



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

FELIPE PEREIRA RODRIGUES

OBTENÇÃO E ESTUDO DE UMA SUPERFÍCIE SELETIVA PARA COLETORES
SOLARES TÉRMICOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE GRANITO

FORTALEZA
2014

FELIPE PEREIRA RODRIGUES

OBTENÇÃO E ESTUDO DE UMA SUPERFÍCIE SELETIVA PARA COLETORES
SOLARES TÉRMICOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE GRANITO

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
2014

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

-
- R613o Rodrigues, Felipe Pereira.
 Obtenção e estudo de uma superfície seletiva para coletores solares térmicos a partir de resíduos de granito / Felipe Pereira Rodrigues. – 2014.
 42 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2014.
 Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.
 Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo de Aguiar Freire.
 Coorientação: Profa. Dra. Ana Fabíola Leite de Almeida.
1. Engenharia Mecânica. 2. Energia Solar. 3. Materiais. I. Título.

FELIPE PEREIRA RODRIGUES

OBTENÇÃO E ESTUDO DE UMA SUPERFÍCIE SELETIVA PARA COLETORES
SOLARES TÉRMICOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE GRANITO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para a
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Mecânica. Área de
Concentração: Processos, Equipamentos
e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

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

Prof.^a Dra. Ana Fabíola Leite Almeida (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus, e a minha amada
esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela motivação e cuidado durante todo o tempo. Aos meus pais e à minha esposa pelo carinho e incentivo.

Ao professor Nivaldo, pelo apoio e orientação e à professora Fabíola.

À Karine e à Aline, pela dedicação e esforço que foram muito importantes. Suas contribuições foram valiosas para o trabalho experimental.

Aos amigos Wanderson e Luana pelo companheirismo e amizade.

RESUMO

O uso de materiais alternativos com objetivo de substituir superfícies seletivas é uma tendência natural, pois geralmente se busca melhorias na eficiência das superfícies ao mesmo tempo em que se tenta diminuir os custos. Substâncias compósitas já são utilizadas na obtenção de algumas superfícies seletivas, no entanto, se for associado a estas características a possibilidade de utilizar resíduos que iriam ser descartados, conferindo aos mesmos um valor agregado, isso traria alguns benefícios, como uma possível redução de custos de fabricação. Desta forma, o presente trabalho propõe a obtenção e o estudo de superfícies seletivas para aplicações em coletores solares de placa plana de baixo custo originário do resíduo da indústria de granito. Foram estudadas três diferentes superfícies, duas delas foram obtidas no laboratório, a superfície a base de pó de granito e a superfície composta pela mistura de pó de granito e CRFO ($\text{Cr}_{0,75}\text{Fe}_{1,25}\text{O}_3$); e a terceira superfície foi uma superfície comercial, conhecida como TiNOX. Para a realização dos testes foi construída uma bancada experimental de madeira, de forma que fosse possível simular as condições de um coletor solar de placa plana. Os testes foram feitos em condição de estagnação, ou seja, não havia fluxo de água através de tubos no coletor. Através desse aparato experimental foi possível testar as três superfícies seletivas simultaneamente. Os testes de campo mostraram que a superfície composta por pó de granito foi a que atingiu as maiores temperaturas, com uma média de até 119 °C, enquanto a superfície obtida com uma mistura de pó de granito e CRFO chegou a temperatura média de 96 °C, já a superfície comercial atingiu uma média de 101 °C. As superfícies foram comparadas através de uma equação que fornece o coeficiente global de perda de energia térmica. Os menores coeficientes foram obtidos pela superfície de pó de granito.

Palavras-chave: superfície seletiva, coletor solar de placa plana, energia solar, pó de granito

ABSTRACT

The using of alternatives materials to replace selective surfaces is a natural trend, because it usually looks for improvements on efficiency of surfaces at the same time that it tries to reduce costs. Composites are already used on obtainment of some selective surfaces, however, if the possibility to use residue that would be discarded was associated to these characteristics, providing an added-value, it would brings some benefits like a possible reduction of manufacturing costs. Thus, this thesis proposes the obtainment and study of selective surfaces for flat plate solar collectors for low cost by using residue from granite industry. Three different surfaces was studied, two of them of obtained on the laboratory, one is granite powder made and the other is a surface composed by a mixture of granite powder and CRFO ($\text{Cr}_{0,75}\text{Fe}_{1,25}\text{O}_3$); the third surface is a commercial one, known as TiNOX. To perform the tests of the surfaces it was built an experimental stand, it allows simulating a solar collector conditions. The tests was performed in a stagnation condition, in other words, there wasn't any water flow inside tubes. Through this experimental apparatus it was possible to test the three surfaces simultaneously. The field tests showed that the highest temperatures were reached by granite powder surface, which reached an average temperature of 119 °C, while the granite powder and CRFO mixture surface reached an average of 96 °C. The TiNOX achieve an average temperature of 101 °C. The three surfaces was compared each other through an equation that gives a global heat loss coefficient. The granite powder surface was the one which achieved the lowest global heat loss coefficient.

Keywords: selective surface, flat plate solar collector, solar energy, granite powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema comparativo em forma de cubos da quantidade de energia disponível no planeta, a demanda anual global de energia e a irradiação solar anual.	12
Figura 2 – Perfil de absorbância de uma superfície seletiva ideal.....	16
Figura 3 – Granito Verde-Ubatuba.....	18
Figura 4 – Coletor solar térmico de placa plana – principais componentes.	20
Figura 5 – Esquema da bancada experimental.	26
Figura 6 – Coletor solar térmico experimental. Componentes e dimensões.	27
Figura 7 – Piranômetro	28
Figura 8 – Parâmetros de sinterização.....	29
Figura 9 – Modelo físico	31
Figura 10 – Dados do dia 30/05/2014	35
Figura 11 – Dados do dia 02/06/2014	36
Figura 12 – Dados do dia 03/06/2014	36
Figura 13 – Dados comparativos dia 30/05/2014.....	37
Figura 14 – Dados comparativos dia 02/06/2014.....	38
Figura 15 – Dados comparativos dia 03/06/2014.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das superfícies seletivas obtidas	29
Tabela 2 – Valores médios de temperaturas e radiação solar.....	36

SUMÁRIO

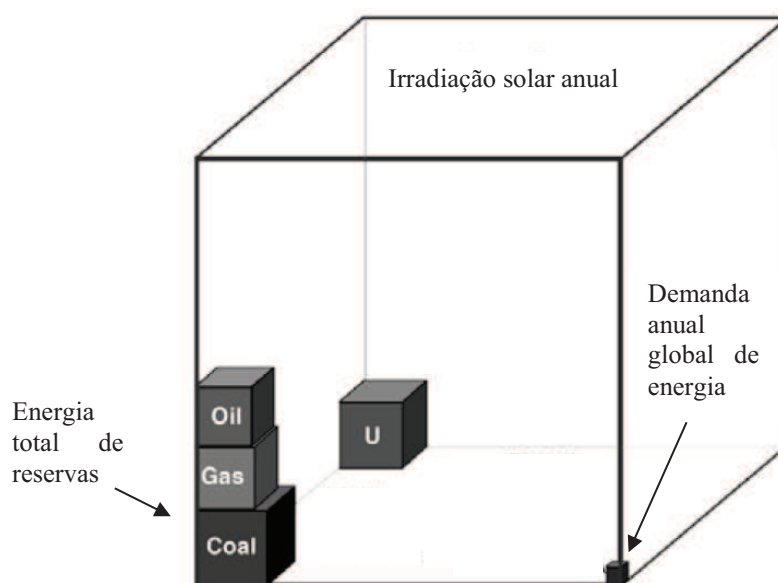
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
2	FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Fundamentos	15
2.1.1	Superfície Seletiva	15
2.1.2	O Granito Verde-Ubatuba	18
2.1.3	Coletores Solares Térmicos tipo Placa Plana	19
2.2	Revisão Bibliográfica	21
3	EXPERIMENTO	26
3.1	Bancada experimental para testes de temperatura	26
3.1.1	Coletor solar térmico experimental	27
3.1.2	Sistema de medição da irradiação solar	28
3.2	Obtenção e deposição dos compostos no substrato	28
3.3	Procedimento experimental	30
3.4	Modelagem física e numérica	30
3.5	Cálculos para comparação entre superfícies	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Resultados dos dados coletados e das temperaturas médias das superfícies	35
4.2	Comparação entre as diferentes superfícies	37
5	CONCLUSÃO	39
5.1	Conclusões	39
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A necessidade global de ampliação da matriz energética e a consequente busca por meios alternativos e sustentáveis de transformação de energia já não são mais novidades em nosso tempo. Aliada a estas iniciativas são também propostas pela comunidade científica melhoria nos processos já existentes, através de máquinas de baixo consumo e baixa emissão de poluentes e dispositivos mais eficientes. Toda essa mobilização para uma vida mais ecologicamente correta é impulsionada por inúmeros centros de pesquisas espalhados por todo o mundo, os quais têm concentrado seus esforços no estudo dos fenômenos envolvidos nos diferentes processos de transformação de energia, desde a energia solar até a biomassa. Nesse contexto, o uso da energia solar se apresenta como uma das mais promissoras fontes de energia do planeta, tendo em vista a sua grande disponibilidade, e, também, devido ao fato de ser uma energia limpa no processo de transformação em energia elétrica ou térmica.

Segundo Quaschning (2005), $3,9 \times 10^{24} \text{ J} = 1,08 \times 10^{18} \text{ kWh}$ de energia solar atinge a superfície da Terra anualmente. Isso corresponde à, aproximadamente, 10 mil vezes mais do que a demanda anual global de energia e muito mais do que todas as reservas de energia disponíveis no planeta juntas. A figura 1 abaixo ilustra esses dados, o cubo externo transparente representa a irradiação solar anual que chega até a superfície terrestre.

Figura 1 – Esquema comparativo em forma de cubos da quantidade de energia disponível no planeta, a demanda anual global de energia e a irradiação solar anual.



