característica viscosa, favorecendo, assim, o espalhamento dos compostos sobre a superfície da chapa de cobre (substrato).

O substrato, como já foi relatado antes, constituiu-se de uma placa de cobre nas dimensões de: 10 cm x15 cm e espessura 0,22mm. A largura de 15cm foi utilizada para obedecer os padrões das aletas comercializadas como placa absorvedoras em coletores planos.

Utilizou-se também um Fundente (uma mistura de Boro-Bismuto B_2O_3/Bi_2O_3 , na proporção de 1: 1), adicionado nas amostras em uma proporção de 5% em peso da quantidade total da amostra.

Foram pesadas em balança analítica SHIMADZU-SY220, 20g de CRFO e 15g de FCTO de acordo com a superfície que se pretendia preparar, correspondendo a 100% da quantidade total da amostra.

4.1.2.2 Procedimentos para Obtenção das Superfícies CRFO e FCTO

Os compostos CRFO e FCTO foram obtidos por reação de estado sólido, de acordo com os procedimentos indicados na literatura (FREIRE, 2008, ROCHA *et al*, 2009) relatados na Tabela 1, e em seguida, foram macerados para que ficassem com uma granulometria uniforme, juntamente com o fundente. Após a mistura estar bem homogênea, foi acrescentado o ligante e uma nova homogeneização foi feita.

O material foi depositado na placa de cobre através da técnica de deposição chamada *screen-printing*, que consiste no espalhamento da amostra na placa por uma lâmina de vidro, inclinada num ângulo de aproximadamente 45°.

Posteriormente, foi realizado um tratamento térmico (sinterização) em um forno resistivo (FORNO MUFLA-SP1200), seguindo a programação mostrada na Figura 4, para que ocorresse a evaporação do ligante e o processo de sinterização dos compostos na placa de cobre. A taxa de elevação da temperatura foi de cinco graus por minuto, e cada superfície permaneceu durante uma hora na temperatura de 200°C.

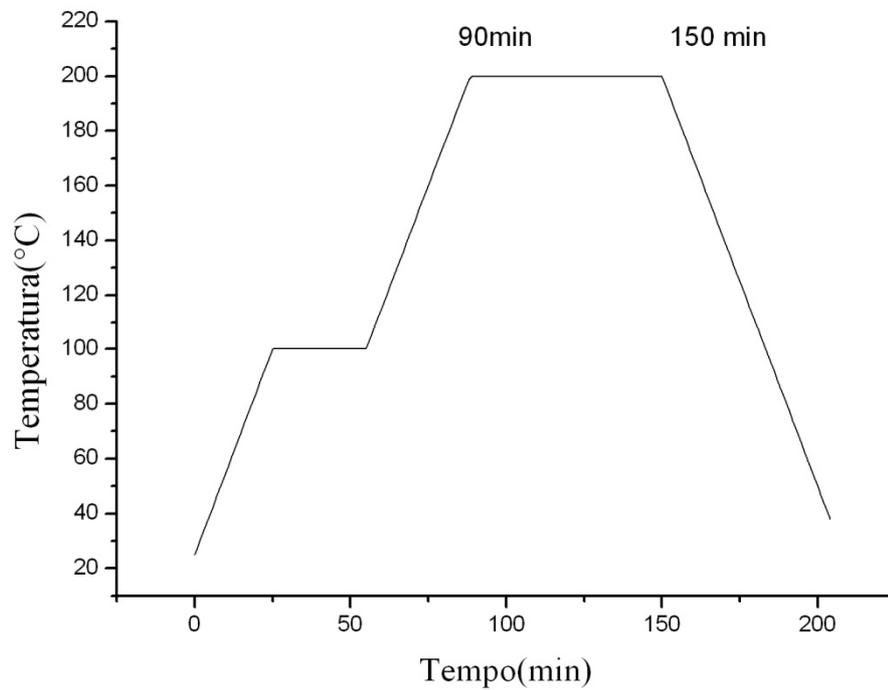


Figura 4 - Programação do forno

Durante a preparação da superfície formada pelo FCTO, houve a formação de bolhas de ar, indicando que o ligante parecia não ter evaporado por completo. Então, foi decidido diminuir a quantidade de ligante na amostra para 25% e foi feita uma nova superfície.



Figura 5 - Superfície de FCTO depositada sobre cobre e lixada

Após a diminuição da quantidade de ligante na amostra, houve a formação de uma quantidade menor de bolhas. As superfícies foram lixadas para que não houvesse prejuízo na transmissão de calor para a placa de cobre.

As amostras prontas foram colocadas no aparato experimental, construído especialmente para realizar testes comparativos entre as superfícies obtidas a base de CRFO e FCTO e um óxido metálico comercial (Tinox), formado por três camadas eletrodepositadas sobre faixas de cobre com as seguintes características a 100°C: $\alpha=0,95\pm0,02$ e $\eta = 0,05\pm0,02$).

4.2 Aparato Experimental para Teste de Campo

A fim de que os materiais depositados pudessem ser testados e seus resultados comparados com materiais disponíveis no mercado, foi fabricado um aparato experimental para testes de campo.

Esse sistema foi desenvolvido tendo como referência o aparato desenvolvido por Gomes (2001).

O sistema de testes, mostrado na Figura 6, foi fabricado com uma estrutura externa madeira de 15 mm de espessura e com dimensões 23 cm x 47 cm x 10 cm e possui três encaixes, onde as placas de cobre recobertas com as espécies CRFO, FCTO e o TINOX (Comercial) foram afixadas. Para a cobertura

do aparato, foi utilizado um vidro temperado com uma espessura de 5 mm (com transmissividade $\tau = 0,885$). A Figura 7 representa um desenho esquemático da estrutura de testes, fabricado de tal forma a se aproximar da forma de um coletor plano.



Figura 6 - Fotografia do coletor

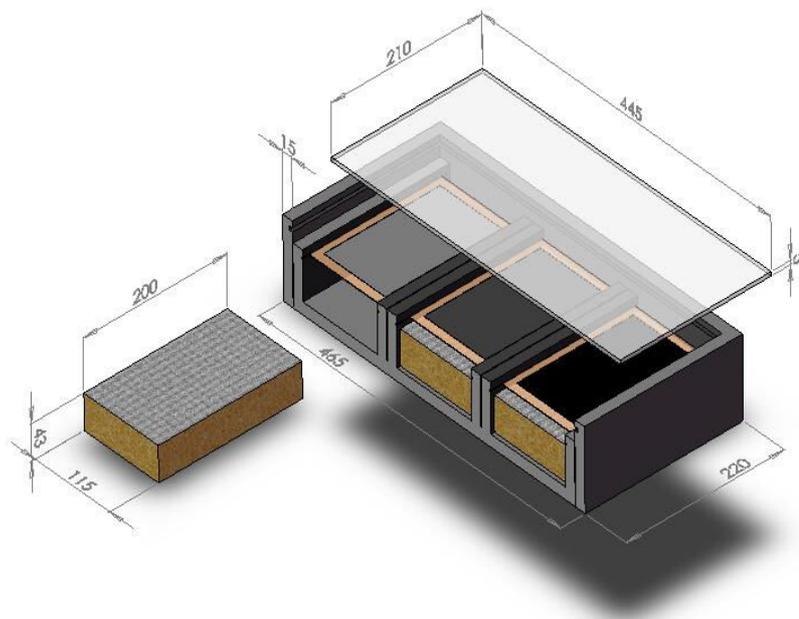


Figura 7 - Desenho esquemático do coletor (medidas em milímetro)

Para o isolamento nos três encaixes foram utilizadas duas camadas de lã de vidro em mesma quantidade, possibilitando que as três superfícies estivessem submetidas às mesmas condições. A espessura e dimensões do isolamento estão ilustradas na Figura 7.

4.3 Instalação dos Termopares

Para que os termopares tipo K, todos com mesmo comprimento, fossem fixados nas placas de cobre, foi utilizada uma cola que possui propriedades de isolamento elétrico (OMEGABOND 100), como mostra a Figura 8.

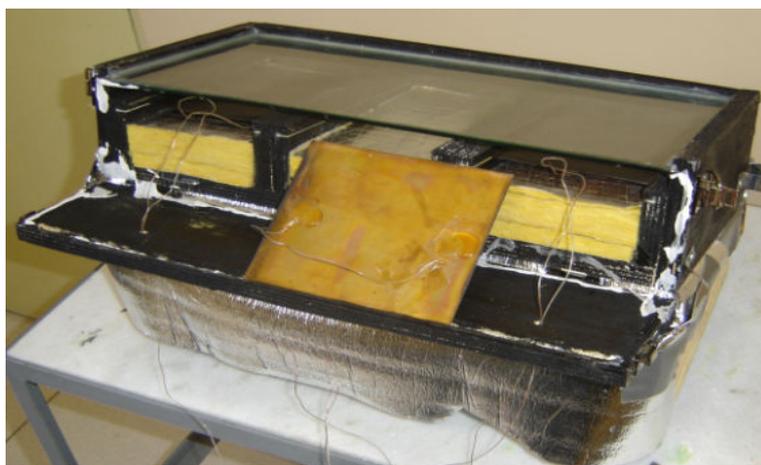


Figura 8 - Termopares instalados na superfície de cobre

Em seguida, os termopares foram calibrados, utilizando-se um *offset* de 2,8 °C; ou seja, foram feitas medições de temperatura de um reservatório com água fervendo e as indicações do coletor de dados comparadas com as medições de um multímetro, e a diferença aproximada entre as duas medições corresponde ao valor do *offset*.

Após a calibração dos termopares, as placas de cobre com as superfícies depositadas foram colocadas na estrutura de madeira e expostos à radiação solar para a coleta de dados.

4.4 Coleta de Dados

Os dados foram coletados através de termopares tipo K, em um coletor de dados (OM-DAQPRO-5300) com entrada para oito canais. Foram feitas medições de temperatura a cada 2 segundos e suas médias armazenadas em intervalos de 2 minutos. Utilizando-se os dados de temperaturas obtidos, foi possível fazer uma comparação entre as superfícies para a radiação incidente em função do tempo.

No sentido de obter uma melhor qualidade nas medições, foram usados dois termopares para cada superfície estudada. Os resultados foram coletados na cidade de Fortaleza, entre os dias 9 e 11 de março de 2010 em uma primeira fase de testes, e entre os meses de setembro e novembro na última fase da coleta de dados.

Os dados foram coletados de 8:00 horas as 16:00 horas e analisados no final de cada dia. Caso houvesse algum problema de medição em algum dos termopares durante a coleta de certo dia, os dados daquele dia eram excluídos.

4.5 Balanço de Energia

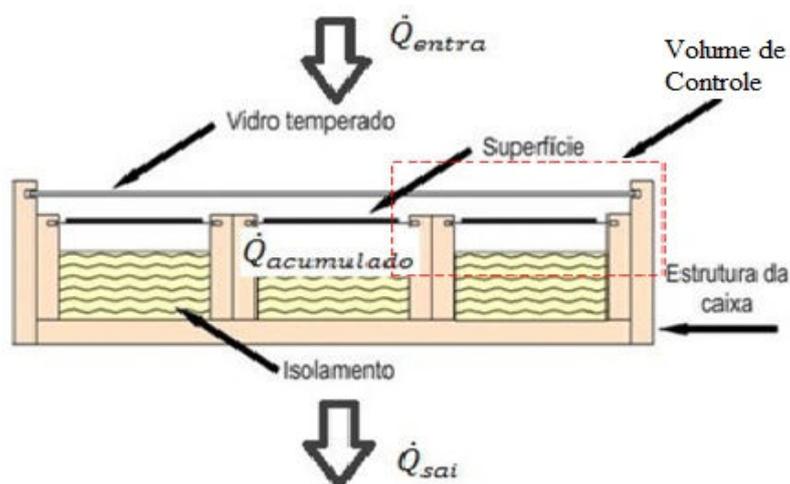


Figura 9 - Representação do balanço de energia no aparato experimental.