Fonte: Volker Quaschning (2005)

Uma das maneiras de aproveitamento da energia solar térmica é através de coletores solares, que, fundamentalmente, são constituídos por superfícies que absorvem a energia térmica proveniente do sol para que ela seja utilizada em sistemas de aquecimento. Inicialmente, observou-se que superfícies pretas tinham capacidade de absorver a energia térmica do sol, e desta forma as primeiras superfícies propostas para coletores solares térmicos eram, simplesmente, pintadas de preto. Como o estudo deste tipo de coletor envolve transferência de calor, existem as chamadas perdas térmicas, que devem ser consideradas, essas perdas associadas a esse tipo de coletor são, basicamente, devido à reflexão e à emissão, que estão ligadas a duas propriedades térmicas do material, a refletividade e a emissividade. Ou seja, o revestimento da superfície das placas absorvedoras de radiação solar tem um papel fundamental na absorção e reflexão dessa radiação, e também na emissão de radiação térmica, influenciando diretamente na eficiência do equipamento, bem como em sua relação custo-benefício. Como a absorvidade, a refletividade e a emissividade são características intrínsecas do material, é necessário obter materiais que sejam capazes de absorver o máximo de radiação solar, refletindo o mínimo possível dessa radiação e emitindo, também, o mínimo possível de sua radiação térmica. Às superfícies que contêm essas características dá-se o nome de superfícies seletivas.

Atualmente, o setor da indústria responsável pela produção de coletores solares térmicos se utiliza de tintas ou soluções, as quais conferem à placa coletora de radiação a característica seletiva, no que diz respeito à absorção da radiação solar e à emissão de radiação. Geralmente, as superfícies seletivas consistem em uma fina camada de um óxido metálico. Os mais comuns são os óxidos de cromo e o de titânio. Essas misturas químicas, geralmente, são feitas a partir de materiais tóxicos e de alto custo. Por isso, este trabalho propõe uma solução alternativa às já praticadas no mercado. Com a constatação de que pedras com tonalidades escuras aquecem quando exposta ao sol atingindo temperaturas próximas as alcançadas em coletores solares térmicos, e ainda que os resíduos deste tipo de material em indústrias que os beneficiam não têm um destino correto, muitas vezes são jogados em lixões, diante dessas motivações foi escolhido o resíduo de granito, mais precisamente do granito de coloração verde escuro, conhecido comercialmente como verde-ubatuba proveniente das rochas charnockíticas. Ao utilizar esse resíduo, além de contribuir com o meio ambiente, pois haverá uma redução no seu descarte, também se reduz o custo da matéria prima de fabricação dos coletores solares térmicos, agregando valor a esse tipo de resíduo. Estima-se que a

indústria de pedras ornamentais produza cerca de 200 mil toneladas de resíduo sólido por ano (Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ, 2005).

O presente trabalho pretende contribuir no setor de energia solar térmica, através do estudo e obtenção de uma superfície seletiva que compõem os coletores solares térmicos de placa plana.

1.1 Objetivos

O objetivo dessa dissertação é utilizar e testar o resíduo do granito verde-ubatuba na forma pulverizada para ser aplicado como superfície seletiva de coletores solares de placa plana de baixo custo.

Os objetivos específicos são:

- 1) Montar uma bancada experimental para teste e comparação de três tipos de superfície seletiva, quais sejam uma à base pó de granito, uma composta por uma mistura de pó de granito e CRFO ($\text{Cr}_{0,75}\text{Fe}_{1,25}\text{O}_3$) e uma superfície comercial.
- 2) Medir, através de testes de campo, as temperaturas alcançadas pelas superfícies, a fim de compará-las.

2 FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta alguns conceitos e definições necessários ao entendimento do presente trabalho, bem como uma pesquisa bibliográfica de trabalhos publicados sobre o assunto.

2.1 Fundamentos

2.1.1 Superfície Seletiva

Usinas de energia solar térmica, aquecedores de água domésticos e sistemas de aquecimento industriais utilizam a energia solar como fonte primária de energia, convertendo-a em calor. Para que esses processos sejam eficientes, eles precisam absorver o máximo possível de radiação solar enquanto limitam as perdas de calor por radiação da superfície absorvedora. Para isso, a absorbância solar e a emitância na banda do infravermelho da superfície absorvedora precisam ser otimizados. Segundo o *National Institute of Standards and Technology* dos Estados Unidos (*apud* McEnaney, 2010) é recomendado que se use as terminações “-vidade”, como absortividade, para os casos de propriedades de materiais puros e perfeitamente polidos, e a terminação “-ância”, como emitância, para propriedades de materiais reais, ou seja rugosos e contaminados. O presente trabalho utilizará essa recomendação.

As superfícies seletivas têm um papel fundamental nessa otimização de equipamentos que utilizam energia solar como fonte de energia. Elas são obtidas com o intuito de melhorar algumas propriedades termodinâmicas do material, quais sejam absorbância e emitância, a fim de aumentar a eficiência do coletor solar. Apesar de alguns materiais possuírem essa característica naturalmente, como será mostrado a seguir, os materiais obtidos em laboratório possuem uma seletividade muito mais significativa, tornando mais viável a produção e comercialização dos coletores solares.

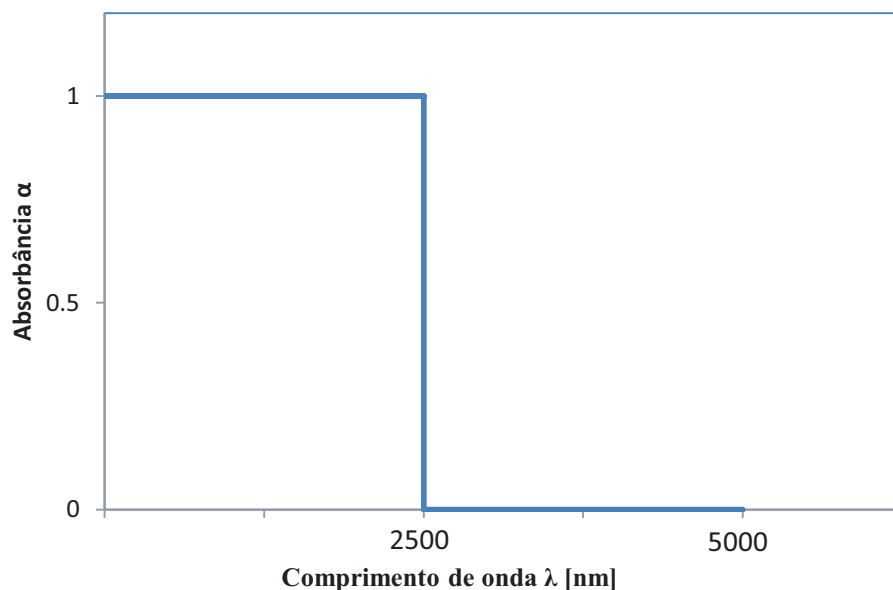
Segundo Gomes (2001), a exigência principal de um revestimento para absorção solar é a seletividade espectral, característica de uma superfície cujas propriedades de absorbância, emitância e refletância variam nas regiões da radiação solar e da radiação infravermelha térmica. A seletividade (s) é um parâmetro utilizado para caracterizar uma superfície seletiva

e é definido como a razão entre a absorptividade na faixa do visível (α) e a emissividade na faixa do infravermelho (ε), conforme equação (1).

$$s = \alpha/\varepsilon. \quad (1)$$

Para aplicações em energia solar, uma superfície seletiva espectral deve ter alta absorptância à radiação solar na região do visível e na região espectral do infravermelho próximo (até $\approx 3,0 \mu\text{m}$) e deve ter baixa emitância para a radiação térmica infravermelha ($> 3,0 \mu\text{m}$). De acordo com Mills (1985), se a estrutura interna de uma superfície seletiva for ignorada, pode-se definir uma superfície seletiva ideal como aquela a qual a absorptividade pode ser representada através de uma função degrau, onde o valor máximo ocorre nos comprimento de onda na região do visível e o valor mínimo ocorre na região do infravermelho, conforme a figura 2 a seguir.

Figura 2 – Perfil de absorptância de uma superfície seletiva ideal



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Granqvist (1991), as superfícies seletivas podem ser divididas em seis grandes grupos ou categorias: a) intrínsecos; b) pares semicondutor-metal; c) absorvedores multicamadas; d) revestimentos com materiais compósitos (metal-dielétrico); e) superfícies texturizadas ou rugosas; e f) revestimentos transparentes em substratos absorvedores.

Materiais com seletividade intrínseca possuem essa propriedade naturalmente. Tais materiais incluem carbetos, boretos e silicetos. Porém, mesmo o melhor desses materiais não

possui uma boa seletividade, por exemplo, de acordo com Randich e Pettit (1981) o ZrB_2 tem uma absorbância solar de 77% enquanto sua emitância é de 8% à 100 °C. Segundo Madhukeshwara (2012), materiais obtidos em laboratório chegam atingir absorbância de 96% e emitância de 0,12%. Além disso, os seletivos intrínsecos possuem uma transição do comportamento de absorção para reflexão em comprimentos de onda muito curtos, muito longos ou em uma faixa muito extensa para aplicação tecnológica, conforma aponta Martins (2010).

Os pares semicondutor-metal são superfícies seletivas nas quais o semicondutor absorve radiação solar em pequenos comprimentos de onda, cujos fótons possuem energia superior ao *gap* do semicondutor, elevando os elétrons para a banda de condução. Eles ainda possuem baixa emitância através do metal constituinte do substrato. Os materiais semicondutores possuem um alto índice de refração, por esse motivo, deve ser depositada uma camada anti-refletiva sobre o semicondutor.

Os absorvedores multicamadas funcionam através das interferências entre as diferentes camadas de materiais. Dois exemplos de absorvedores multicamadas, abordados no trabalho de Shimidt e Park (1965), são o composto de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo- Al}_2\text{O}_3\text{-Mo- Al}_2\text{O}_3\text{-Mo- Al}_2\text{O}_3$ que pode alcançar uma absorbância de 91% e uma emitância de 8,5% a uma temperatura de 260 °C, e o composto $\text{MgF}_2\text{-Mo-MgF}_2\text{-Mo-MgF}_2$ que pode alcançar uma absorbância de 89% e uma emitância de 7,5% a uma temperatura de 260 °C.

Revestimentos com materiais compósitos podem ser depositados em substratos metálicos para obter-se uma superfície seletiva eficiente. Os revestimentos com materiais compósitos, geralmente, são feitos de cermet (partículas de metal em uma matriz cerâmica ou vice-versa). Conforme Granqvist (1991), as propriedades dos cermets podem ser determinadas através da escolha da matriz cerâmica, do tamanho, forma, densidade e orientação das partículas metálicas e da espessura do revestimento. Esses parâmetros também podem ser variados ao longo da espessura do revestimento. Além disso, pode-se adicionar uma camada anti-refletiva para minimizar as perdas por reflexão.

Superfícies rugosas também podem ter características seletivas. Essas superfícies estão baseadas na geometria, porosidade, ou estruturas dendríticas, as quais são pequenas o suficiente para que pareçam ásperas aos pequenos comprimentos de ondas, e lisas para os grandes comprimentos de ondas da radiação solar.

A última categoria de superfície seletiva são os revestimentos transparentes em substratos absorvedores. Esses sistemas permitem que a radiação solar seja transmitida

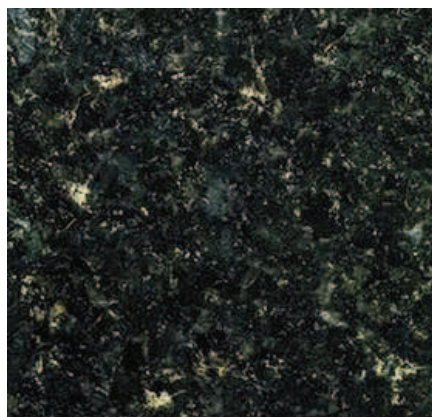
através do revestimento e absorvida pelo substrato, que possui característica absorvedora de corpo negro. O revestimento transparente reflete a radiação infravermelha emitida pelo absorvedor. Esse tipo de superfície é utilizado em aplicações de baixa temperatura.

Uma das substâncias muito utilizadas comercialmente para obtenção de superfícies seletivas para coletores solares térmicos é composta por uma solução de óxido de titânio, conhecida comercialmente como TiNOX. Essa substância é depositada, geralmente, através de eletrodeposição, assemelhando-se a um processo de pintura. O processo é semelhante, porém os objetivos diferem entre si, já que na pintura o objetivo é proteção e estética do material pintado; enquanto no processo de deposição do revestimento em placas absorvedoras o objetivo é otimizar a absorção de radiação em pequenos comprimentos de onda e reduzir a emissão na banda do infravermelho. Outros processos de deposição são estudados em trabalhos científicos, como, por exemplo, o PVD (*Physical Vapor Deposition*) ou *Magnetron Sputtering* e o *Screen Printing*.

2.1.2 O Granito Verde-Ubatuba

O granito Verde-Ubatuba, ilustrado na figura 3, é muito comum no mercado de pedras ornamentais, e é a matéria-prima do composto que forma a superfície seletiva estudada no presente trabalho. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define rocha ornamental como uma substância rochosa natural que, após ser submetida a diferentes graus de beneficiamento, pode ser utilizada com uma função estética qualquer.

Figura 3 – Granito Verde-Ubatuba



Fonte: Google

Do ponto de vista da geologia, granito “comercial” inclui tanto rochas ígneas quanto metamórficas. O Verde-Ubatuba se classifica como rocha ígnea plutônica e está dentro da

categoria conhecida como charnokitos. Os charnokitos verdes são encontrados principalmente na região nordeste e sudeste do país.

Na classificação das rochas ornamentais segundo a orientação dos seus constituintes mineralógicos o granito Verde-Ubatuba se encontra nas rochas ornamentais isotrópicas.

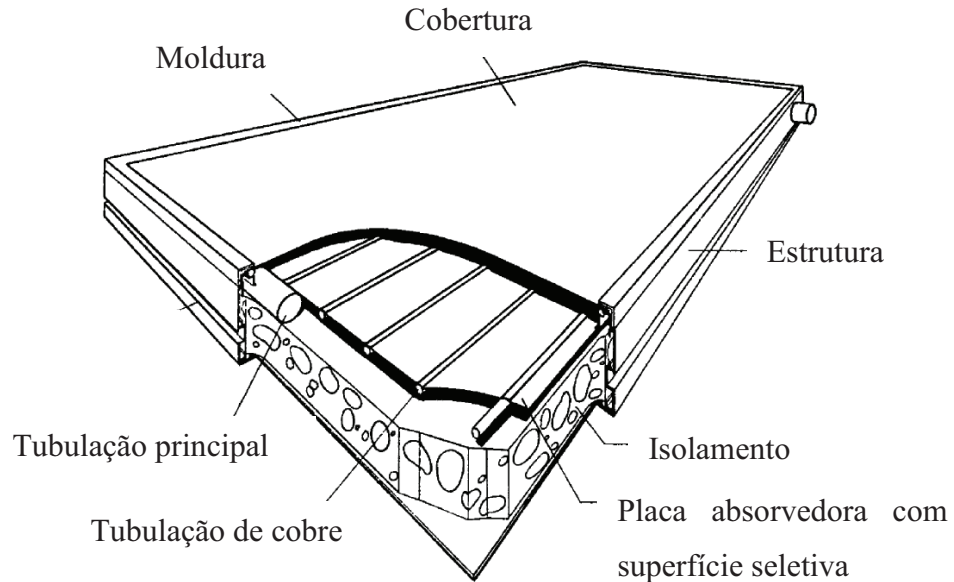
2.1.3 Coletores Solares Térmicos tipo Placa Plana

Segundo Duffie e Beckman (2006), um coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que converte energia solar em calor, a diferença é que na maioria dos trocadores de calor ocorre uma grande transferência de calor entre fluidos, e a radiação não é importante no processo, enquanto nos coletores solares térmicos a energia é transferida de uma fonte de radiação distante para um fluido de trabalho. Quando a radiação atravessa a cobertura transparente e atinge a superfície absorvedora de alta absorbância, grande parte desse calor é absorvida pela placa e transferida para o fluido de trabalho ou armazenado para posterior uso. O interior do coletor é isolado termicamente para diminuir as perdas por condução. Os tubos por onde o fluido de trabalho é transportado pode ser soldado à placa absorvedora ou, em alguns casos, placa e tubos podem ser integrados, formando uma peça única. A cobertura transparente, geralmente de vidro, é usada para evitar perdas por convecção e para proteger a placa absorvedora de intempéries e sujeira. Além disso, também é utilizada para evitar perdas por radiação, uma vez que o vidro é transparente para pequenos comprimentos de onda recebidos do Sol, e é quase opaco para grandes comprimentos de ondas de radiação térmica (infravermelho) emitidas pela placa. Esse fenômeno é chamado de efeito estufa.

O fluxo de radiação incidente é, na melhor das hipóteses, de 1100 W/m^2 (sem concentração óptica). Esse valor é variável de acordo com alguns fatores, como hora do dia, estação do ano e localização geográfica, conforme explica Duffie e Beckman (2006). Geralmente, os coletores solares térmicos tipo placa plana, ou simplesmente coletores solares planos domésticos, são projetados para operarem em temperaturas baixas ou moderadas, até 150°C (temperatura da superfície). Eles utilizam tanto a radiação solar difusa quanto a direta, e não precisam de sistemas auxiliares para mudar o ângulo da placa em relação à radiação incidente, além disso, necessitam de pouca manutenção. Eles possuem estrutura simples, quando comparados a concentradores solares. E, sua aplicação, na grande maioria dos casos, se dá na área de aquecimento de água, de ambiente, de condicionamento de ar, e de processos industriais.

Os principais componentes de um coletor solar plano, conforme mostrado na figura 4, são a placa absorvedora (superfície seletiva), a cobertura de vidro, a estrutura e o isolamento.

Figura 4 – Coletor solar térmico de placa plana – principais componentes.



Fonte: Kalogirou (2004)

A placa absorvedora contém o substrato metálico, geralmente de cobre ou alumínio, sobre o qual a substância ou revestimento que confere seletividade à superfície é depositado. A placa absorvedora é o componente mais importante do coletor solar, já que o processo de conversão de energia se dá através dela.

Os coletores solares térmicos são testados conforme requisitos de 3 (três) principais normas: a norma europeia EN 12975-2 (*Thermal solar systems and components – Solar collectors – Part 2: Test methods*), a ANSI/ASHRAE 93 (*Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors*) e a ISO 9806 (*Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods*). Essas normas definem, basicamente, dois métodos de teste de desempenho dos coletores, um chamado de *Steady State* (SS) e outro de *Quasi Dynamic Test* (QDT). O primeiro é o mais antigo e mais utilizado. Porém, em muitos casos utilizam-se os dois métodos para comparação de resultados.

2.2 Revisão Bibliográfica

O fenômeno da seletividade em superfícies absorvedoras de coletores solares térmicos tem sido objeto de estudo em diversos centros de pesquisa por inúmeros pesquisadores, principalmente nas últimas quatro décadas. Os trabalhos são feitos, principalmente, na área de obtenção de materiais para novas superfícies e no estudo de propriedades térmicas e ópticas das superfícies existentes, bem como de técnicas de deposição e análises de desempenho de coletores.

Alguns exemplos de trabalhos realizados na área de obtenção de materiais para superfícies seletivas são de Shimidt e Park (1965), Gittleman *et al.* (1979), Löfving (1981), Cao, Tian e Hu (2000), Schüler *et al.* (2000), Teixeira *et al.* (2001), Barshilia *et al.* (2008), Vieira (2011), Selvakumar *et al.* (2013).

Shimidt e Park (1965) obtiveram 4 tipos de superfícies seletivas multicamadas com diferentes composições. O substrato utilizado era de molibdênio. As medições de absorbância e emitância foram feitas em uma faixa de temperatura de 100 até 1000 °C. Foi observada a influência do filme de molibdênio na onda de corte das superfícies. A melhor configuração atingiu absorbância de 0,91 e emitância de 0,085 a uma temperatura de 260 °C, e era composta por $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$.