Em um sistema solar térmico, a energia que chega até a placa absorvedora de um coletor solar do tipo placa plana está relacionada à eficiência óptica de um

coletor η_{opt} , a intensidade da radiação solar R_{SOL} em $[W/m^2]$ e a área da placa A_P em $[m^2]$, como mostrada na equação 4.1:

$$\dot{Q}_C = \eta_{opt} R_{SOL} A_P \quad (4.1)$$

onde η_{opt} está relacionada à transmissividade τ_V do vidro, cobertura do coletor, e à absorvidade da placa absorvedora α_P e pode ser expressa na forma da equação 4.2.

$$\eta_{opt} = \tau_V \alpha_P \quad (4.2)$$

As perdas de energia por convecção devido à convecção natural entre superfície e cobertura podem ser expressas através da equação 4.3,

$$\dot{Q}_{CON} = h A_P (T_P - T_V) \quad (4.3)$$

Onde T_P e T_V são as temperaturas da placa e do vidro, respectivamente, h representa o coeficiente de transmissão de calor por convecção em função do número de Nusselt (Nu), do comprimento característico (L) e da condutividade térmica do ar (k), definido pela equação 4.4

$$h = Nu \frac{k}{L} \quad (4.4)$$

A equação 4.5 desenvolvida por Hollands *et al* (1976) apresenta uma forma de calcular o número de Nusselt para uma convecção natural entre superfícies inclinadas e pode ser aplicada para coletores solares planos.

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right] + \left[1 - \frac{(\sin 1,8\beta)^{1,6} \cdot 1708}{Ra \cos \beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (4.5)$$

O número de Rayleigh é obtido através da equação 4.6, onde ν é a viscosidade cinética, α a difusividade térmica, β o coeficiente de dilatação volumétrica e L o comprimento característico, ou seja, distância entre placa e cobertura.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (4.6)$$

A perda de energia para o ambiente é o resultado da condução através do isolamento térmico e da estrutura de madeira do coletor, tanto na parte inferior, quanto nas laterais e é proporcional à área da placa, à condutividade térmica do isolamento e da estrutura de madeira, e inversamente proporcional à espessura do isolamento. A equação 4.7 expressa as perdas de energia por condução.

$$\dot{Q} = \frac{k}{L}A(T_P - T_b) \quad (4.7)$$

no qual T_P e T_b são as temperaturas da placa e temperatura próxima à parede externa da estrutura.

A energia perdida por radiação térmica, que é aplicável a todo corpo que estiver a uma temperatura superior a zero Kelvin, é expressa pela equação 4.8 e é função da emissividade (ε) da superfície, da área da placa (A_P).

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon_P A_P \sigma (T_P^4 - T_V^4) \quad (4.8)$$

No cálculo da energia perdida por radiação, Swinbank,(1963) apresentou uma forma alternativa, utilizando a temperatura de céu $T_{céu}$ no lugar da temperatura ambiente T_{amb} , como mostrado na equação 4.9:

$$T_{céu} = 0,0552T_{amb}^{1,5} \quad (4.9)$$

Fazendo um balanço de energia em um volume de controle, indicado na Figura 9, constituído pela estrutura do coletor, obtem-se.

$$\dot{Q}_{acumulado} = \dot{Q}_{entra} - \dot{Q}_{sai} + \dot{Q}_{transformado} \quad (4.10)$$

onde a taxa de calor transformado é nulo, pois não há geração de energia.

Substituindo-se a taxa de energia acumulada, as taxas de energia recebidas e perdas, a equação do balanço de energia pode ser escrita na forma da equação 4.11:

$$m c_p \frac{dT}{dt} = \eta_{\text{opt}} R_{\text{SOL}} A_P + \varepsilon_P A \sigma (T_P^4 - T_V^4) + h_{\text{CON}} A_P (T_P - T_V) + (1 - \alpha_P) R_{\text{SOL}} A_P$$

Na equação 4.11, há 2 propriedades: a absorvidade e a emissividade da placa absorvedora e um coeficiente de transferência de calor entre placas planas, além da temperatura do céu, que precisa ser determinada.

Por se tratar de um novo material, a absorvidade e a emissividade são desconhecidos. Embora haja correlação para o coeficiente de transferência de calor por convecção h_{CON} e para a temperatura do céu, essas correlações possuem erros. Dessa forma, o uso direto da equação 4.11 é praticamente inadequada. Para solucionar esse impasse, a equação pode ser escrita na forma,

$$m c_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{sol}} \cdot A \cdot \tau_V \cdot \alpha_P - K_1 \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) \quad (4.12)$$

na qual os termos referentes às perdas de calor foram agrupadas em um único termo K_1 , ou coeficiente global de perdas de calor do aparato experimental.

Com as medições iniciais de temperatura, os valores para os diferentes materiais foram próximos, caracterizando o K_1 como praticamente o mesmo para todas as superfícies, já que as três superfícies estavam submetidas às mesmas condições.

Quando a placa atinge o regime permanente, as placas absorvedoras permanecem a uma temperatura constante, que representa a temperatura de estagnação.

O coeficiente K_1 foi determinado, para a placa composta de Tinox, no instante em que o sistema entra em regime permanente e a equação do balanço de energia passou a ser definida como a equação 4.12:

$$\frac{dT}{dt} = 0$$

$$\dot{Q}_{\text{sol}} \cdot A \cdot \tau_V \cdot \alpha_P - K_1 \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) = 0 \quad (4.12)$$

Determinado o valor de K_1 utilizando a absorvidade do Tinox, as perdas para as superfícies formadas por CRFO e FCTO também teriam o mesmo valor, pois as três superfícies estavam expostas às mesmas condições. O passo seguinte foi,

utilizando o valor de K_1 calculado, obter o valor da absorvidade das superfícies propostas através da equação 4.12 para os intervalos em que o sistema estava em regime permanente. Os dias de medição em que não foi possível obter um regime estacionário, devido à oscilação da temperatura da placa, foram descartados.

$$\alpha_P = \frac{K_1 \cdot A_P \cdot (T - T_\infty)}{\dot{Q}_{sol} \cdot A_P \cdot \tau_V} \quad (4.13)$$

4.6 Infravermelho e Raman

Os procedimentos experimentais para caracterização das superfícies CRFO e FCTO seguiram o padrão adotado para este tipo de caracterização, onde foi utilizada a pastilha de KBr como janela nas medidas e o uso das superfícies em pó.

Os espectros foram obtidos através de um espectrofotômetro FT-IR, PERKIN-ELMER, Spectrum One para o caso do infravermelho. As amostras foram preparadas sob a forma de pastilhas de KBr.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O procedimento para o estabelecimento das superfícies, a partir dos compostos CRFO e FCTO, obteve êxito, pois foi possível conseguir uma boa aderência desses compostos sobre o substrato de cobre. Além disso, a simplificação do processo de obtenção por *screen-printing*, frente à eletrodeposição, que é uma técnica que exige mais variáveis de controle e de elaboração de banhos, pode ser considerada uma vantagem, pois recai sobre menores custos de processamento da superfície.

A Figura 10 mostra o espectro de transmissão dos óxidos precursores dos compostos, onde estão identificadas as bandas de transmissão na faixa de 400-600 cm^{-1} .

Nas Figuras 11 e 12, bandas de absorção são percebidas pelo estiramento da ligação Cr-O em 580 cm^{-1} , além da já reconhecida Fe-O. De acordo com a literatura, Teixeira *et al* (2001), este tipo de efeito é responsável por uma boa absorção de energia neste comprimento espectral.

A Figura 13 mostra o espectro de absorção no infravermelho, evidenciando que os números de ondas no valor de 480 cm^{-1} , indicam um estiramento ativo no infravermelho, devido à ligação Fe-O, para o caso do FCTO e indicados na Figura. Isto pode ser um bom indício de que a presença destes tipos de metal favorece a absorção de energia.

As Figuras 14-16 mostram os resultados do espalhamento Raman, caracterizado para o FCTO, o CRFO e FCTO/CRFO o comprimento de onda (532nm) refere-se a uma estrutura policristalina. Compostos à base de ferro, geralmente, apresentam ruídos no espalhamento Raman, dificultando a identificação.

As bandas de absorção em 299 cm^{-1} , 412 cm^{-1} e 659 cm^{-1} , indicadas na Figura 14, possivelmente caracteriza o FCTO como uma estrutura policristalina isoestrutural α - Fe_2O_3 como descrito por Lübbe *et al* (2010).

A banda de absorção em 641 cm^{-1} , mostrada na Figura 14 possivelmente ocorre devido ao estiramento simétrico de vibração Ti-O (ZHENG *et al*, 2003). De acordo com Balachandran *et al* (1982) há possibilidade de também encontrar-se a banda de estiramento simétrico de Ti-O em 639 cm^{-1} , porém como em ambos os casos não foi relatada a precisão da medida, existe a possibilidade dos autores estarem identificando a mesma banda de absorção.

A Figura 15 apresenta bandas de absorção em 245cm^{-1} , 299cm^{-1} e 659cm^{-1} , que pode indicar uma possível presença da hematita $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ isoestrutural ao CRFO como descrito por Lübbe *et al* (2010).

A Figura 16 apresenta bandas de absorção em 299cm^{-1} , 412cm^{-1} e 659cm^{-1} , que pode indicar uma possível presença da hematita $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ isoestrutural à mistura CRFO/FCTO como descrito por Lübbe *et al* (2010).

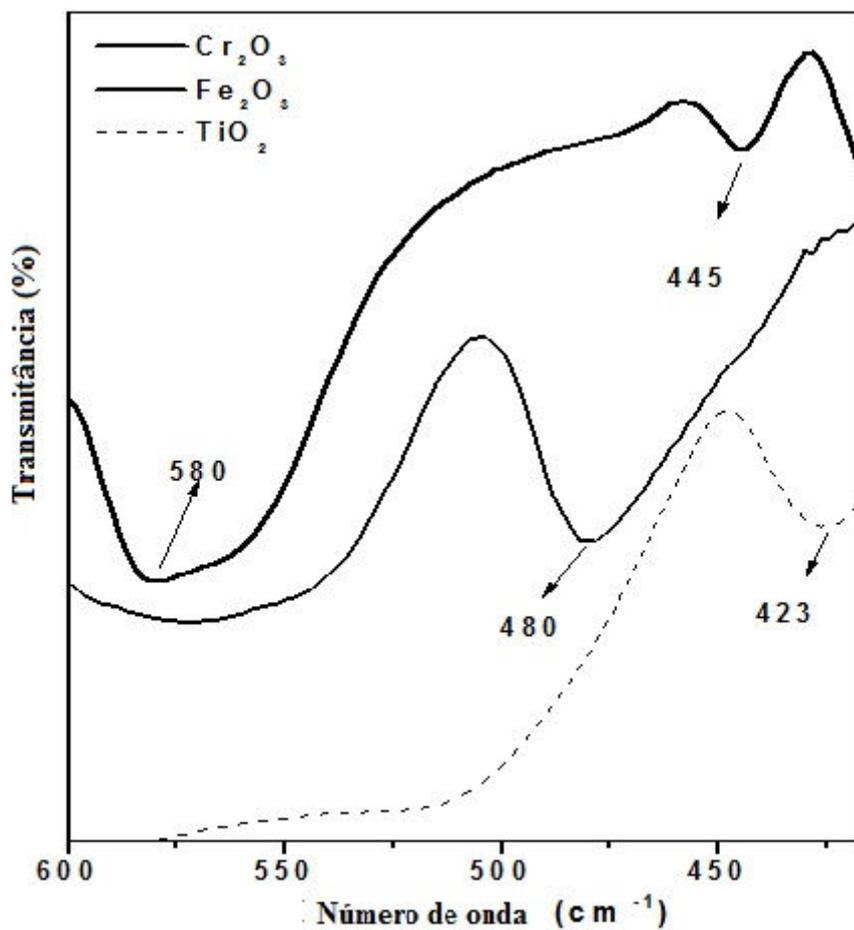


Figura 10 - IR dos óxidos precursores dos compostos

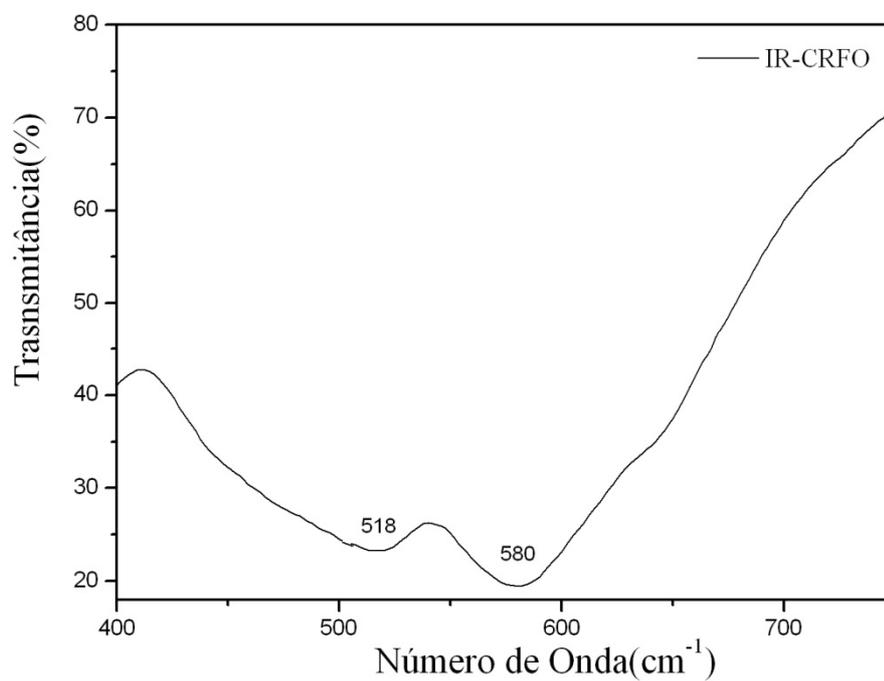


Figura 11- Infravermelho do CRFO

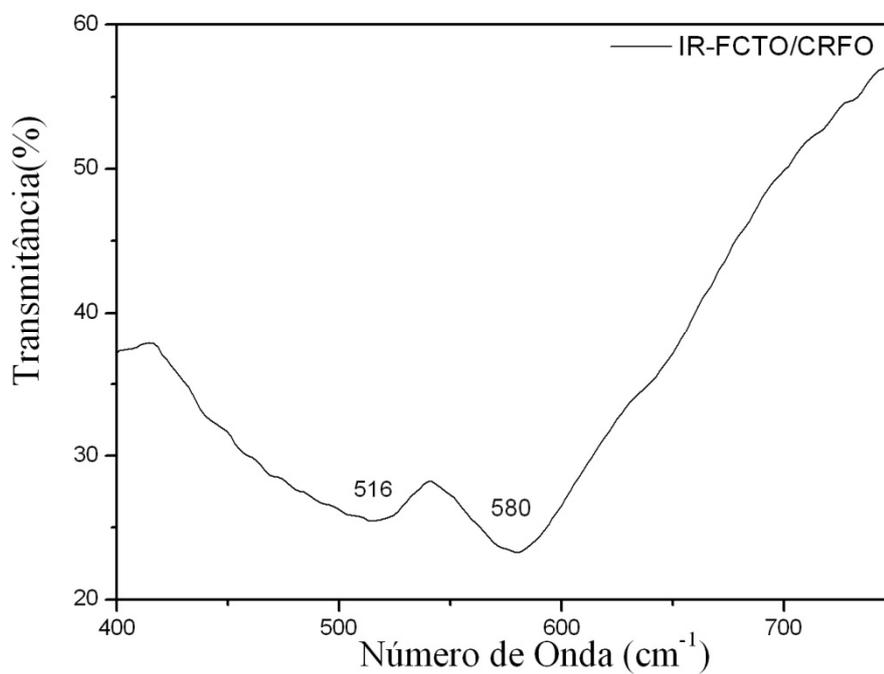


Figura 12 - Infravermelho da mistura CRFO/FCTO

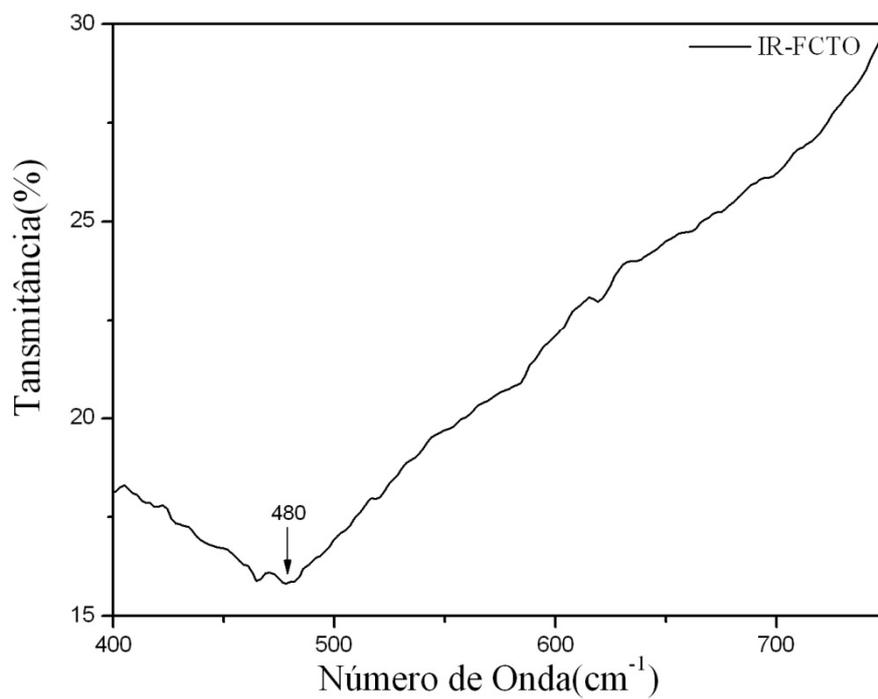


Figura 13 - Infravermelho do FCTO

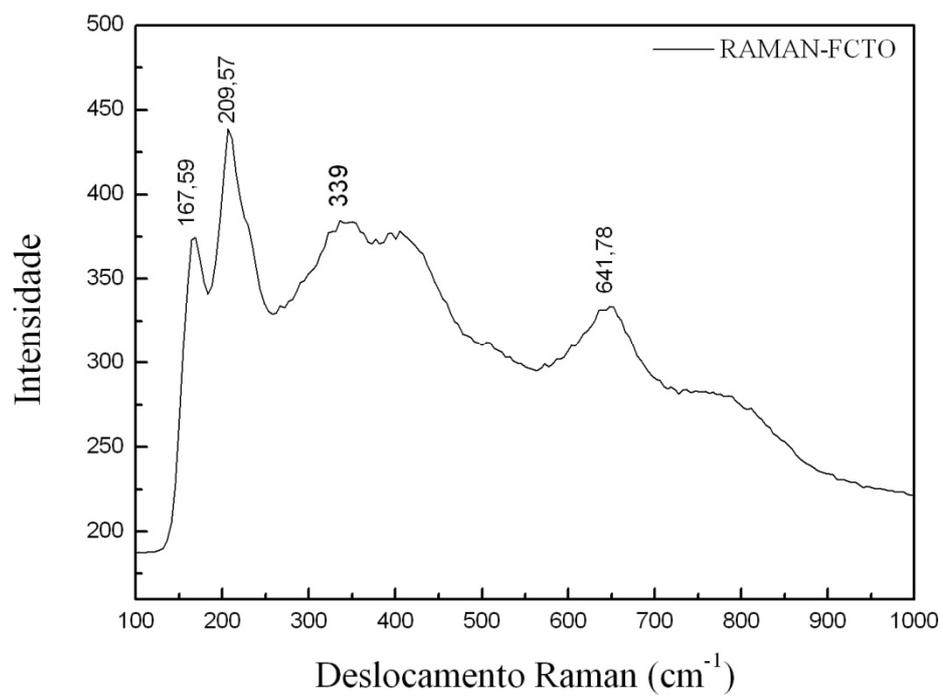


Figura 14 - Raman do FCTO

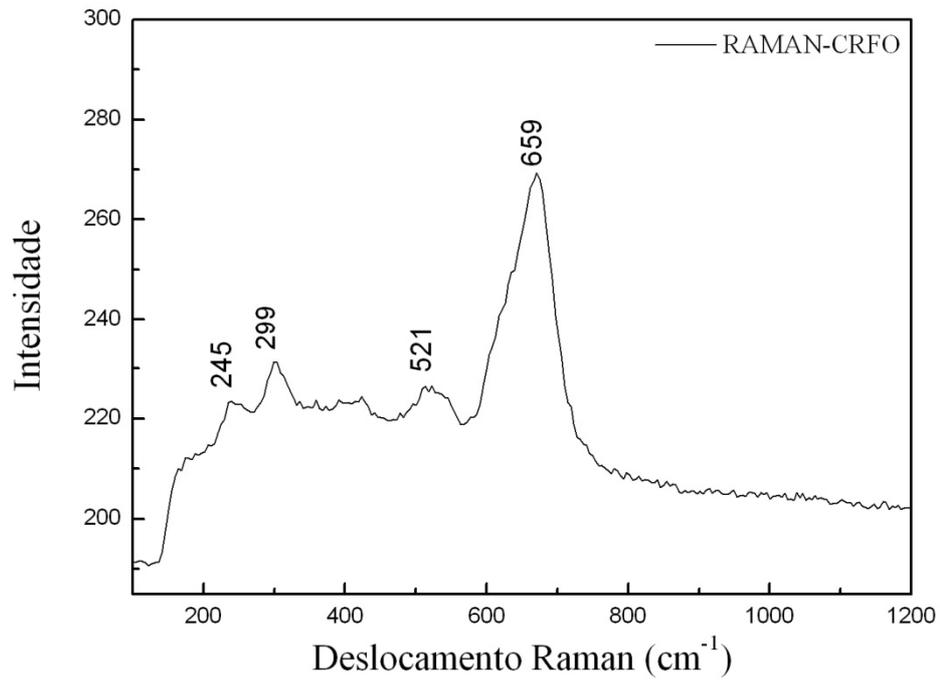


Figura 15 - Raman do CRFO

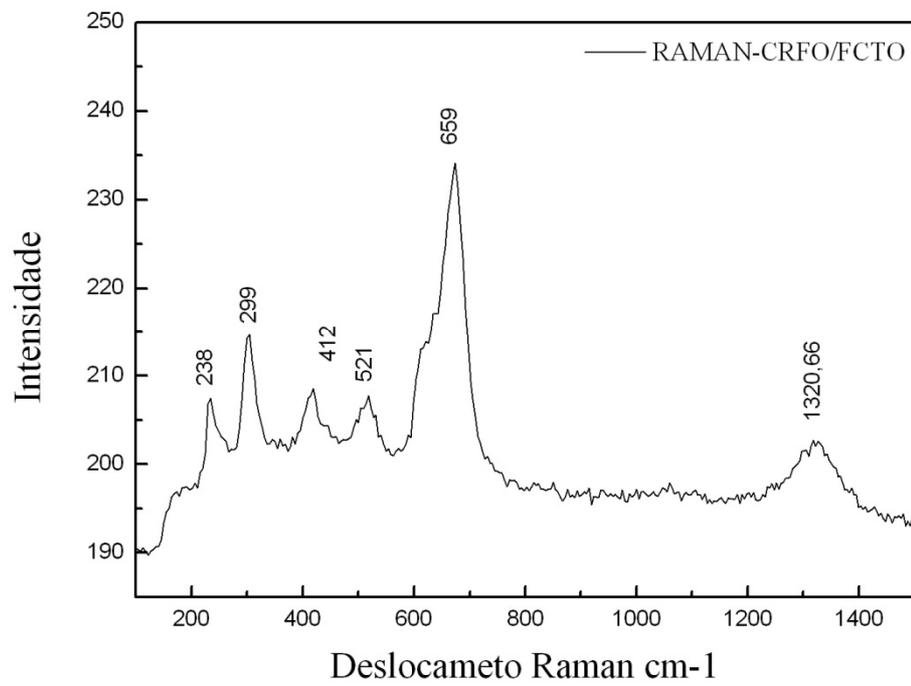


Figura 16 - Raman da mistura CRFO/FCTO

Para que se pudessem obter maiores valores de temperatura, não deveria haver interferência da cobertura de vidro, ou seja, o vidro teria que ter um baixo teor de ferro em sua composição. A Figura 17 mostra o gráfico da transmitância do vidro para diferentes comprimentos de onda, medido em um simulador solar com lâmpada de xenon de 400W. Foi encontrado uma transmitância média de 0,882 para o tipo de vidro temperado utilizado na cobertura do aparato experimental.