Shuler *et al.* (2000) depositaram, através dos processos de PVD (*Physical Vapor Deposition*) e PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*), filmes de titânio contendo carbono amorfo hidrogenado (a-C:H/Ti) sobre substrato de Al, para utilização em coletores solares de placa plana. Não foram observadas contaminações no alvo de titânio. As composições dos filmes depositados foram determinadas através de XPS (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*). No experimento, uma camada de Ti puro de aproximadamente 10 nm foi depositada diretamente sobre o substrato, em seguida houve a deposição da camada de a-C:H/Ti e por último a camada de a-C:H puro. Durante a deposição do filme o substrato foi aquecido resistivamente, foi utilizado um alvo de titânio para o *sputtering*, para o CVD, gás metano, a pressão de base foi de 10^{-6} mbar e a pressão de trabalho foi ajustada em 5×10^{-3} mbar. Os resultados mostraram uma absorbância α de 0,876 e emitância ε de 0,061 e seletividade $s = \alpha / \varepsilon$ de 14,4. O tempo de vida útil da superfície foi estimado em mais de 25 anos.

Teixeira *et al.* (2001) produziram superfícies seletivas com cermet Cr-Cr₂O₃ e Mo-Al₂O₃ sobre substratos de cobre e vidro, através do método *magnetron sputtering* reativo DC.

Os alvos de Cr e Al utilizados tinham pureza de 99,99%. Com o cermet Cr-Cr₂O₃, eles produziram superfícies graduais multicamadas através da variação do fluxo de oxigênio durante o processo de deposição. Essa variação no fluxo de oxigênio foi para melhorar o desempenho óptico da superfície. O cermet Mo-Al₂O₃ compuseram superfícies com uma camada refletiva na banda do IV e uma camada de topo transparente nessa banda. As superfícies foram caracterizadas através de XPS, EDX (*Energy Dispersive X-ray*) e XRD (*X-ray diffraction*). Os revestimentos com Cr-Cr₂O₃ apresentaram absorvância de 0,94 e emitância de 0,04, com substrato de cobre. As superfícies com Mo-Al₂O₃ atingiram absorvância de 0,94 e emitância de 0,09. Essas últimas, demonstraram um grande potencial para fabricação em larga escala, devido à produtividade e ao controle do processo. As superfícies testadas são fortemente recomendadas para aplicação em altas temperaturas, já que possuem excelente estabilidade térmica.

Vieira (2011) obteve superfícies seletivas a base de Cr_{0,75}Fe_{1,25}O₃ (CRFO) e Fe_{0,5}Cu_{0,75}Ti_{0,75}O₃ (FCTO) através do método de deposição conhecido como *screen printing*. Em seguida a superfície foi sinterizada em forno resistivo a uma temperatura de manutenção de 200 °C. As superfícies obtidas foram caracterizadas e comparadas com uma superfície comercial. Para caracterização das superfícies obtidas foi utilizada a técnica de espectroscopia Raman. Além disso, foram feitos testes de campo, nos quais as superfícies foram expostas a radiação solar. O aparato experimental incluía medidores de temperatura e de irradiação solar. Os dados foram utilizados para o cálculo da absorvância das superfícies obtidas, sendo que a melhor configuração obteve absorvância de 0,80. A superfície comercial apresentou uma absorvância de 0,95.

Selvakumar *et al.* (2013) produziram superfícies seletivas multicamadas com CrMoN(H)/CrMoN(L)/CrON sobre substrato de aço inoxidável e alumínio através do método de *sputtering*, para aplicação em médias temperaturas no caso do aço inoxidável e baixas temperaturas no caso do alumínio. As coberturas CrMoN/CrON foram preparadas sobre os substratos utilizando *magnetron sputtering* reativo DC. Foram utilizados alvos de alta pureza de Cr (99,95%) e Mo (99,95%). O fluxo de nitrogênio foi variado durante o processo para obter as camadas CrMoN(H) (*high metal content*) e CrMoN(L) (*low metal content*). Para a caracterização da superfície foram utilizadas técnicas de XPS, XRD e Elipsometria. A configuração com substrato de aço inoxidável atingiu uma absorvância de 0,92 e uma emitância de 0,13 para aplicações em médias temperaturas. O alto índice de refração e absorção da camada CrMoN(H), obtidos através da elipsometria, mostra que essa é a principal

absorvedora da configuração. As camadas CrMoN/CrON depositadas sobre o substrato de alumínio foram avaliadas pelo critério de desempenho para painéis solares térmicos de placa plana, o que resultou em uma vida útil estimada em 25 anos. Os valores de absorbância e emitância para essa configuração foram de 0,90 e 0,08, respectivamente, para uma temperatura de 82 °C.

Entre os artigos que abordam os métodos de deposição para fabricação de superfícies e as propriedades térmicas e ópticas das superfícies seletivas pode-se citar os trabalhos de Nunes et al. (2002), Teixeira et al. (2002), Konttinen *et al.* (2003), Kalogirou (2006), Barshilia, Selvakumar e Rajam (2007), Chen *et al.* (2008), Madhukeshwara *et al.* (2012).

Nunes et al. (2002), obtiveram superfícies seletivas em camadas de cermet Mo–Al₂O₃ através do processo de deposição PVD. De acordo com os autores, esse processo permite a deposição tanto de superfícies com camadas simples como de multicamadas, e, também, de superfícies com gradiente de concentração, nas quais a composição metálica dispersa na matriz cerâmica varia através da espessura. A estrutura do filme foi analisada através de XRD. A composição da superfície foi determinada utilizando EDX. Para determinar a espessura das camadas foi utilizado SEM. E, para determinar as propriedades de refletância e absorbância foi feita análise química através de XPS. As análises mostraram que as camadas depositadas tinham uma espessura total de 200 nm, e que foi obtida uma absorbância de 0,94 e uma emitância de 0,05.

Konttinen *et al.* (2003) realizaram um estudo do desenvolvimento de um processo mecânico para fabricação de superfícies seletivas. O substrato utilizado foi de alumínio devido as suas propriedades favoráveis para essa aplicação e ao relativo baixo custo. O revestimento era composto por alumina e carbono. Foram realizados diversos testes preliminares para verificar qual seria o melhor abrasivo a ser utilizado. O processo de maceração, inicialmente, era feito de forma manual, posteriormente, foi mecanizado. Após a maceração, o pó era submetido a um banho de ácido composto por permanganato de potássio (10 g/l), nitrato de cobre (25 g/l) e ácido nítrico (4 ml/l). A superfície foi caracterizada através de EDS (*Electron Microprobe Analysis*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*) e para as propriedades ópticas de absorbância e emitância foi utilizado um espectrorradiômetro e espectroscopia FTIR (*Fourier Transform Infrared*), respectivamente. Os resultados para absorbância e emitância foram de 0,95 e 0,25, respectivamente.

Barshilia, Selvakumar e Rajam (2007) obtiveram superfícies seletivas multicamadas com TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ sobre substratos de cobre, aço inoxidável, níquel e Nimonic

(marca registrada, liga de níquel-cromo com alguns aditivos, como titânio e alumínio). A técnica de deposição utilizada foi *magnetron sputtering* reativo DC. Na configuração utilizada existem duas camadas absorvedoras, a de TiAlN (64 nm) e a de TiAlON (24 nm), sendo a primeira com maior fração volumétrica de metal, e a terceira camada, de Si₃N₄ (34 nm), age como a camada anti-refletiva. Esse tipo de configuração garante alta absortividade no visível e baixa emissividade térmica. A caracterização das superfícies foi feita utilizando várias técnicas. A análise em XPS indicou a presença de TiO₂ na camada de TiAlON e nitrogênio ligado a Ti, Al e Si nas outras camadas. Os resultados da análise com XTEM (*CROSS-sectional Transmission Electron Microscopy*) indicaram que as camadas de TiAlN e TiAlON são nanocristalinas (3-5 nm), enquanto a camada de Si₃N₄ é amorfa. A melhor configuração foi obtida sobre substrato de cobre, com absorbância de 0,958 e emitância de 0,07 a uma temperatura de 82 °C. Essa alta absorbância foi obtida devido ao gradiente do índice de refração, que era maior próximo ao substrato metálico, decrescendo em direção à superfície da camada absorvedora.

Madhukeshwara, N *et al* (2012) realizou um estudo das características de desempenho de um coletor solar de placa plana utilizando três diferentes superfícies seletivas, *solchrome*, *matt black* e *black chrome*. Em sua conclusão ele ressaltou que a escolha do material da superfície seletiva influencia diretamente no desempenho do coletor solar; que das superfícies utilizadas a que gerou uma maior eficiência, e conseqüentemente, maior temperatura, foi a de *black chrome*; e que os melhores resultados foram obtidos nos testes nos quais as placas ficaram posicionadas sob um ângulo de 30°.

Alguns artigos de revisão também são encontrados na literatura, neles está condensada grande parte das informações referentes aos estudos da seletividade espectral e à obtenção de novos materiais para superfícies seletivas e suas propriedades, alguns abordam conceitos de coletores solares em geral. Entre eles encontram-se os trabalhos de Granqvist (1991), Kennedy (2002), Selvakumar e Barshilia (2011) e Tian e Zhao (2013).

O trabalho de Selvakumar e Barshilia (2011) apresenta uma revisão de superfícies seletivas obtidas por PVD utilizadas em aplicações térmicas e em plantas de geração de energia, ou seja, para aplicações em médias (100 – 400 °C) e altas temperaturas (>400 °C). Entre os métodos de PVD abordados no trabalho encontram-se o método de evaporação, evaporação por arco catódico, *sputtering* e *pulsed laser deposition* (PLD). Os autores ressaltam que o processo mais utilizado é o *sputtering*, e discorrem sobre o procedimento para avaliação do tempo de vida útil das superfícies, desenvolvido pelo grupo de pesquisa

“Materials in Solar Thermal Collectors” da *International Energy Agency — Solar Heating and Cooling Program*. Tal procedimento foi formulado como norma e submetido à ISO (*International Organization for Standardization*). Na conclusão eles comentam que há uma grande expectativa no uso da energia solar térmica como uma importante fonte de energia renovável, e que já existem uma gama de superfícies seletivas a base de cermet sendo comercializada, um exemplo citado é a própria TiNOX. Além disso, os autores enfatizam que ainda é preciso haver mais pesquisa e desenvolvimento na área de obtenção de coberturas para superfícies seletivas, a fim de tornar a tecnologia mais acessível e melhorar a eficiência tanto dos coletores solares planos como, principalmente, dos concentradores para plantas de energia solar térmica.