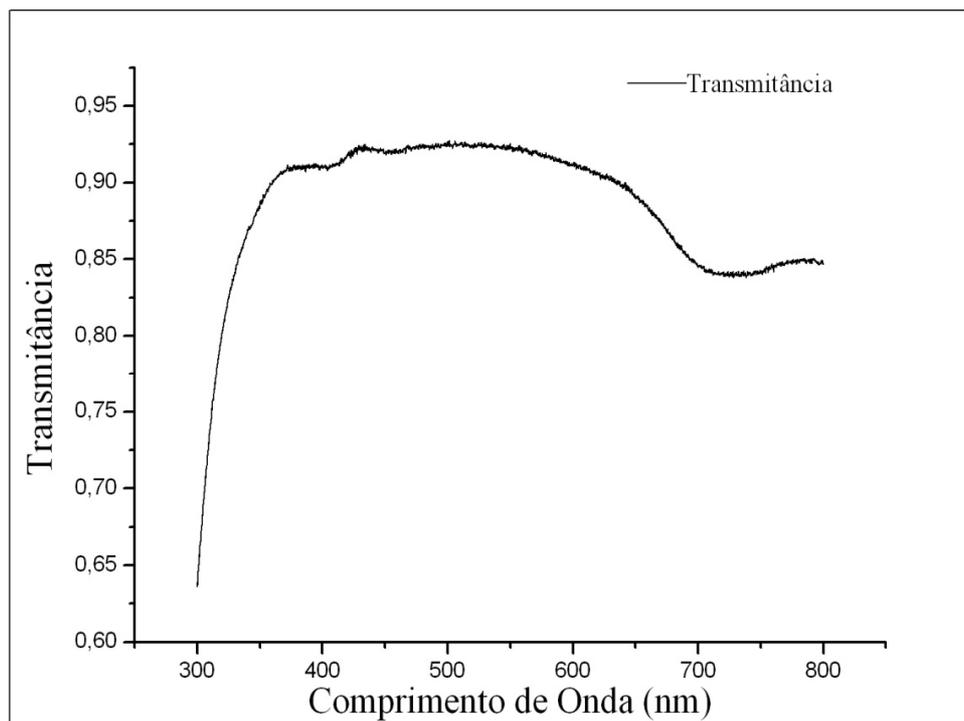


Figura 17-Transmitância do vidro

As Figuras 18, 19 e 20 mostram as medições de temperatura nas superfícies estudadas para três dias, nas quais as médias de radiação global foram de 710 W/m², 753 W/m² e 650 W/m², respectivamente.

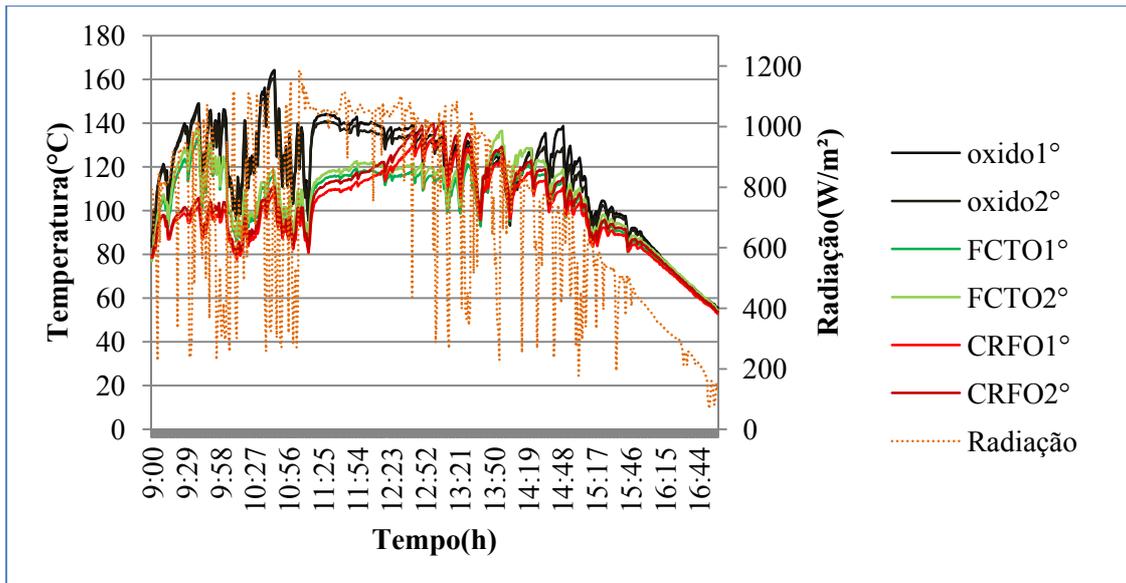


Figura- 18 Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia
09/03/2010

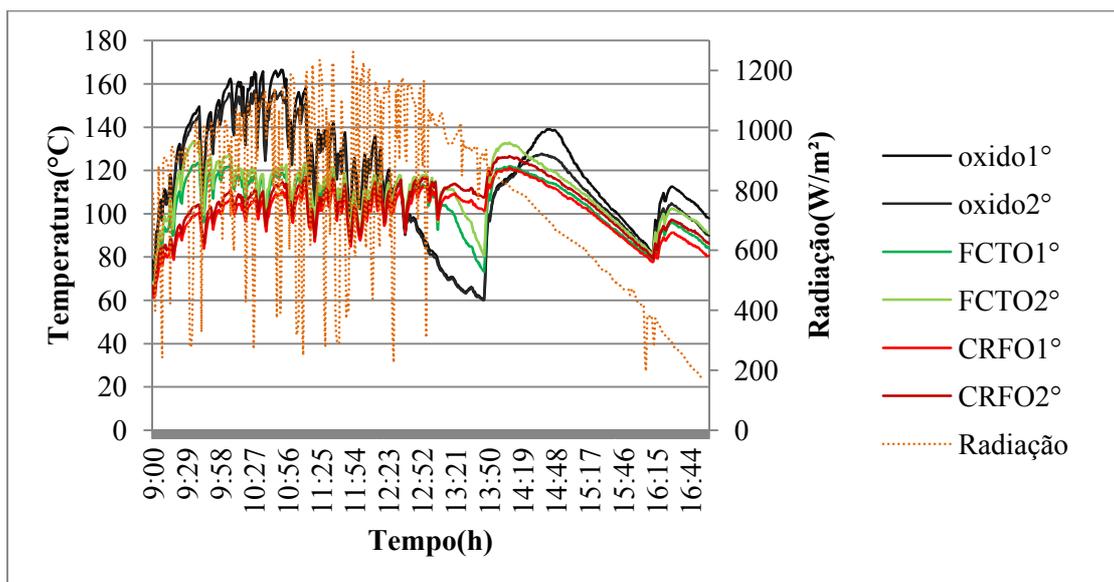


Figura 19- Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia
10/03/2010

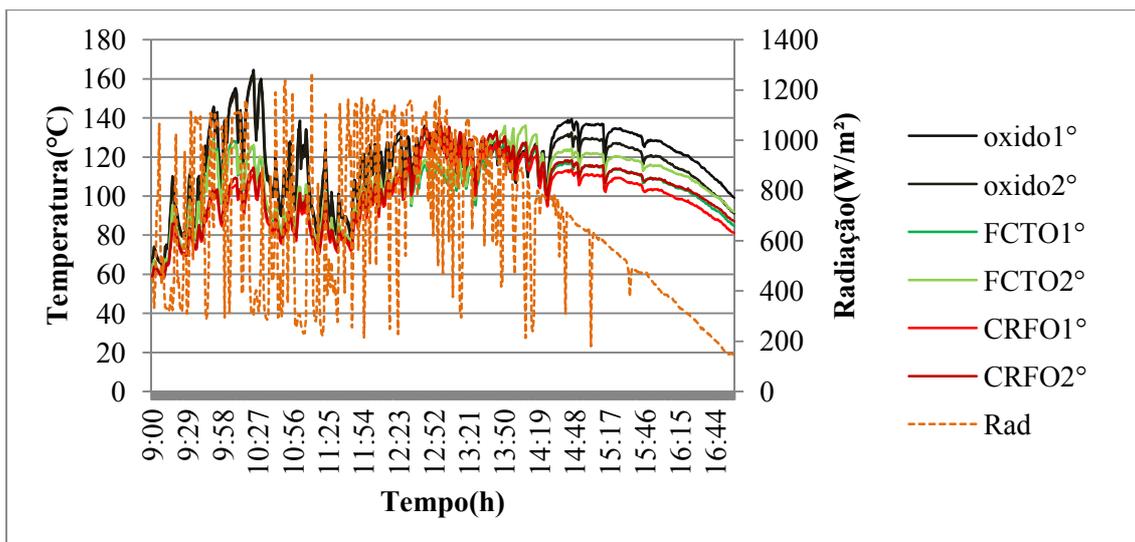


Figura 20- Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia
11/03/2010

Nesta pesquisa, o óxido metálico comercial (TINOX) apresentou, em quase todos os horários de teste, temperaturas de valores mais elevados que os das superfícies formadas por FCTO e CRFO.

A medição dos valores das superfícies mostrou bons resultados, considerados promissores para a continuidade do trabalho.

A superfície formada por CRFO obteve melhor desempenho que a superfície formada por FCTO, atingindo temperaturas mais próximas em relação ao referencial que é o óxido metálico utilizado comercialmente.

As superfícies seletivas podem ser utilizadas como uma alternativa, pois o procedimento para obtenção é simples e os resultados quanto ao valor de temperatura aproximam-se da superfície comercializada internacionalmente.

Os cálculos dos valores da absorvidade média, para as superfícies formadas por CRFO e por FCTO, foram feitas nos dias indicados na Tabela 3 e as curvas de temperatura observadas nas Figuras 34 – 36. Pode-se observar a importância dos resultados obtidos para o caso do CRFO, com um valor médio da absorvidade ($\alpha = 0,79$) para os dias de medição considerados. Esse resultado se aproxima dos valores obtidos por Katzen (2005), para um filme de silício-carbono ($\alpha = 0,84$) com espessura de 300nm.

Os resultados obtidos para a superfície formada por FCTO apresentam um valor médio da absorvidade $\alpha = 0,74$, valores menores em relação ao Tinox e ao CRFO.

O valor médio de $K_1 = 9,18$, calculado para o aparato a partir de dados de propriedades de superfícies conhecidos, está coerente com os valores comerciais (bons coletores $K_1 = 4,5$)

Tabela 3 - Valores médios da absorvidade do CRFO e do FCTO

Absortividade/dia de coleta dos dados	α_{CRFO}	α_{FCTO}
24/09/2010	0,78	0,72
15/10/2010	0,79	0,73
18/11/2010	0,80	0,76