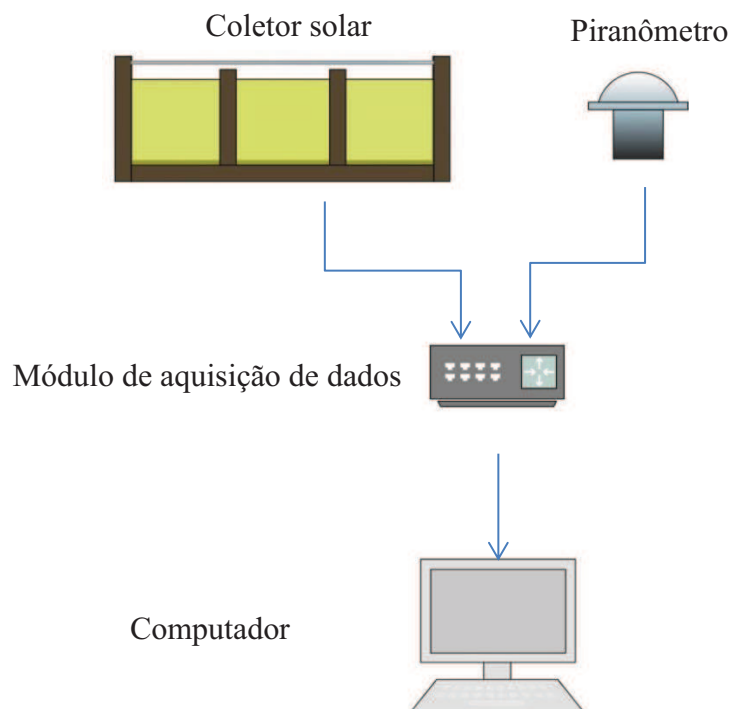
3 EXPERIMENTO

Este capítulo apresenta uma descrição da bancada experimental utilizada, bem como de todos os procedimentos de obtenção da superfície e experimentais. No final é demonstrado o balanço de energia e as equações utilizadas nesse trabalho para obtenção dos resultados. As superfícies foram obtidas no LAFFER (Laboratório de Filmes Finos em Energias Renováveis) e os testes foram realizados no LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural), ambos localizados na Universidade Federal do Ceará (UFC).

3.1 Bancada experimental para testes de temperatura

A figura 5 mostra um esquema da bancada experimental utilizada. A bancada inclui um coletor solar térmico experimental, utilizado para testar as superfícies; termopares tipo k, para medição das temperaturas; um Piranômetro Horizontal Eppley, para medição da irradiação solar; um módulo de aquisição de dados (Agilent 34972A), para aquisição dos valores de temperatura das superfícies, irradiação solar e temperatura ambiente; entre outros periféricos. A seguir, o coletor solar térmico é detalhado.

Figura 5 – Esquema da bancada experimental.



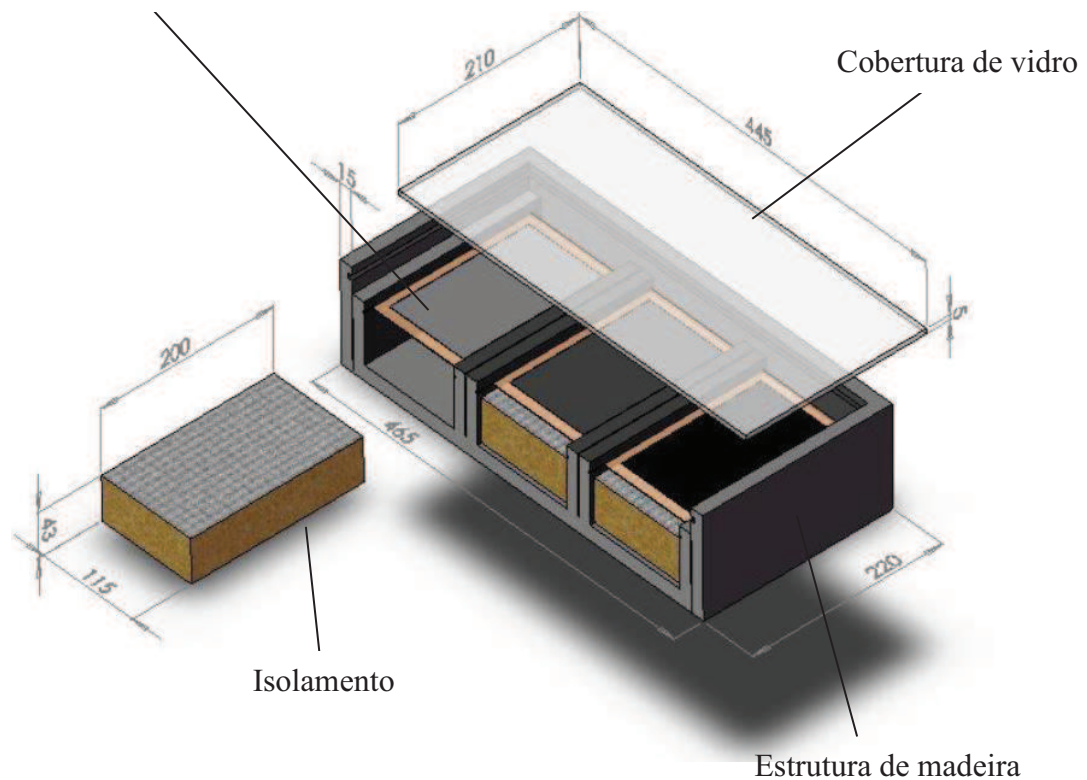
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 Coletor solar térmico experimental

A figura 6 mostra os componentes do coletor solar térmico experimental com suas dimensões.

Figura 6 – Coletor solar térmico experimental. Componentes e dimensões.

Placas absorvedoras (superfícies seletivas)



Fonte: Vieira 2011.

A estrutura do coletor é feita de madeira pintada com tinta preta. Na cobertura foi utilizada uma chapa de vidro temperado com espessura de 5 mm e transmissividade $\tau = 0,885$. O coletor possui três espaços separados para receber três tipos de superfície seletiva a serem testados e comparados, cada espaço recebe isolamento térmico de lã de rocha. O coletor solar térmico foi equipado com termopares tipo K para medição das temperaturas das superfícies estudadas. A primeira superfície é à base de granito, a segunda é composta por uma mistura de granito e CRFO e a terceira é uma superfície comercial. As duas primeiras serão detalhadas no item 3.2, no qual será explicado o processo de obtenção e deposição do composto a base de granito e da mistura de granito com CRFO.

3.1.2 Sistema de medição da irradiação solar

A figura 7 mostra uma foto do piranômetro horizontal Eppley, utilizado para medição da radiação solar total que chegava ao coletor solar experimental, radiação direta somada à radiação difusa.

Figura 7 – Piranômetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Obtenção e deposição dos compostos no substrato

O granito utilizado no presente trabalho foi o verde-ubatuba, como é conhecido comercialmente. Para obter o composto a ser depositado no substrato, inicialmente foi realizada a maceração do granito. Depois da maceração, o pó do granito foi misturado ao ligante e ao fundente. O ligante utilizado foi a Araldite tipo A e tipo B, e o fundente foi o B_2O_3/Bi_2O_3 (uma mistura de Boro-bismuto na proporção 1:1).

Foram obtidos dois compostos para a obtenção das superfícies seletivas, em um deles utilizou-se, como componente principal, apenas o pó do granito. O outro composto estudado foi obtido misturando-se o pó do granito com CRFO. A superfície obtida apenas com granito foi denominada de superfície G, e a obtida com a mistura de granito com CRFO de superfície M. A superfície comercial foi denominada superfície C.

A tabela 1 mostra as composições das superfícies obtidas. Os valores mostrados são as porcentagens em massa de cada componente.

Tabela 1 – Composição das superfícies seletivas obtidas

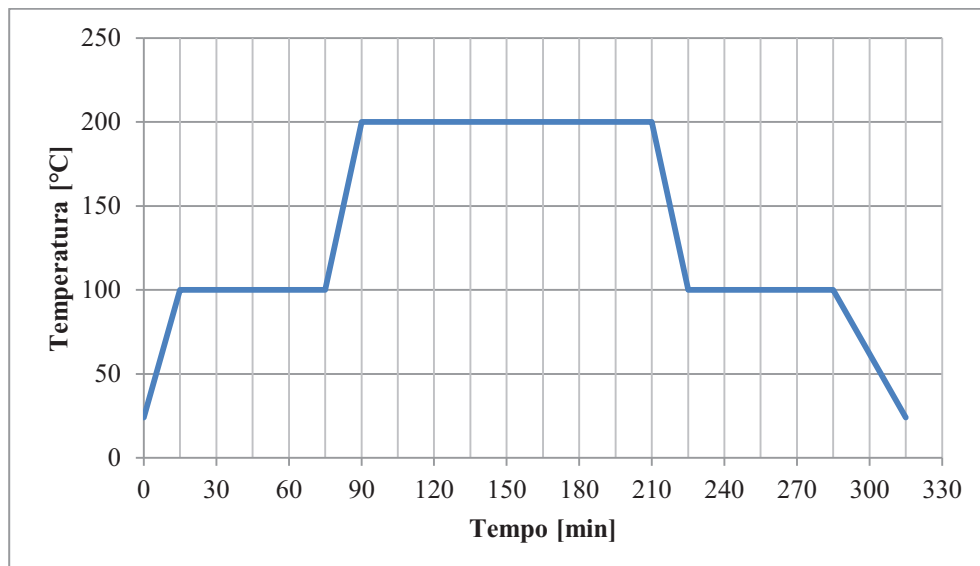
Componentes	Superfície G	Superfície M
Granito em pó [%]	62	31
CRFO [%]	-	31
Araldite tipo A [%]	35	-
Araldite tipo B [%]	-	35
Fundente [%]	3	3
Massa total [g]	10,33	10,59

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a obtenção do composto, foi feita a deposição no substrato de cobre através do processo conhecido como *screen printing*, no qual é utilizada uma espátula para realizar o espalhamento do composto sobre o substrato. Esse processo, por ser totalmente manual, torna quase impossível a obtenção de uma superfície com espessura homogênea, o que acaba influenciando nos resultados obtidos. A superfície comercial leva grande vantagem nesse aspecto, uma vez que o processo é 100 % automatizado, e as técnicas já são bem dominadas.

Posteriormente, as superfícies receberam um tratamento térmico (sinterização) em um forno resistivo, seguindo os parâmetros mostrados na figura 8, para que o ligante evaporasse e fosse concluído o processo de sinterização dos compostos depositados.

Figura 8 – Parâmetros de sinterização



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Procedimento experimental

Após a obtenção das superfícies seletivas, o aparato experimental foi submetido aos testes de campo. Os testes consistiam em expor o coletor experimental à radiação solar e realizar as medições das temperaturas alcançadas por cada superfície, da temperatura ambiente e da radiação solar.

O procedimento experimental segue as seguintes etapas:

1. Posicionar o aparato experimental, expondo-o à radiação solar;
2. Ligar o sistema de aquisição de dados (Agilent 34972A) e o computador e iniciar as medições de temperatura e irradiação solar;
3. Deixar o sistema exposto à radiação durante um período de tempo determinado;
4. Salvar os dados; e
5. Desligar os equipamentos e recolher o aparato experimental.

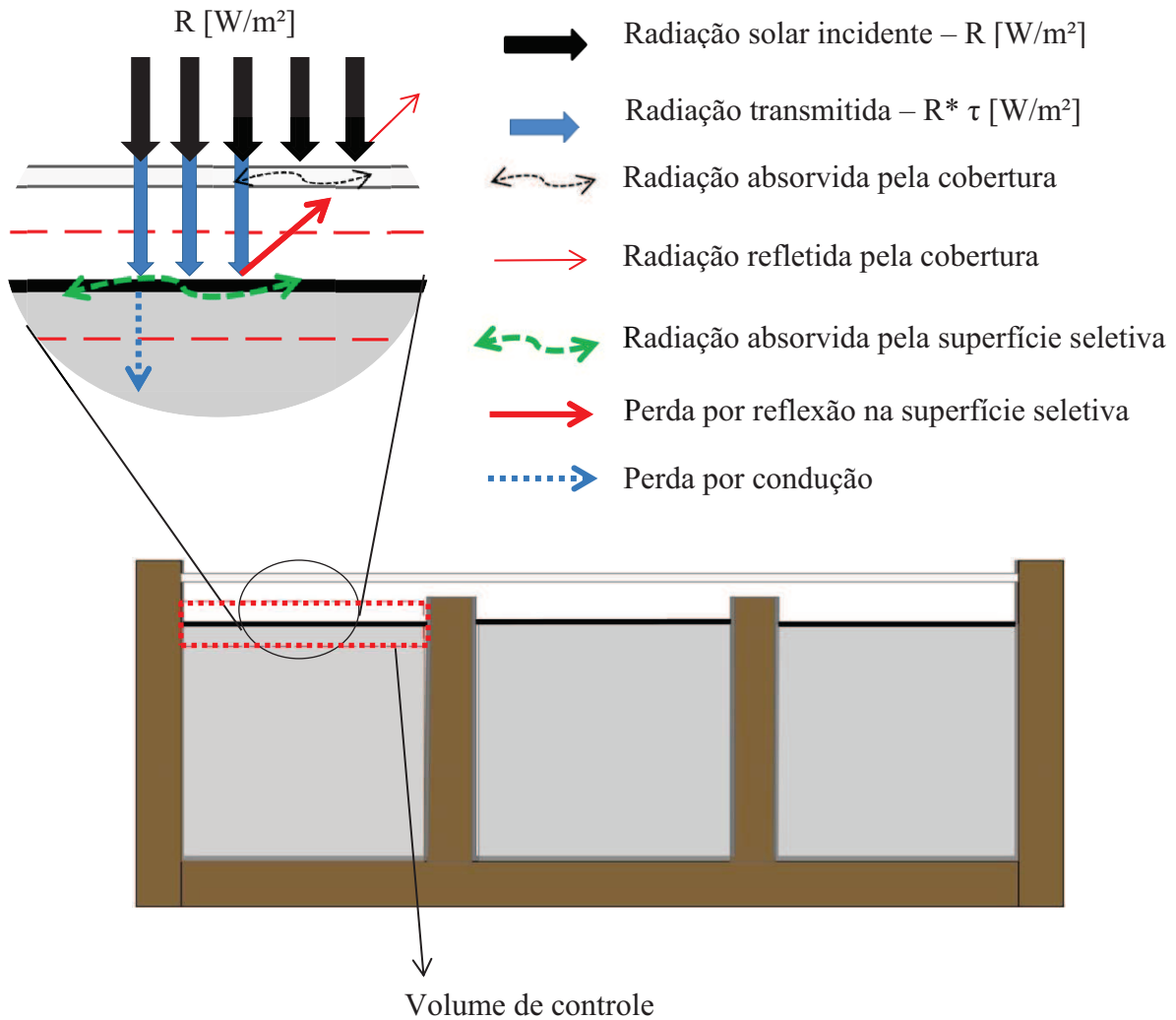
Os dados foram obtidos em três dias (30/05/2014, 02/06/2014 e 03/06/2014), cada teste teve uma duração de 2 horas, das 10h30 às 12h30.

As normas existentes para coletores solares térmicos descrevem requisitos e parâmetros apenas para testar o coletor completo, como ele é comercializado. Para testes apenas de superfícies seletivas não existem normas para definir procedimentos experimentais. Como no presente trabalho estamos interessados apenas em comparar as superfícies estudadas com a superfície comercial, o tempo de teste foi considerado suficiente para gerar os dados necessários a essa comparação.

3.4 Modelagem física e numérica

A figura 9 mostra a modelagem física envolvendo o coletor solar térmico experimental.

Figura 9 – Modelo físico



Fonte: Elaborada pelo autor.

No sistema composto pelo aparato experimental, a energia que entra no volume de controle, composto pela placa absorvedora, é a radiação solar transmitida através da cobertura de vidro. A energia que sai do volume de controle é devido às perdas por condução, convecção natural e radiação térmica.

A equação (2) representa a quantidade de energia que é absorvida pela superfície seletiva, onde τ_v é a transmitância do vidro da cobertura, o α_s é a absorvância da superfície seletiva, R é o fluxo de radiação solar $[\text{W/m}^2]$ e A_s é a área da superfície exposta à radiação solar.

$$\dot{Q}_{in} = \tau_v \alpha_s R A_s \quad (2)$$

A superfície seletiva está protegida do meio externo (chuvas, ventos, poeira, etc.) por uma cobertura de vidro, isso evita a perda por convecção forçada através do vento. Porém, há convecção natural entre a superfície seletiva e a cobertura. Essa perda é calculada através da equação (3), onde h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_s é a temperatura da superfície e T_v é a temperatura da cobertura de vidro.

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} A_s (T_s - T_v) \quad (3)$$

Além da perda por convecção natural, a superfície também perde energia térmica por condução, tanto pelas laterais como pelo fundo da placa absorvedora. A perda por condução é determinada através da equação (4), onde k é o coeficiente de transferência de calor por condução, L é o comprimento característico, levando-se em consideração as duas superfícies entre as quais se queira conhecer a taxa de calor transferida, T_p é a temperatura da placa e T_e é a temperatura das faces externas do coletor.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{k}{L} A_s (T_p - T_e) \quad (4)$$

Todo corpo acima de zero Kelvin emite radiação térmica, logo a superfície seletiva também perde calor através desse modo de transferência de energia térmica. Essa perda é calculada através da equação (5), onde ε_s é a emitância da superfície seletiva e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_v^4) \quad (5)$$

Por último, há a perda por reflexão, ou seja, parte da radiação solar que atinge a superfície seletiva é refletida sem causar variação de temperatura nessa superfície. Essa perda é expressa pela equação (6).

$$\dot{Q}_{ref} = (1 - \alpha_s) R A_s \quad (6)$$

O balanço de energia, no volume de controle definido na figura 9, pode ser expresso pela equação (7),

$$\dot{Q}_{acumulado} = \dot{Q}_{entra} - \dot{Q}_{sai} + \dot{Q}_{transformado} \quad (7)$$

Onde $\dot{Q}_{acumulado}$ representa a energia em forma de calor acumulada na placa em um intervalo de tempo, e o $\dot{Q}_{transformado}$ representa a geração de energia. Ambos os termos são nulos, o primeiro é devido à hipótese de regime permanente, e o segundo por que não há geração de energia a partir da placa absorvedora.

Portanto, para a condição de regime permanente, a equação para o balanço de energia na placa absorvedora pode ser escrita da seguinte forma,

$$\underbrace{\tau_v \alpha_S R}_{\text{Energia absorvida}} = \underbrace{h_{conv} (T_S - T_v) + \frac{K}{L} (T_p - T_e) + \varepsilon_S \sigma (T_S^4 - T_v^4) + (1 - \alpha_S) R}_{\text{Energia perdida}} \quad (8)$$

Como o protótipo do coletor utilizado como aparato experimental não envolvia escoamento de fluido de trabalho, os testes de campo determinaram as temperaturas de estagnação – temperatura atingida pela placa para o caso da vazão do fluido de trabalho ser igual à zero. Ou seja, o calor absorvido pela superfície não era aproveitado, de forma que, em regime estacionário, toda energia captada pela superfície era desperdiçada através dos meios descritos acima.

Das superfícies estudadas, apenas a comercial tinha sua absorbância e emitância conhecidas, ou seja, não seria possível o uso da equação (8), para determinar a absorbância das superfícies obtidas, tendo em vista que essas superfícies são constituídas de um novo material.

Kalogirou, S. A. (2004) apresenta uma equação para o cálculo do calor útil fornecido por um coletor solar ao fluido de trabalho. Essa equação (9), utiliza um coeficiente global de perda de calor U_L , esse coeficiente será utilizado para fazer os cálculos comparativos entre as superfícies.

$$q_u = A_S [R(\tau\alpha) - U_L(T_S - T_a)] \quad (9)$$

Onde T_a é a temperatura ambiente.