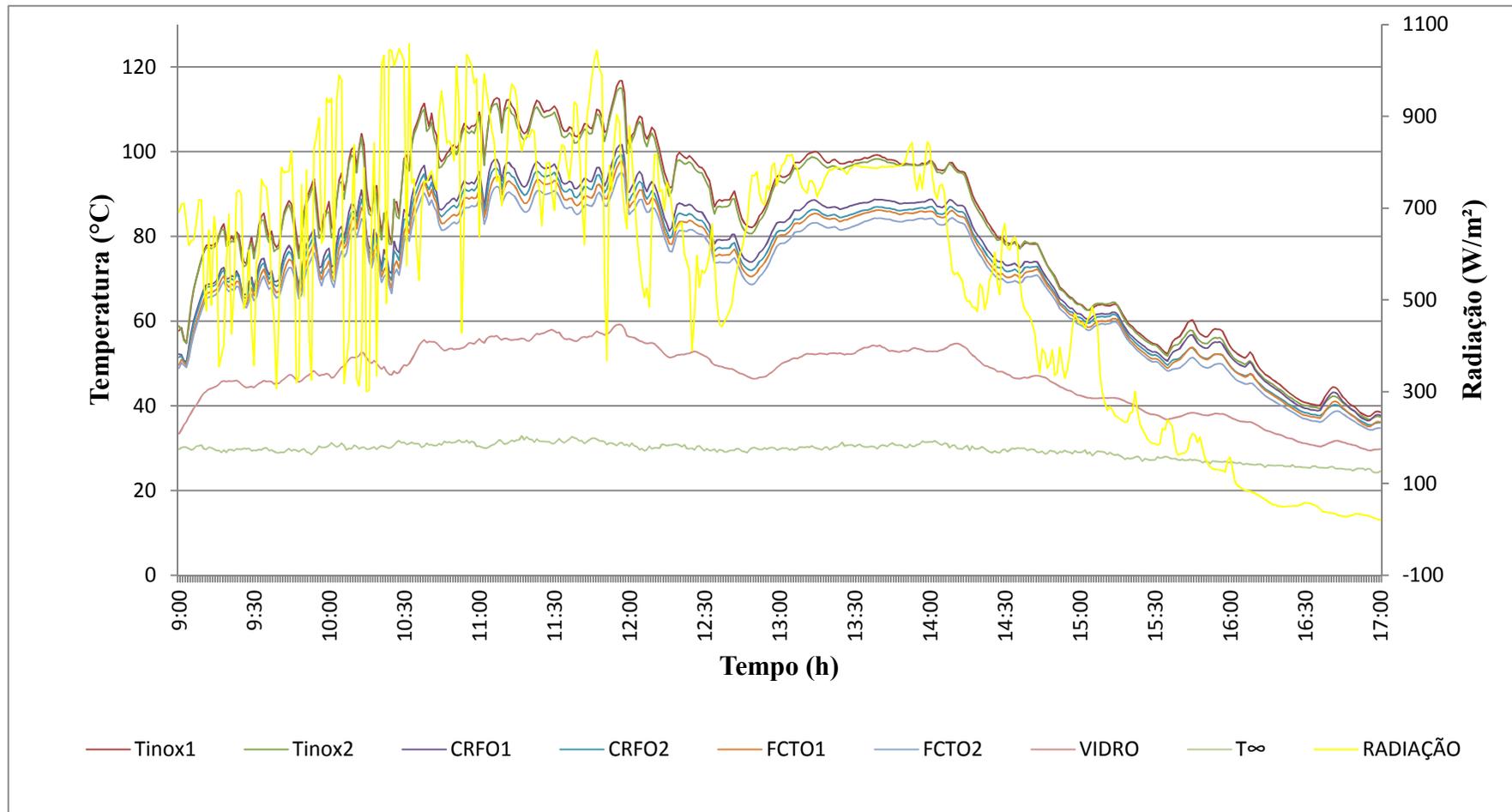


Figura 21 - Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 18/11/2010

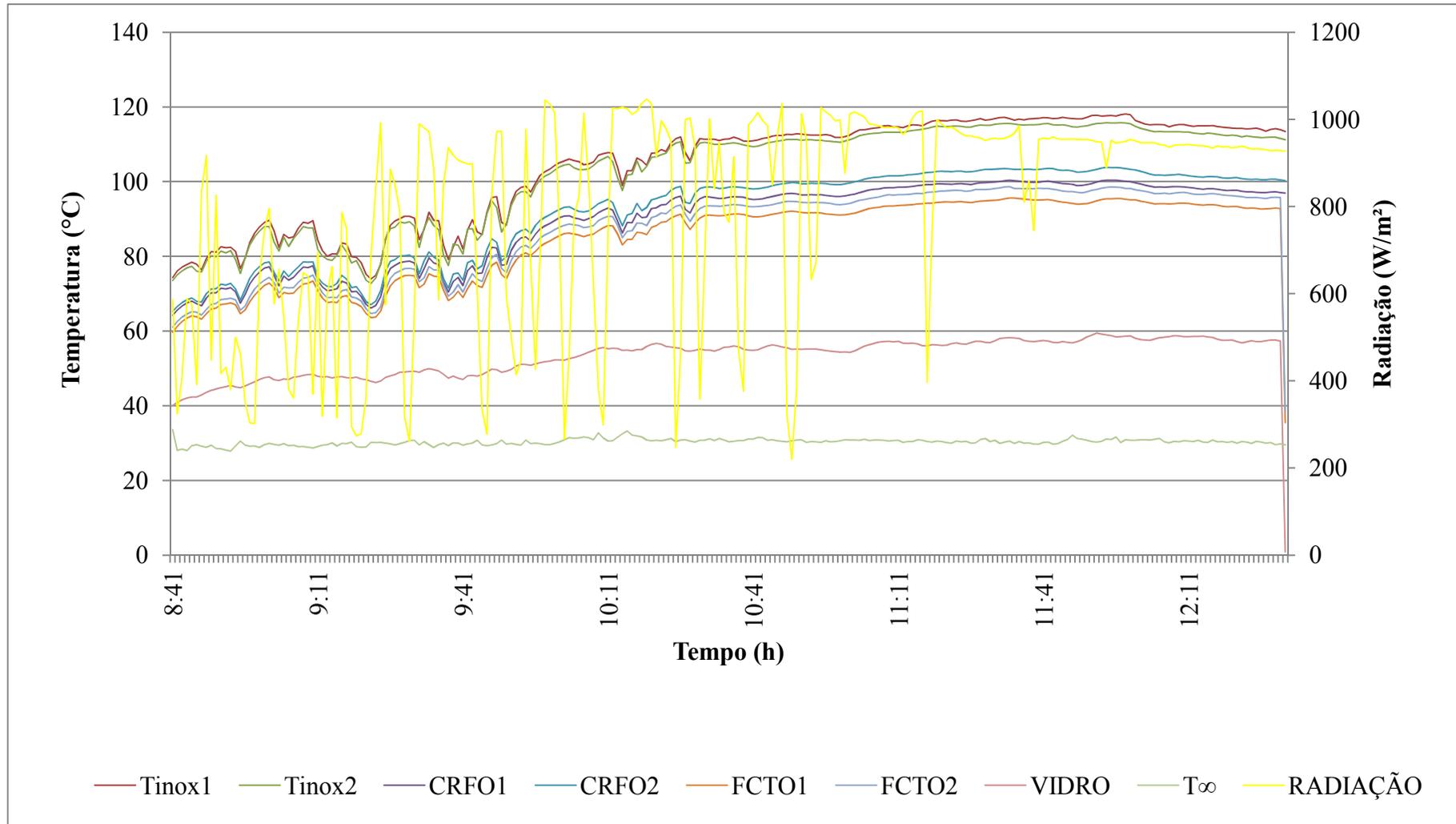


Figura 22 - Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 15/10/2010

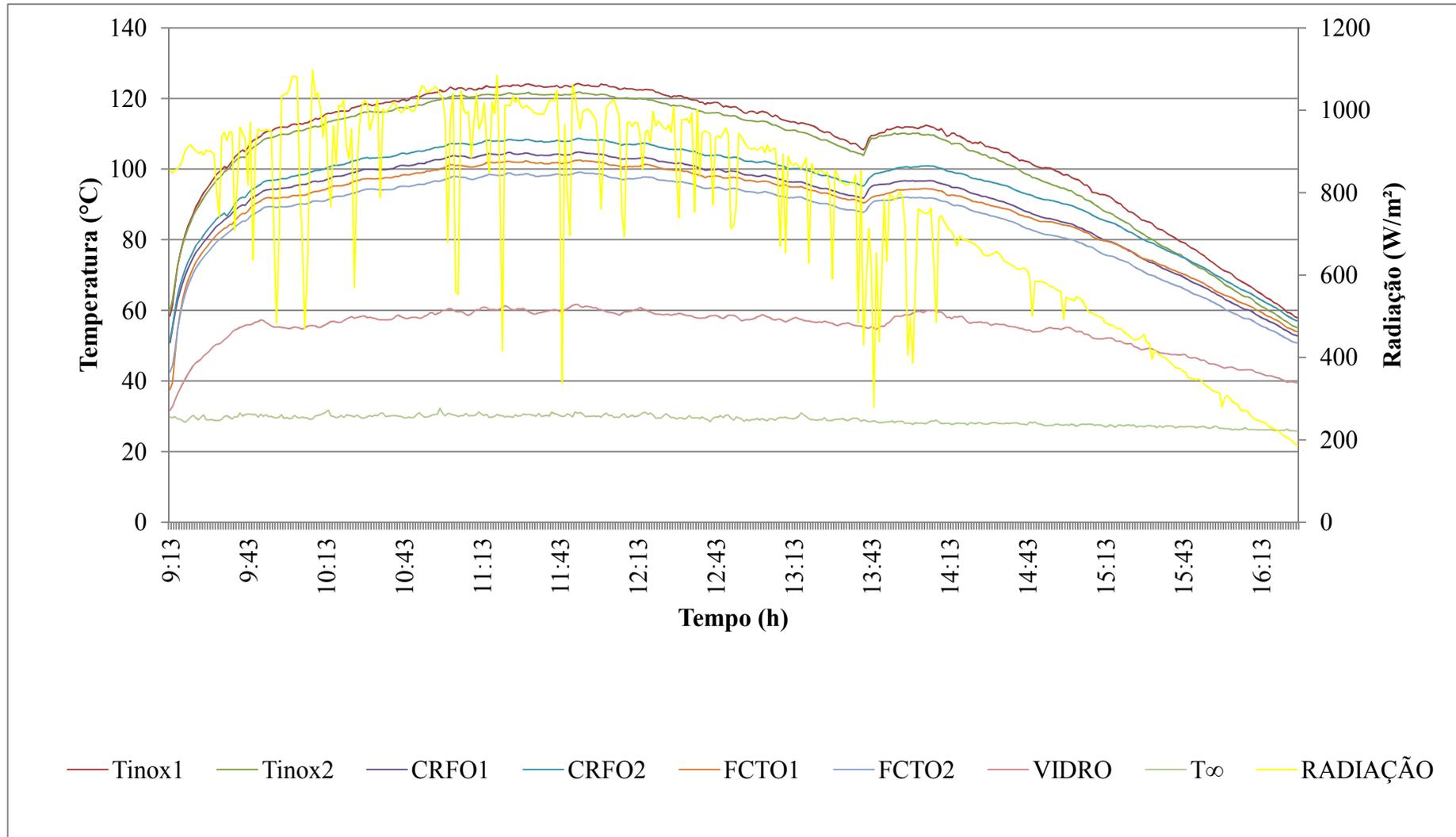


Figura 23 - Comparação entre os valores das temperaturas das superfícies no dia 24/09/2010.

6 CONCLUSÕES

O procedimento para obtenção das superfícies a partir dos compostos CRFO e FCTO, obteve êxito, pois foi possível conseguir uma boa aderência dos compostos acima no substrato de cobre. Além da simplificação do processo de obtenção por *screen-printing*, frente à eletrodeposição, que é uma técnica que depende de mais variáveis de controle e elaboração de banhos, assim, a técnica desenvolvida pode ser considerada uma vantagem, pois recai sobre menores custos de processamento da superfície.

O desenvolvimento de um procedimento para obtenção de uma superfície seletiva nova, utilizando-se a técnica *screen-printing*, mostrou um resultado inédito e inovador. Apoiados nas técnicas de caracterização IR e Raman, o CRFO e o FCTO foram, comprovadamente, satisfatórios como possíveis superfícies seletivas para coletores solares térmicos. Assim, CRFO e FCTO se constituem como possíveis absorvedores da radiação solar dentro de um vasto campo espectral. Os testes foram realizados utilizando-se a própria energia solar incidente natural, o que imprime uma maior veracidade aos resultados obtidos pelo coletor de dados. O sistema montado para comparação dos resultados foi fabricado de maneira a dar as mesmas condições de medida a cada uma das superfícies seletivas. Os valores de absorvidade obtidos são compatíveis com aqueles comumente encontrados em superfícies vendidas no mercado. A superfície que mais se aproximou do TINOX foi a constituída por CRFO.

Os compostos CRFO e FCTO apresentam potencialidade para uso como superfícies seletivas em coletores solares térmicos. De acordo com as técnicas de caracterização utilizadas neste trabalho (Infravermelho, Raman), foram observados nas superfícies seletivas a base de CRFO e FCTO bandas ativas no infravermelho que representaram estiramento das ligações Fe-O, Ti-O, Cr-O. Possivelmente nestes pontos ocorrerão as absorções de energias na região do visível e infravermelho, responsáveis pela conversão da radiação em calor. A aderência dos compostos CRFO e FCTO à superfície do cobre foi obtida de maneira satisfatória, porém torna-se necessário um aprimoramento da técnica de deposição do revestimento de modo a obter uma superfície mais homogênea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALACHANDRAN, U; EROR, N. G; **Laser-induced Raman scattering in calcium titanate.** Solid State Communications, 1982, 44(6), 815–818.

CARMO, D. T; VASCONCELOS, V. C; PINTO, D. P. **Energia Solar Térmica: Disseminação da Utilização Através de Coletores de Baixo Custo e Material Reciclável.**

CUOMO, J. J, ZIEGLER, J. F. and WOODALE, J.M. 1975, Appl, Phys. Lett, 26, 557.

DUFFIE, J. A; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of the thermal processes.** 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

Energia Solar Térmica: Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação, 2004.

FREIRE, F. N. A. **Síntese e Estudo das Propriedades Estruturais e Dielétricas de Matrizes Cerâmicas Compósitas (CMC) Baseadas em: $(\text{Fe}_{1/4} \text{Cu}_{3/8} \text{Ti}_{3/8})_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_{5/8} \text{Cr}_{3/8})_2\text{O}_3 / \text{Pb}(\text{Fe}_{1/2} \text{Nb}_{1/2}) \text{O}_3 / \text{CaTiO}_3$ Para Uso em Dispositivos Eletrônicos.** 2008.168p. Tese (Doutorado em Química Orgânica e Inorgânica) – UFC, Fortaleza

GOLAM MOWLA CHOUDHURY, **Selective Surface for efficient Solar Thermal Conversion.** Bangladesh Renewable Energy Newsletter. **Page No. 1** Vol. 1 No. 2, Vols. 2 & 3 July 2000 - Dec. 2002.

GOLDNER, R. B; HASKAL, H. M. **Indium Tin Oxide – Coated Silicon as a Selective Absorber.** Applied Optics, 14 (10):2328. Oct. 1975.

GOMES, C. A. S. **Estudo Comparativo de Superfície Seletiva Para Coletores Solares.** 2001. 65p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – UFC, Fortaleza.

GRANQVIST, C. G; HUNDERI. O . **Selective Absorption of solar energy in ultrafine metal particles: Model Calculation.** J Appl. Phys., vol 50, nº 2, February, 1979.

HOLLANDS, K. G. T. **Directional Selectivity, Emittance, and Absorbance Properties of Vee Corrugated Specular Surfaces.** [revista] Solar Energy, 7(3), July-Sept. 1963.

HOLLANDS, K. G. T; UNNY, T. E; RATHBY, G.D. AND KONICEK, L. **Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers.** Transactions of the American society of Mechanical Engineers, Journal of Heat Transfer, 98, 189-193. 1976

HORNSTROM, S.E.; KARLSSON S.E.; ROOS, A.; WESTESTRANDH,B; KAMF,A. Solar Energy Mater. 9 (1984). 367.

INCROPERA, F. P; DE WITT, P. D. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** New York: John Wiley & Sons, 1996.

KATZEN, D; LEVY E; Yitzhak Mastai, **Thin films of silica-carbon nanocomposites for selective solar absorbers.** Applied Surface Science 248 (2005) 514-517.

KRENZINGER, A. **Superfícies Seletivas para Conversão Térmica Solar – Óxido de Cobre Sobre Cobre.** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - UFRGS, Porto Alegre.

KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor.** 3º edição, Ed Edgard Blücher, São Paulo. 1977.

LAMPERT,C.M.; Solar Energy Mater. 7 (1979). 319.

LüBBE, M ; GIGLER, A. M; STARK, R. W; MORITZ, W; **Identification of iron oxide phases in thin films grown on Al₂O₃(0 0 1) by Raman spectroscopy and X-ray diffraction.** Surface Science 604 (2010) 679-685.

MASSEY, M.J.; BAIER, U.; MERLIN,R.; WEBER, W.H., Phys. Rev. B: Condens. Matter 41 (1990) 7822.

NIKLISSON G.A.; GRANQVIST C.G.; MATER .J.; Sci. 18 (1983). 3475.

QUASCHNING, Vouker. **Understanding Renewable Energy Systems**. [S.l.] 3rd ed. Earthscan, 2005. [livro]

REIS, L. B; FADIGAS, E. A. A; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável**. 1º rd Ed. Manole. , 2005

RICHTMYER, F. K ; KENNAD, E. H. **Introduction to Modern Physics**, 4rd.ed, McGraw-Hill. New York, 1947).

ROCHA, H. H. B. **Estudo das Propriedades Estruturais e de Transporte dos Compósitos Magneto-Dielétrico: $[\text{Fe}_{5/8} \text{Cr}_{3/8}]_x - [(\text{Fe}_{1/4} \text{Cu}_{3/8} \text{Ti}_{3/8})_2\text{O}_3]_{100-x}$** . 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – UFC, Fortaleza.

ROCHA, H. H. B.; *et al.* **Structural properties study of the magneto-dielectric composite: $\text{Cr}_{0.75}\text{Fe}_{1.25}\text{O}_3$ (CRFO): $\text{Fe}_{0.5}\text{Cu}_{0.75}\text{Ti}_{0.75}\text{O}_3$ (FCTO)**. Journal of Alloys and Compounds 481 438–445, 2009.

SERAPHIN, B. O. **Chemical Vapor Deposition Research for Fabrication on Solar Energy Convertors**. Semi-annual Progress Report, 1974. Optical Sciences Center University of Arizona.

SHIM, S.H; DUFFY, T.S, Am. Mineral. 87 (2002) 318.

SWINBANK, W. C. **Long-Wave Radiation Form Clear Skies**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 89. 1963.

TEIXEIRA, V.; SOUSA, U. E.; COSTA, M.F.; NUNES, C.; ROSA, L.; CARVALHO, M.J.; COLLARES-PEREIRA, M.; ROMAN, E.; GAGO, J. **Spectrally selective composite coatings of Cr-Cr₂O₃ and Mo-Al₂O₃ for solar energy applications.** Thin Solid Films 392 (2001). 320-326.

ZHENG, H; *et al.* **Raman spectroscopy of B-site order–disorder in CaTiO₃-based microwave ceramics.** Journal of the European Ceramic Society 23 2653–2659. 20

ANEXO - A

Neste anexo são apresentados os princípios físicos da radiação solar incidente sobre a superfície da Terra. As informações foram retiradas de livros textos, comumente usados em disciplinas como: Transmissão de calor e massa, Sistemas de energia renováveis. Coletores solares térmicos....

A. 1 Radiação Solar

A constante solar é a quantidade de energia que incide numa superfície unitária, normal aos raios solares, por unidade de tempo, numa região situada a uma distância média entre a terra e o sol. Este parâmetro se torna importante para um estudo comparativo entre o potencial existente e o quanto realmente é utilizado dessa quantidade de energia.

A constante solar possui um valor $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$, sofrendo pequena variação em torno desse valor devido à trajetória elíptica da terra em torno do sol.

A energia coletada ao longo de um dia pode ser calculada a partir da resolução de uma integral do produto do cosseno do ângulo zenital pelo fluxo de radiação direta no plano normal à direção dos raios solares, onde o ângulo zenital é o ângulo entre os raios solares e a vertical.

Para o cálculo da radiação incidente no plano de dispositivos solares, radiação global, é preciso o cálculo da posição relativa do sol em relação ao plano do coletor a cada instante. Esse cálculo é determinado a partir do conhecimento dos ângulos azimute da superfície, ou seja, do ângulo formado entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção norte-sul, bem como do ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal e essa radiação global será composta da radiação direta e da radiação difusa.

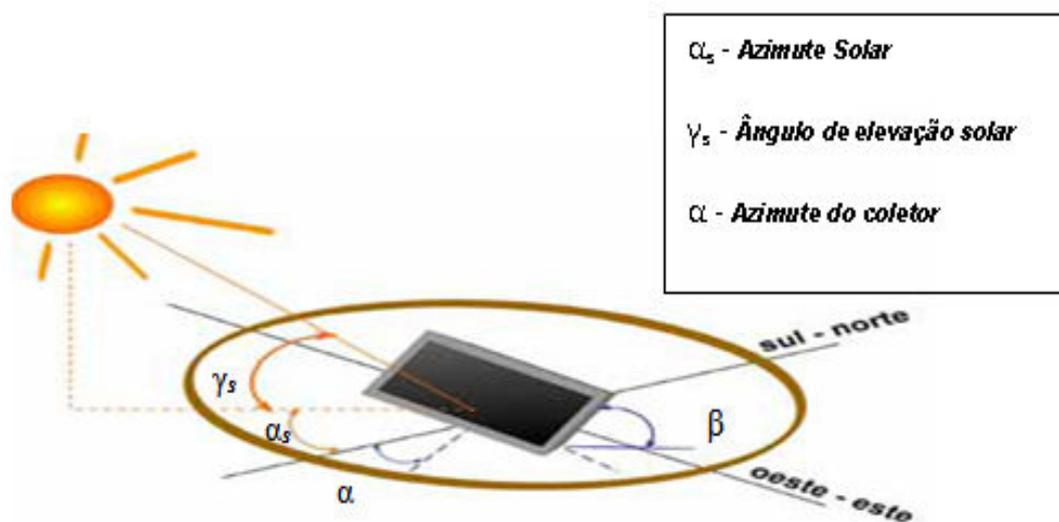


Figura 24- Ângulos para posicionamento do sol

A radiação solar é formada pela radiação solar direta E_{dir} proveniente do sol, que atinge a terra sem qualquer mudança de direção e pela radiação difusa E_{dif} ; esta chega à superfície da terra através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. A radiação difusa inclui também a radiação refletida pela superfície terrestre. A soma da radiação difusa e direta equivale à radiação solar global E_G .

$$E_G = E_{dir} + E_{dif} \quad (3.1)$$

Esta equação, caso não sejam mencionadas outras condições, refere-se à radiação sobre uma superfície horizontal.

Quando o Sol se situa verticalmente, acima de uma determinada localização, a radiação efetua o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando o Sol se encontra em um ângulo mais baixo, a radiação percorre um caminho mais longo, sofrendo uma maior absorção e difusão e estando disponível uma menor intensidade de radiação. O fator “Massa de Ar” (MA) define-se como a medida do número de vezes que o caminho percorrido pela luz solar até a superfície da terra é maior que a espessura de uma atmosfera. Usando-se esta definição com o Sol numa posição vertical ($\gamma_s = 90^\circ$), obtém-se um valor de $MA = 1$. A Equação 3.2 representa como obter o valor de MA.

$$MA = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (3.2)$$

Nas Figuras 2 e 3, estão representados dois dispositivos utilizados para a medição da intensidade de radiação solar, o Piranômetro, que mede a radiação global, e o Piroheliômetro, que mede a radiação direta, respectivamente.



Figura 25 - Piranômetro para medir radiação global



Figura 26 - Piroheliômetro para medir radiação direta

A. 2 Coletores Solares Térmicos

A seguir, são descritas algumas características dos coletores solares térmicos de placa plana, tubo evacuado e concentradores. Estes tipos de coletores são os mais utilizados em sistemas solares térmicos.

A. 2.1 Coletor de Placa Plana

O coletor plano consiste de quatro elementos principais:

- Estrutura – necessária para sustentação dos demais sistemas.
- Superfície absorvedora – responsável pela absorção da radiação solar incidente e pela transmissão desse calor para o fluido de trabalho.
- Coberta – responsável pela redução do calor perdido pelo sistema absorvedor, permitindo a passagem da radiação de curto comprimento de onda e retendo radiação com comprimentos de onda maiores e também uma recuperação do calor perdido pelo absorvedor através de uma reflexão interna.
- Isolamento – responsável pela redução da perda de calor por condução e convecção para o meio externo.

De acordo com o fluido de trabalho e aplicação, podem-se observar diferentes tipos de coletores. A Figura 4 representa alguns desses coletores.