Para o caso estudado, $q_u = 0$. Logo a equação (9) fica da seguinte forma,

$$U_L(T_S - T_a) = R(\tau\alpha)$$

3.5 Cálculos para comparação entre superfícies

Para o cálculo comparativo das superfícies seletivas obtidas, utilizou a equação (9) abaixo. Para determinar o valor do coeficiente global de perda de calor U_L , utilizou-se os dados da superfície comercial, os quais são fornecidos pelo fabricante. Dessa forma, com o valor da transmitância do vidro da cobertura e o valor da absorbância da superfície comercial conhecidos, e com os valores do fluxo de radiação solar, da temperatura ambiente e da temperatura da superfície seletiva medidos, restou o coeficiente de perda global U_L como incógnita. Como o coeficiente U_L varia de superfície para superfície, não é possível utilizar o mesmo coeficiente para as três superfícies testadas. A solução utilizada para comparar as superfícies foi estimar possíveis valores de α , numa faixa de 0,9 à 0,95 com incremento de 0,01, para cada superfície obtida, obtendo assim valores de U_L com base nas temperaturas medidas. Essa faixa de α é onde se encontram a grande maioria das superfícies seletivas encontradas no mercado. Dessa forma, foram encontrados diversos valores para U_L , e esses valores foram comparados com os valores obtidos para a superfície comercial.

A comparação foi possível tendo em vista que todas as superfícies estão submetidas às mesmas condições, tanto de exposição à radiação solar como em relação às condições oferecidas pelo protótipo. Dessa forma, o que propicia resultados diferentes são apenas as propriedades da própria superfície.

A equação (9) rearranjada fica da seguinte forma,

$$U_L = \frac{R(\tau\alpha)}{(T_S - T_a)} \quad (10)$$

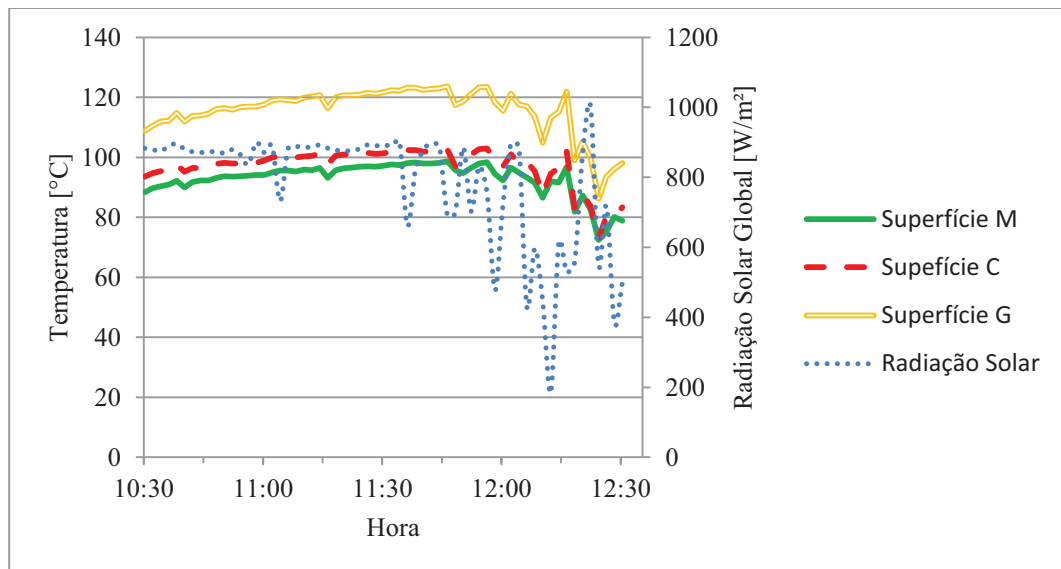
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas medições e nos cálculos feitos para comparar o desempenho das diferentes superfícies seletivas testadas.

4.1 Resultados dos dados coletados e das temperaturas médias das superfícies

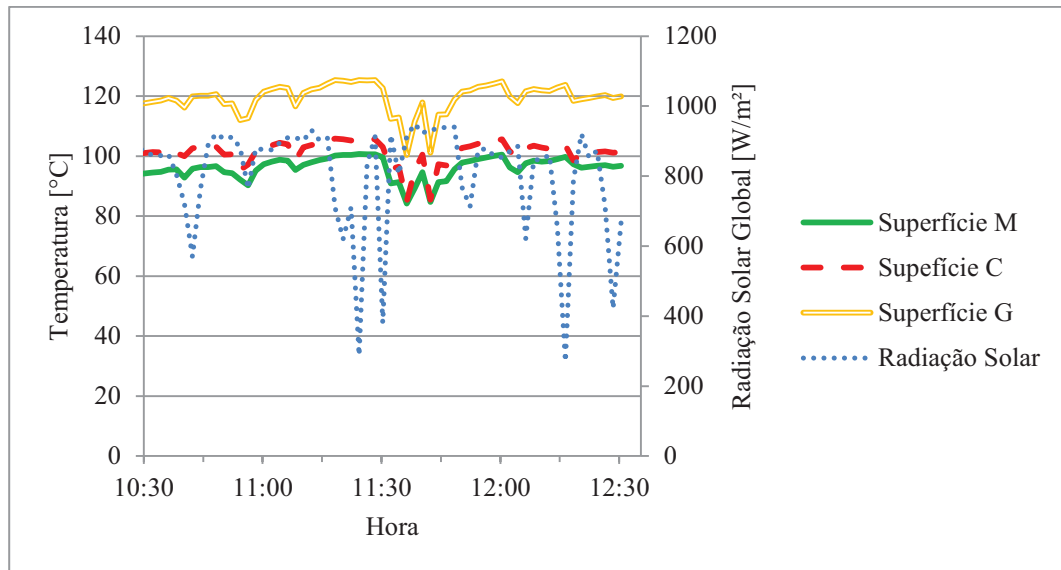
As figuras 10, 11 e 12 mostram os dados coletados nos três dias de testes, e na tabela 2 é possível conferir os valores médios das temperaturas das superfícies, da temperatura ambiente e da radiação solar global.

Figura 10 – Dados do dia 30/05/2014



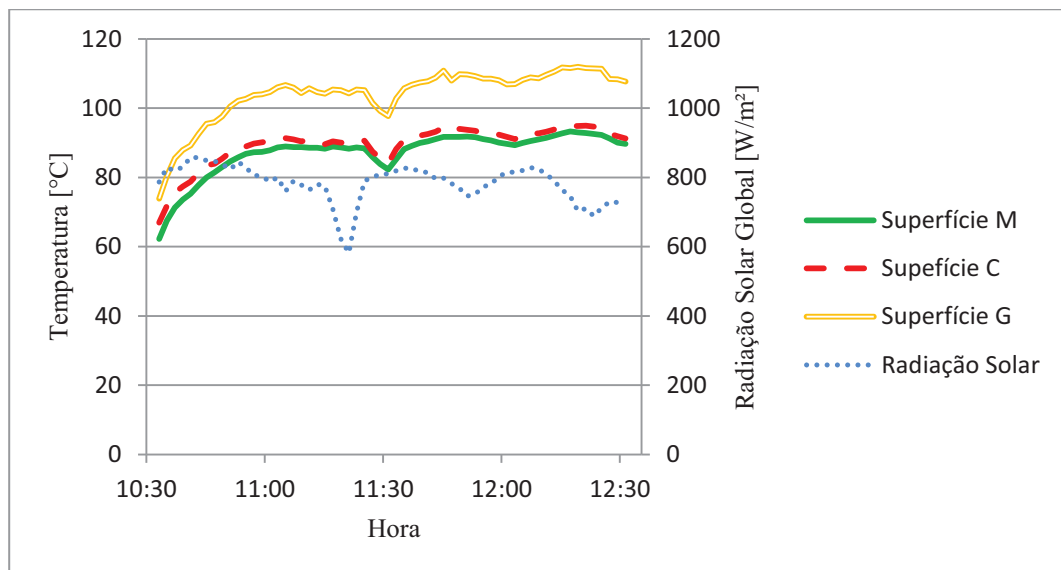
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 – Dados do dia 02/06/2014



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Dados do dia 03/06/2014



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Valores médios de temperaturas e radiação solar.

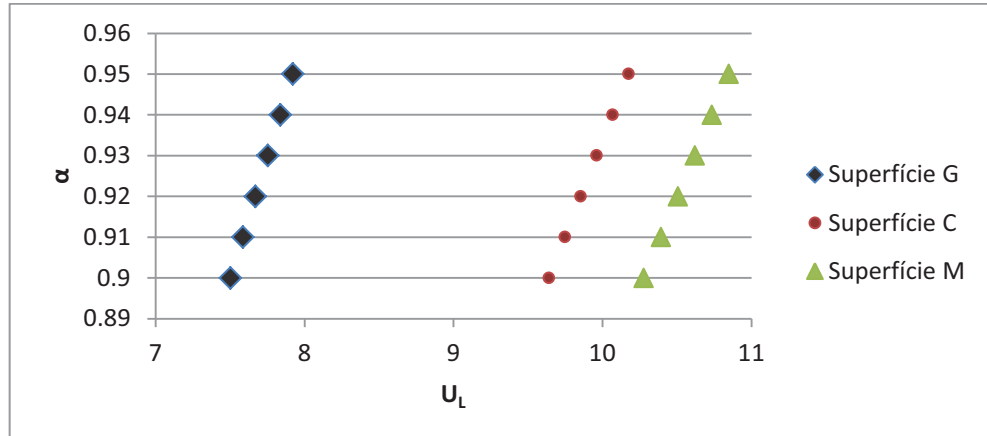
	Superfície M [°C]	Superfície C [°C]	Superfície G [°C]	Radiação Solar [W/m²]	T _a [°C]
30/05/2014	93	97	116	787	32
02/06/2014	96	101	119	809	33
03/06/2014	87	89	104	783	32

Através dos gráficos mostrados nas figuras 10, 11 e 12, e da tabela 2, é possível observar que a superfície G, superfície composta apenas por granito, foi a que atingiu as maiores temperaturas em todos os dias de teste. Para os testes realizados, o uso do CRFO na composição da superfície não foi satisfatório, uma vez que essa foi a superfície que atingiu as menores temperaturas.