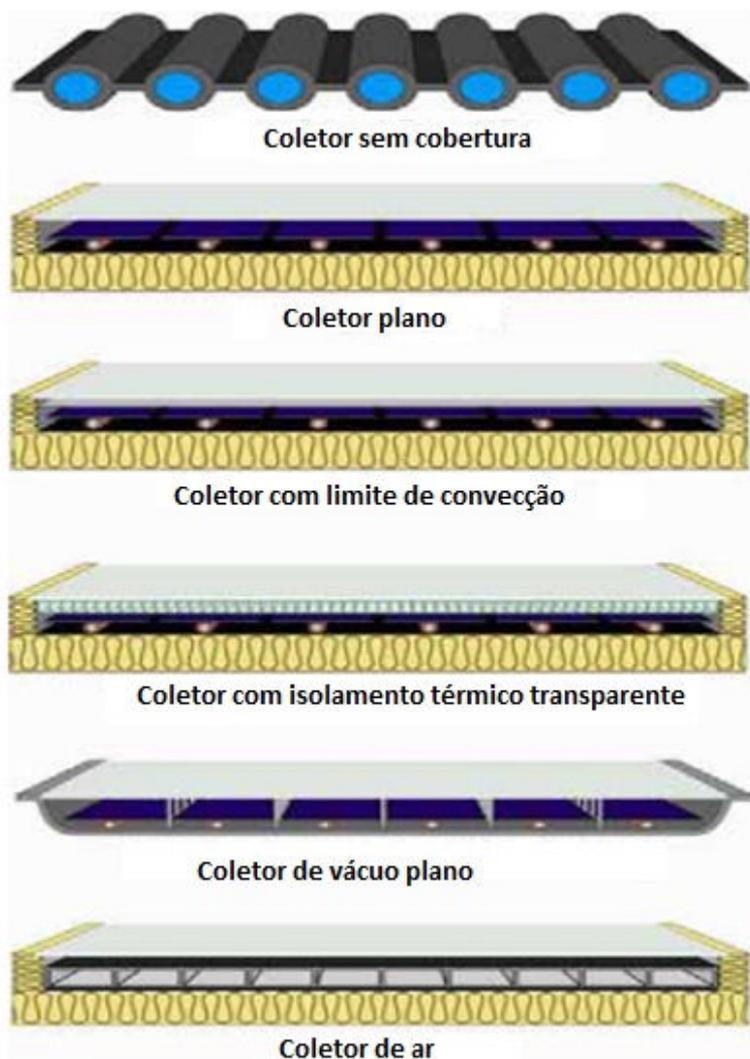


Figura 27 - Tipos de coletores de placa plana (SOLAR TÉRMICO, 2004)

A. 2.2 Coletor de Tubo Evacuado

Os coletores de tubo evacuado são compostos por dois tubos de vidro como mostrado na Figura 5. O tubo externo possui alta transmitância e mínima refletância, para o comprimento de onda da radiação solar, de forma a permitir que a radiação incidente sobre ele alcance o tubo interno. O tubo interno é recoberto por uma superfície seletiva com propriedades de alta absorvidade na região do ultravioleta e mínima emissividade e refletividade. Durante o processo de fabricação, os dois tubos são fundidos em suas extremidades e durante esta fusão são retirados os gases entre os dois tubos para a formação de vácuo. Este vácuo é responsável pelo isolamento da superfície seletiva, evitando perdas de calor por condução e convecção.

Em comparação com os coletores solares de placa plana, os coletores de tubo evacuado possuem a vantagem de um melhor isolamento e, conseqüentemente, uma maior eficiência devido à menor superfície absorvedora, principalmente em lugares frios onde a perda de calor em coletores de placa plana é bastante elevada.

Os coletores de tubo evacuado são associados em paralelo e inclinados de forma a melhor captar a energia solar. A inclinação e a orientação variam de acordo com a latitude do local. A eficiência dos coletores depende de vários fatores; contudo, o principal fator é a quantidade média diária de radiação incidente (insolação).

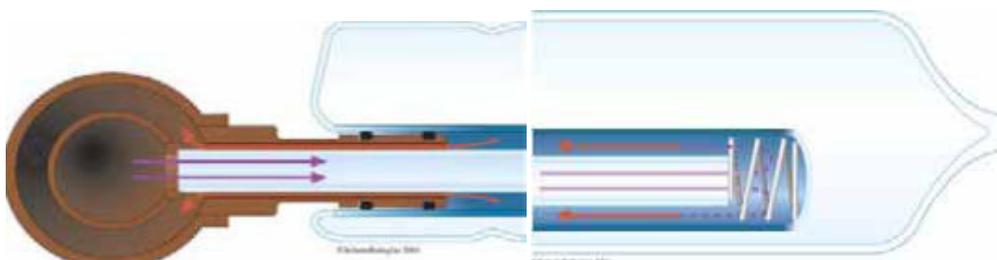


Figura 28 - Tubo coletor evacuado (SOLAR TÉRMICO, 2004)

A. 2.3 Concentrador Solar

De forma a reduzir as perdas térmicas existentes nos coletores planos, foi desenvolvida uma tecnologia baseada na redução da área de absorção, em comparação com a área de captação da radiação solar. Desta forma, reduzem-se as perdas térmicas, que são proporcionais à área do absorvedor.

O modo de funcionamento destes coletores acontece pela concentração da radiação solar na placa absorvedora, através de um sistema duplo de absorção da radiação. Assim, tanto a radiação que incide diretamente no absorvedor quanto a radiação refletida pelo espelho parabólico são absorvidas, ou seja, o concentrador absorve a mesma quantidade de radiação com uma área de cobertura menor. A Figura 6 mostra um concentrador parabólico.



Figura 29 – Concentrador solar (SOLAR TÉRMICO, 2004)

A. 3 Placa Absorvedora para Coletores Solares

O componente fundamental de um coletor plano é a placa absorvedora. Esta consiste numa chapa metálica com uma absorvidade elevada, ou seja, uma chapa que apresenta boas características de absorção de calor (fabricada, por exemplo, sobre um substrato de alumínio ou cobre, numa superfície unitária ou em várias placas), com revestimento preto-baço ou com revestimento seletivo e tubos de transferência de calor (usualmente, o material utilizado é o cobre) ligados ao coletor (SOLAR TÉRMICO, 2004). Desta forma, quando a radiação solar atinge o absorvedor esta é parcialmente absorvida e parcialmente refletida. Da absorção da radiação é gerado calor, que é transferido da chapa metálica para os tubos ou canais de escoamento. Através desses tubos de escoamento, o fluido de transferência térmica transporta o calor para os tanques de armazenamento.

Os coletores servem para converter a maior quantidade de radiação solar disponível em calor e transferir este calor com o mínimo de perdas para o resto do sistema. Assim, o absorvedor é projetado para ter a maior capacidade de absorção possível e a menor emissividade térmica possível. Obtém-se o aumento na eficiência da

conversão térmica através do tratamento da chapa metálica com um revestimento de pintura preto-baço ou seletivo.

A Figura 7 ilustra esquematicamente o aumento da eficiência de conversão térmica da superfície, em função do aumento da absorvidade.

Ao contrário de um revestimento preto-baço, um revestimento seletivo é formado por uma estrutura com diferentes camadas que melhoram a conversão de radiação solar de onda-curta, minimizando as perdas.

As Figuras 8 a 12 representam alguns tipos de placas absorvedoras para coletores planos.

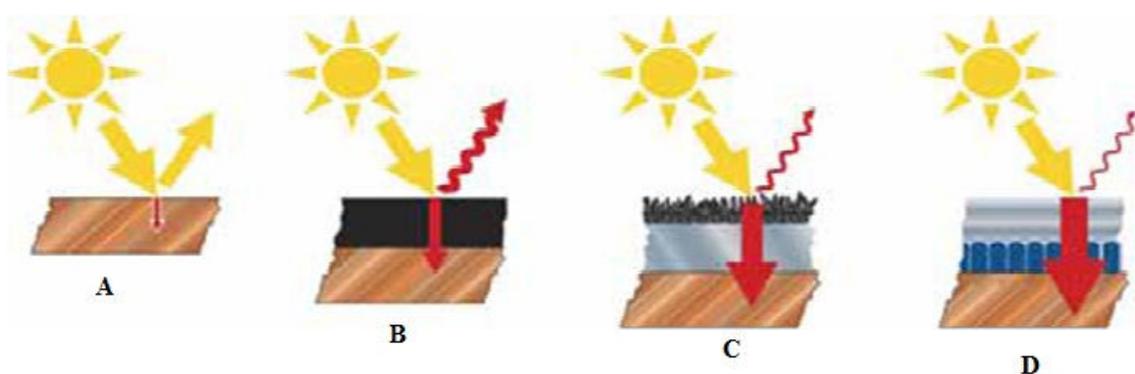


Figura 30 – A = Chapa Cobre: $\alpha = 5\%$; B = Preto-baço: $\alpha = 15\%$; C = Revestimento seletivo: $\alpha = 85\%$; D = TiNOx: $\alpha = 95\%$ (SOLAR TÉRMICO, 2004)



Figura 31- Absorvedor de alumínio roll-ond (SOLAR TÉRMICO, 2004)



Figura 32- Faixa absorvedora de alumínio com tubos de cobre prensados (SOLAR TÉRMICO, 2004)



Figura 33- Absorvedor com sistema de tubos prensados entre duas chapas (SOLAR TÉRMICO, 2004)



Figura 34- Absorvedor com um sistema de tubos soldados numa chapa de metal (SOLAR TÉRMICO, 2004)

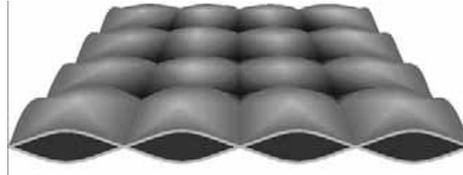


Figura 35 - Absorvedor de aço inoxidável no qual o fluido de trabalho passa através de toda a superfície (SOLAR TÉRMICO, 2004)

A. 4 Intensidade da Radiação

A radiação emitida em todas as direções é definida como intensidade de radiação (I), que pode ser expressa como a quantidade de energia radiante emitida por unidade de área (A), por unidade de tempo (t), para um ângulo sólido unitário, por unidade de área de superfície emissora projetada normal a direção θ mostrada na Figura 16.

Para ilustrar o conceito de intensidade, seja “ dq/dA_r ” a taxa de energia radiante, por unidade de tempo e por unidade de área da superfície, que passa dentro do ângulo sólido diferencial representado por “ dw ”, inclinado um ângulo θ em relação a normal da superfície emissora (KREITH, 1977). A intensidade é então expressa por

$$I = \frac{d^2q}{dA_n dw \cos\theta} \quad (3.5),$$

onde o ângulo sólido diferencial “ dw ” é definido como a razão entre o elemento de área dA_n e o quadrado do raio da esfera. Assim sendo,

$$dw = \frac{dA_n}{r^2} = \frac{rd\theta r \sin\theta d\phi}{r^2} \quad (3.6)$$

substituindo e integrando no hemisfério, tem-se:

$$- \quad - \quad (3.7)$$

A intensidade pode ser definida como intensidade espectral “ I ”, que se refere à radiação em um intervalo d , em torno de um comprimento de onda λ , ou como intensidade total “ I ”, que se refere à radiação para todos os comprimentos de onda.

$$(3.8)$$

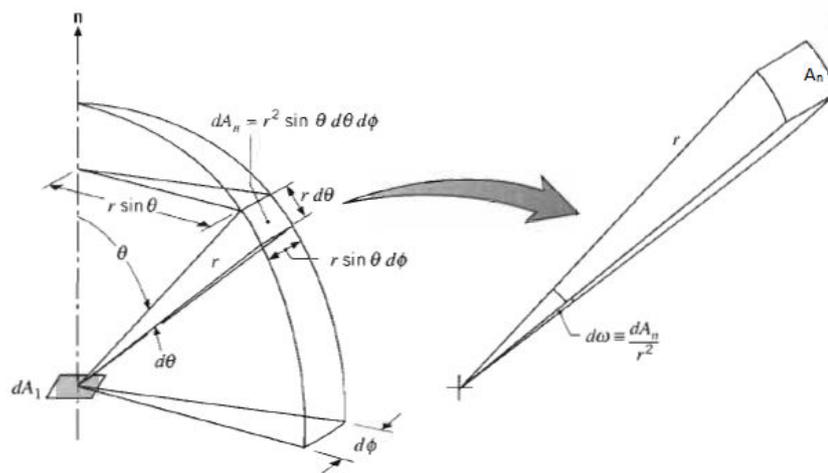


Figura 36 - Ângulos sólidos subentendido por dA_n em um ponto dA_1 em coordenadas esféricas (INCOPERA e DEWIT, 2003)

A. 5 Radiação do Corpo Negro

O corpo negro é definido como uma superfície ideal, uma superfície que serve como referencial, como um padrão de comparação para corpos radiantes reais.