4.2 Comparação entre as diferentes superfícies

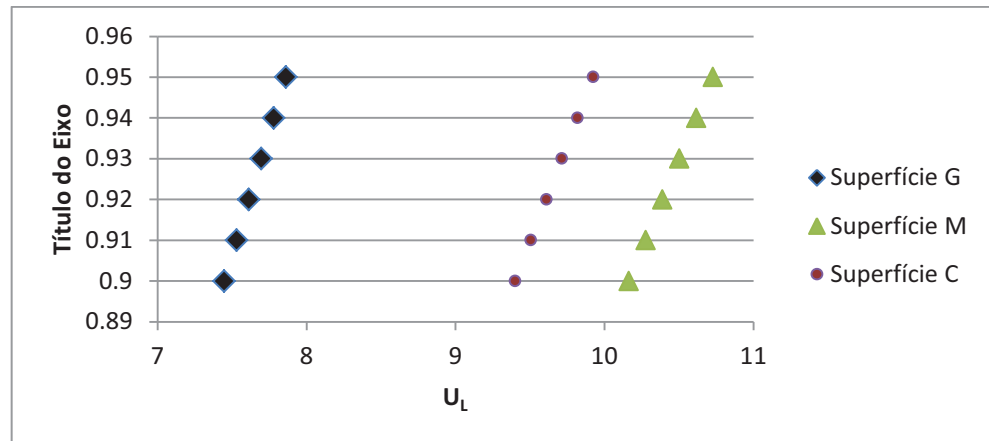
Foram utilizados gráficos para resumir os valores de U_L encontrados para cada dia e para cada superfície, com os respectivos valores de α . Através dos gráficos foi possível visualizar a diferença em cada superfície. Como U_L representa as perdas de calor, quanto maior seu valor, menos eficiente é a superfície seletiva, uma vez que os parâmetros relacionados aos aspectos construtivos do protótipo não influenciam na comparação entre as superfícies, por essas estarem submetidas às mesmas condições, conforme já foi mencionado.

Figura 13 – Dados comparativos dia 30/05/2014



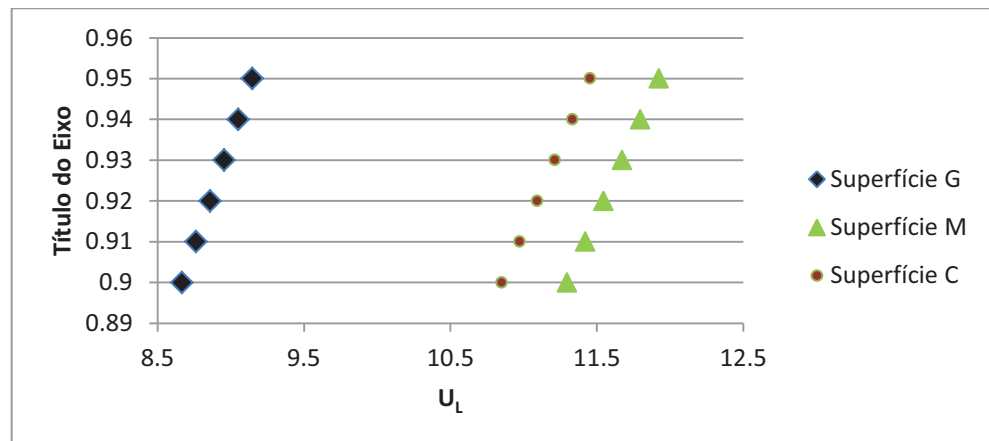
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Dados comparativos dia 02/06/2014



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Dados comparativos dia 03/06/2014



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os gráficos das figuras 13,14 e 15 mostram que a superfície G foi a que obteve os menores valores para U_L .

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

Esta dissertação abordou a obtenção de uma nova superfície seletiva para coletores solares de placa plana de baixo custo utilizando pó de granito verde-ubatuba. Para isso, foi construída uma bancada de testes na qual foi possível testar três superfícies seletivas, uma composta por pó de granito, outra por uma mistura de pó de granito e CRFO e uma terceira superfície comercial. A bancada de testes se mostrou satisfatória para a realização dos experimentos.

As três superfícies foram testadas sob as mesmas condições, e a superfície que atingiu as maiores temperaturas foi aquela composta de pó de granito. O uso do CRFO misturado ao pó do granito para obtenção das superfícies seletivas não se mostrou adequado, tendo em vista que houve uma diminuição considerável nas temperaturas atingidas por essa superfície em relação as outras. Portanto, essa nova superfície (composta de pó de granito) se mostrou promissora para aplicações em coletores solares térmicos de placa plana de baixo custo, uma vez que seu componente principal pode ser obtido a partir de resíduos, e os resultados de temperaturas obtidos superaram os da superfície comercial.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas conclusões obtidas no presente estudo são sugeridos os seguintes trabalhos:

- a) Pesquisar novos métodos de deposição no substrato metálico para melhorar a eficiência na deposição e a qualidade do acabamento de superfície.
- b) Estudar a composição química da superfície obtida nesse trabalho, à base de pó de granito, a fim de entender melhor o que causa esse aumento significativo nas temperaturas alcançadas por ela.
- c) Determinar absorvância e emitância da superfície à base de pó de granito através de ensaios de laboratório.
- d) Testar a superfície em um protótipo de coletor solar térmico de placa plana completo, com escoamento de água, obedecendo aos requisitos exigidos nas normas.

REFERÊNCIAS

ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UFRJ. Rio de Janeiro. Vol. 28-2/2005 p.139-151, 2005.

BARSHILIA, H. C. *et al.* **Structure and optical properties of pulsed sputter deposited $\text{Cr}_x\text{O}_y/\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ solar selective coatings.** *Journal of Applied Physics* 103. API Publishing LLC, 2008. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/103/2/10.1063/1.2831364?ver=pdfcov>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

BARSHILIA, H. C.; SELVAKUMAR, N.; RAJAM, K. S. **Thermal stability of $\text{TiAlN}/\text{TiAlON}/\text{Si}_3\text{N}_4$ tandem absorbers prepared by reactive direct current magnetron sputtering.** *Journal of Vacuum Science and Technology A* 25, Bangalore, Índia, 2007. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvsta/25/2/10.1116/1.2699425?ver=pdfcov>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

CAO, Y.; TIAN, J.; HU, X. **$\text{Ni}\pm\text{Cr}$ selective surface based on polyamide substrate.** *Thin Solid Films* 365. Elsevier Science. Shanghai, China, p. 49-52, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609099010950>>. Acesso em: 11 jun. 2013.

CHEN, B. *et al.* **Optical and structural properties of pulsed laser deposited $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ thin films.** *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92. Elsevier Science, p. 1025-1029, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024808000895>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 3. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

GITTLEMAN, J. I. *et al.* **Textured silicon: A selective absorber for solar thermal conversion.** *Applied Physics Letters* 35. API Publishing LLC. p. 742-744, 1979.

GOMES, C. A. **Estudo Comparativo de Superfícies Seletivas para Coletores Solares.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Carlos Antonio Silva Gomes – Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

GRANQVIST, C.G. **Solar-energy materials - overview and some examples.** *Applied Physics* 52. *Solids and Surfaces*, Gothenburg, p. 83-93 1991.

KALOGIROU, S. A. **Prediction of flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks.** *Solar Energy* 80. Elsevier Science, p. 248-259, 2006. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0500099X>. Acesso em: 20 jun. 2013.

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

KONTTINEN, P. *et al.* ***Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces***. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 79. Elsevier Science, p. 273-283, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024802004117>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

LÖFVING, S. ***A paint for selective solar absorbers***. *Solar Energy Materials* 5. North-Rolland Publishing Company, Göteborg, Suécia, p.103-105, 1981.

MADHUKESHWARA, N.; PRAKASH, E. S. ***An investigation on the performance characteristics of solar flat plate collector with different selective surface coatings***. *International Journal of Energy and Environment*. v. 3, n. 1, p. 99-108, 2012. Disponível em: <http://www.ijee.ieefoundation.org/vol3/issue1/IJEE_10_v3n1.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2013.

MARTINS, M. ***Produção de Superfícies Seletivas por Magnetron Sputtering para Aplicação em Coletores Solares***. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MCENANEY, K. ***Modeling of Solar Thermal Selective Surfaces and Thermoelectric Generators***. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, 2010.

MILLS, D. R. ***Limits of Solar Selective Surface Performance***. *Applied Optics*, v. 24, n. 20, p. 3374-3380, 1985.

NUNES, C. *et al.* ***Deposition of PVD solar absorber coatings for high-efficiency thermal collectors***. *Vacuum* 67. Elsevier Science, p. 623-627, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X02002634>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

QUASCHNING, Volker. ***Understanding Renewable Energy Systems***. Stertling, VA: Earthscan, 2005.

RANDICH, E.; PETTIT, R. B. ***Solar selective properties and high temperature stability of CVD ZrB₂***. *Solar Energy Materials* 5, Albuquerque, p. 425-435, 1981.

SCHÜLER, A. *et al.* ***Application of titanium containing amorphous hydrogenated carbon films (a-C : H/Ti) as optical selective solar absorber coatings***. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 60. Elsevier Science, p. 295-307, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024899000744>>. Acesso em: 11 jun. 2013.

SELVAKUMAR, N. *et al.* ***Spectrally selective CrMoN/CrON tandem absorber for mid-temperature solar thermal applications***. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 109. Elsevier Science, p. 97-103, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812004709>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

SELVAKUMAR, N.; BARSHILIA, H. C. *Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications*. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 98. Elsevier Science. Bangalore, Índia, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811005939>>. Acesso em: 27 ago. 2013.

SHIMIDT, R. N.; PARK, K. C.. *High-temperature space-stable selective solar absorber coatings*. *Applied Optics*, v. 8, n. 8, p. 917-927, 1965.

TEIXEIRA, V. *et al.* *Spectrally selective composite coatings of Cr-Cr₂O₃ and Mo-Al₂O₃ for solar energy applications*. *Thin Solid Films* 392. Elsevier Science, p. 320-326, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609001010513>>. Acesso em: 11 jun. 2013.

TEIXEIRA, V. *et al.* *Chromium-based thin sputtered composite coatings for solar thermal collectors*. *Vacuum* 64. Elsevier Science, p. 299-305, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X01003724>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

TIAN, Y.; ZHAO, C. Y. *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*. *Applied Energy* 104. Elsevier Science, p. 538-553, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008549>>. Acesso em: 27 ago. 2013.

VIEIRA, S. G.. **Obtenção, Caracterização e Aplicação de uma nova Superfície Seletiva para Coletores Solares Térmicos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.