Um corpo negro é uma superfície que é considerada como um emissor perfeito, ou seja, nenhum corpo emite mais radiação que um corpo negro; este absorve toda a energia radiante que chega até ele e também emite toda a radiação incidente, podendo-se concluir que os valores da absorvidade e da emissividade de um corpo negro são $\alpha = \varepsilon = 1$. Esta radiação emitida por um corpo negro independe da direção, se comportando como um emissor difuso perfeito.

Na natureza, mesmo que não exista um corpo negro, existem aproximações, por exemplo, uma espessa camada de carbono preto pode absorver 99% da radiação térmica incidente (DUFFIE, BECKMAN, 1980).

A intensidade total radiante para todos os comprimentos de onda e o poder emissivo de um corpo negro em um meio com índice de refração n são relacionados pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\pi I_b = E_b = \sigma T^4 \quad (3.9)$$

A. 6 Lei de Planck e Lei do Deslocamento de Wein

A radiação na região do espectro eletromagnético aproximadamente 0,2 a aproximadamente 1000 μm é chamada de radiação térmica e é emitida por toda substância em virtude de sua temperatura. A distribuição do comprimento de onda da radiação emitida por um corpo negro é mostrada pela Lei de Planck (RICHTMYER e KENNARD, 1947):

$$E = \frac{2\pi C_0^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc_0}{\lambda kT}) - 1]} \quad (3.10)$$

onde $h=6,62606876 \times 10^{-34}$ J.s é a constante de Planck e $k=1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann e C_0 a velocidade da luz no vácuo.

Na Figura 16, pode-se observar que a distribuição espectral de um corpo negro tem um valor máximo de acordo com a temperatura, e que o comprimento de onda correspondente a esse valor máximo λ_{max} depende da temperatura. A natureza

dessa dependência, por se tratar de um ponto máximo, pode ser obtida pela diferenciação da equação da lei de Planck em relação a um comprimento de onda λ igualando a zero, como mostrado na equação 3.4:

$$\frac{dE_{\lambda,b}(\lambda,T)}{d\lambda} = 0 \quad (3.11)$$

Dessa forma, a Lei do Deslocamento de Wein pode ser escrita como as posições dos pontos máximos e estes são representados pela linha pontilhada da Figura 17.

$$\lambda_{max}T = 2897,8\mu mK \quad (3.12)$$

A. 7 Equação de Stefan-Boltzmann

A lei de Planck expressa a distribuição espectral da radiação de um corpo negro; entretanto, a energia total emitida por um corpo negro pode ser obtida por integração para todos os comprimentos de onda, como mostrado na equação 3.13:

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (3.13)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e é igual a $5,66 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.

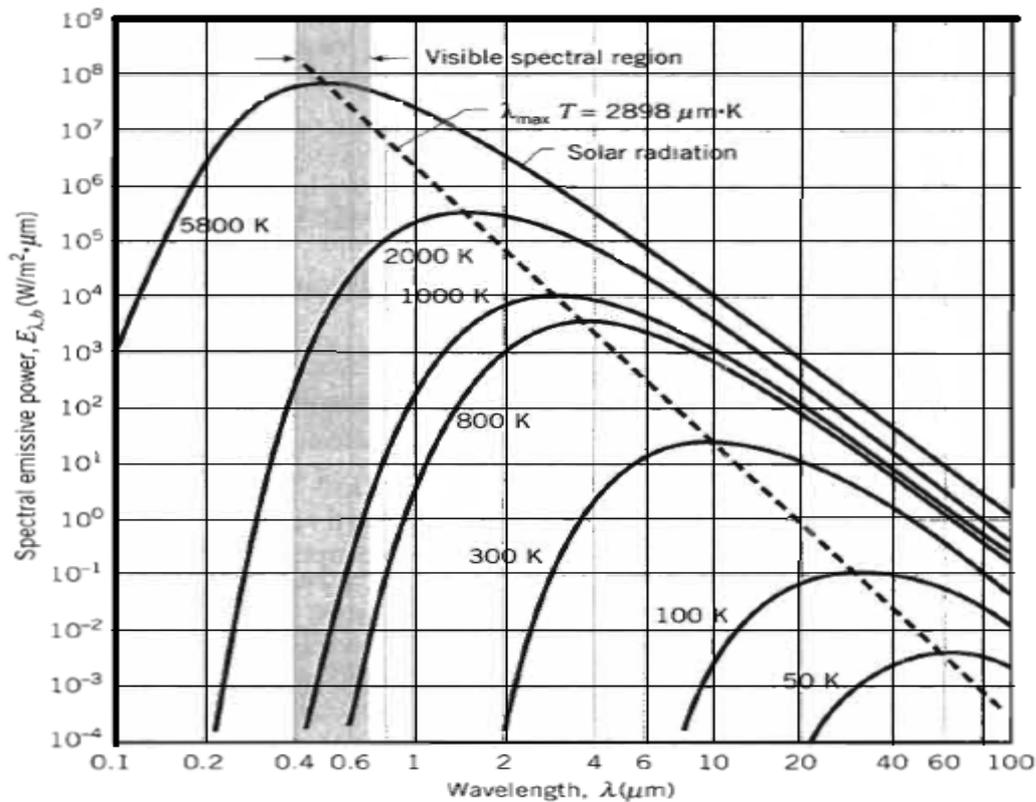


Figura 37 - Distribuição espectral da radiação de um corpo negro (INCROPERA e DEWITT, 2003)

A. 8 Propriedades Radiantes de Superfícies

As propriedades de superfície constituem-se em um importante parâmetro para a determinação da seletividade de absorvedores de radiação solar. Essas propriedades são discutidas a seguir.

A. 8.1 Emissividade

A emissividade ϵ de uma superfície é como a razão entre a energia radiante emitida por uma superfície real e a energia radiante emitida por um corpo negro, à

mesma temperatura e com as mesmas dimensões, como mostrado na equação 3.14. Considera-se que a emissividade de um corpo negro tem valor 1.

$$\varepsilon = \frac{\text{Energia emitida por um corpo real}}{\text{Energia emitida por um corpo negro}} \quad (3.14)$$

A determinação da emissividade de um material depende de algumas condições tais como temperatura, ângulo de emissão e comprimento de onda da energia radiante emitida, e é frequentemente medida experimentalmente em uma direção normal à superfície emissora e como função do comprimento de onda. Para cálculo da potência total radiante emitida por uma superfície é necessário incluir todas as direções e comprimentos de ondas.

A emissividade direcional espectral $\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$ de uma superfície a temperatura T é definida como a razão entre a radiação emitida no comprimento de onda λ e na direção θ e ϕ e a radiação emitida por um corpo negro nos mesmos valores de T e λ .

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) \equiv \frac{I_{\lambda,\phi}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (3.15)$$

A emissividade total direcional $\varepsilon_{\lambda\theta}(\theta, \phi, T)$ de uma superfície a temperatura T é definida como a razão entre a radiação média emitida, considerando a contribuição de todos os comprimentos de onda λ e na direção θ e ϕ , e a radiação emitida pelo corpo negro no mesmo valor de temperatura.

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) \equiv \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda}{\frac{\sigma T^4}{\pi}} \quad (3.16)$$

A emissividade espectral hemisférica $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ de uma superfície a temperatura T é definida como a razão entre a radiação média emitida no comprimento de onda λ , considerando a contribuição de todas as direções θ e ϕ e a radiação emitida pelo corpo negro nos mesmos valores de T e λ .

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \varepsilon_{\lambda}(\theta, \phi) I_{b,\lambda} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,\lambda} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.17)$$

A emissividade hemisférica total ε de uma superfície a temperatura T é definida como a razão entre a radiação média emitida, considerando a contribuição de todos os comprimentos de onda λ , e as contribuições de todas as direções θ e ϕ , e a radiação emitida por um corpo negro a mesma temperatura.

$$\varepsilon \equiv \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) I_{b,\lambda}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,\lambda} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda} \quad (3.18)$$

A. 8.2 Absortividade

A absortividade α de uma superfície é definida como a fração da radiação solar incidente que é realmente absorvida, ou seja, a razão entre a radiação absorvida e a radiação incidente sobre a mesma. A determinação da absortividade de uma superfície depende de alguns fatores tais como características da radiação incidente da fonte. A distribuição espectral da radiação incidente é independente da temperatura ou da natureza física da superfície absorvedora, a menos que a radiação emitida seja refletida em direção à superfície.

O valor da absortividade de um corpo negro é 1; ele absorve toda a radiação que incide sobre sua área.

A absortividade direcional espectral, $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi)$, mostrada na equação 3.19, de uma superfície é definida como a fração da intensidade espectral na direção θ e ϕ que é absorvida pela superfície.

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (3.19)$$

A absorptividade hemisférica espectral $\alpha_\lambda(\lambda)$ é definida como a fração da irradiação espectral que é absorvida pela superfície e está representada na equação:

$$\alpha_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (3.20)$$

Podendo ser também expressa na forma da equação 3.21:

$$\alpha_\lambda(\lambda) \equiv \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.21)$$

A absorptividade hemisférica total α é definida pela equação que representa a absorptividade para todos os comprimentos, ou seja, é a integração da equação 3.21.

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda} \quad (3.22)$$

Podendo ser também expressa pela equação 3.23.

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda} \quad (3.23)$$

A. 8.3 Refletividade

A refletividade ρ é definida como a razão entre a energia radiante refletida e a energia radiante incidente sobre a superfície em estudo. Entretanto, segundo Seigel (2002), sua definição específica pode assumir diversas formas, uma vez que essa

propriedade é inerentemente bidimensional. Ou seja, além de depender da radiação incidente, ela também depende da direção da radiação refletida.

A refletividade direcional espectral, $\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$ mostrada na equação, de uma superfície é definida como a fração da intensidade espectral na direção θ e ϕ que é refletida pela superfície.

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,\text{ref}}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)} \quad (3.24)$$

A refletividade hemisférica espectral $\rho_{\lambda}(\lambda)$ é definida como a fração da irradiação espectral que é refletida pela superfície e está representada na equação 3.25.

$$\rho_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,\text{ref}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (3.25)$$

$$\rho_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.26)$$

A refletividade hemisférica total ρ é definida pela equação que representa a refletividade para todos os comprimentos, ou seja, é a integração da equação 3.26.

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3.27)$$

Através da equação 3.26, a equação 3.27, para todos os comprimentos de onda, pode ser escrita como:

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.28)$$

A. 8.4 Transmissividade

A transmissividade τ de um material é definida como a parcela da radiação incidente que transpõe a superfície do material em estudo, ou seja, a razão entre a radiação que ultrapassa a superfície e a radiação incidente, como mostrado na equação 3.29.

$$\tau_{\lambda} = \frac{G_{\lambda,trans}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (3.29)$$

$$\tau = \frac{G_{trans}}{G} \quad (3.30)$$

A transmissividade total τ está relacionada com o componente espectral τ_{λ} através da equação 3.31.

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} G_{\lambda,trans}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3.31)$$

Substituindo a equação 3.29 na equação 3.31, a transmissividade total poderá ser definida como mostrada na equação 3.32.

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3.32)$$

A. 9 Lei de Kirchhoff

A lei de Kirchhoff define a relação entre emissividade e absorptividade de um corpo. Esta lei pode ter variações necessárias, impondo condições, dependendo da quantidade que se pretende trabalhar, quer seja espectral, hemisférica, direcional ou total.

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) \quad (3.33)$$

A. 10 Relação entre Absortividade, Emissividade e Refletividade

Quando se considera troca de calor entre corpos, existem três formas de perda de energia: ser refletida, ser transmitida e ser emitida. Logo, existe uma relação entre as propriedades emissividade, refletividade e transmissividade mostrada na equação 3.34.

$$\varepsilon + \tau + \rho = 1 \quad (3.34)$$

Considerando uma troca de calor entre um pequeno corpo opaco ($\tau=0$) e sua vizinhança, sob condições de equilíbrio térmico a uma temperatura T(K) e considerando a equação (lei de Kirchhoff), a equação 3.34 pode ser escrita como:

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho \quad (3.35)$$