

Recebido: 26/09/2023 | Revisado: 29/12/2023 | Aceito: 07/02/2023 | Publicado: 01/03/2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 Unported License.

DOI: 10.31416/rsdv.v12i1.684

## **Desenvolvimento e avaliação de painéis evaporativos constituídos a partir de bucha vegetal (*Luffacylindrica*), fibras de coco (*Cocos nucifera*) e fibras de sisal (*Agave sisalana*).**

Development and evaluation of evaporative panels made from loofah (*Luffa cylindrica*), coconut fibers (*Cocos nucifera*) and sisal fibers (*Agave sisalana*).

### **MACHADO, N.S. Doutor em Engenharia Agrícola**

Universidade Federal do Vale do São Francisco - Campus Ciências Agrárias. BR 407, km 119, Projeto de irrigação Senador Nilo Coelho - Petrolina - Pernambuco - Brasil. CEP: 56.300-000 / Telefone: (87) 9 9608-9108 / E-mail: neiton.machado@univasf.edu.br

### **DOS SANTOS, M.F.A. Bacharel em engenharia agrônômica**

Universidade Federal do Vale do São Francisco - Campus Ciências Agrárias. BR 407, km 119, Projeto de irrigação Senador Nilo Coelho - Petrolina - Pernambuco - Brasil. CEP: 56.300-000 / E-mail: matheusfrancelino@hotmail.com

### **BAMBERG, J.V.M. Bacharel em engenharia agrônômica**

Universidade Federal do Vale do São Francisco - Campus Ciências Agrárias. BR 407, km 119, Projeto de irrigação Senador Nilo Coelho - Petrolina - Pernambuco - Brasil. CEP: 56.300-000 / E-mail: jonesoburgo@gmail.com

### **MELO JUNIOR, J.C.F. Doutor em Engenharia Agrícola**

Universidade Federal do Vale do São Francisco - Campus Ciências Agrárias. BR 407, km 119, Projeto de irrigação Senador Nilo Coelho - Petrolina - Pernambuco - Brasil. CEP: 56.300-000 / E-mail: julio.melo@univasf.edu.br

### **MOGAMI, C.A. Doutora em Engenharia Agrícola**

Instituto Federal do Sertão Pernambucano - Zona Rural. PE 647, km 22, Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Núcleo 4 - Petrolina - Pernambuco - Brasil. CEP: 56.300-000 / E-mail: cristina.mogami@ifsertao-pe.edu.br

## **RESUMO**

O setor agroindustrial brasileiro vem implementando constantes inovações em instalações e equipamentos, dentre as quais se destacam aquelas relacionadas aos sistemas de resfriamento evaporativo (SRE). A utilização de galpões agroindustriais ou túneis de vento convencionais para pesquisas de desenvolvimento de placas evaporativas fabricadas com materiais alternativos disponíveis em diversas regiões do país é inviável. Entretanto, com ideias inovadoras, como o túnel de vento reduzido, é possível realizar esse tipo de estudo a baixo custo em uma universidade pública. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivos: 1) construir placas evaporativas a partir de fibras vegetais naturais, com baixo custo; 2) avaliar a eficiência de resfriamento das placas no túnel de vento limitado disponível no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente do Campus de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Vale do São Francisco em Petrolina, PE. Foram obtidos dados de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar externo, próximos aos painéis evaporativos, e no interior do duto do túnel de vento limitado para três diferentes vazões de ar e três espessuras de placa evaporativa contendo bucha vegetal, fibra de coco e fibra de sisal. As placas contêm fibras de bucha vegetal com maiores valores de eficiência de atualização quando comparadas com as demais. Os bons resultados de eficiência de refrigeração, superiores a 90% em



algumas configurações, associados à disponibilidade dos materiais nas regiões tropicais a um baixo custo de aquisição, fazem com que as placas constituídas de fibras vegetais naturais sejam promissoras para o uso em sistemas de refrigeração evaporativo comercial.

**Palavras-chave:** ambiência, túnel de vento, material alternativo

## ABSTRACT

The Brazilian agroindustrial sector has been implementing constant innovations in installations and equipment, among which those related to evaporative cooling systems (ECS) stand out. The use of agro-industrial warehouses or conventional wind tunnels for research into the development of evaporative panels manufactured with alternative materials available in different regions of the country is unfeasible. However, with innovative ideas, such as the reduced wind tunnel, it is possible to carry out this type of study at low cost at a public university. In this context, the present work had the following objectives: 1) construct evaporative plates from natural vegetable fibers, at low cost; 2) evaluate the cooling efficiency of the plates in the limited wind tunnel available at the Rural Constructions and Ambience Laboratory of the Agricultural Sciences campus of the Federal University of Vale do São Francisco in Petrolina, PE. Temperature, relative humidity and external air speed data were obtained, close to the evaporative panels, and inside the limited wind tunnel duct for three different air flows and three thicknesses of evaporative plate containing vegetable bushing, coconut fiber and of sisal. The plates contain loofah fibers with higher update efficiency values when compared to the others. The good refrigeration efficiency results, exceeding 90% in some configurations, associated with the availability of materials in tropical regions at a low acquisition cost, make plates made of natural vegetable fibers promising for use in refrigeration systems commercial evaporative.

**Keywords:** ambience, wind tunnel, alternative material

## INTRODUÇÃO

O setor agroindustrial brasileiro vem apresentando constantes inovações em instalações, materiais, técnicas e equipamentos. Entretanto, em climas semiáridos, os altos valores de temperatura associados às baixas umidades relativas, sobretudo no verão, têm sido limitantes no quesito de aproveitamento máximo do desempenho animal dentro destas instalações modernas. Como alternativa, busca-se amenizar este, desconforto com a instalação de equipamentos de condicionamento térmico artificial no interior destas instalações.

Sistemas de resfriamento evaporativo (SRE), com auxílio de ventiladores ou exaustores, forcem a passagem do ar, mais quente, através de um material poroso umedecido, promovendo assim a troca de calor e, conseqüentemente, promovendo o resfriamento do ar de saída. Diversos autores (Gates *et al.* 1991, Bottcher *et al.* 1991, Ryan *et al.* 1992, Aljmal 1994, Tinôco 1996, Ali *et al.* 1999 e Arbel *et al.* 1999) afirmam que o SRE tem se tornado padrão em muitas instalações zootécnicas e casas de vegetação. As placas de celulose corrugada têm sido comumente empregadas neste processo de resfriamento evaporativo, todavia, apresentam inconvenientes como o alto custo de aquisição e baixa durabilidade em condições de temperatura e umidade elevadas. Por estas e outras razões, surgiram indagações sobre a possibilidade de se utilizar, nestes sistemas, materiais alternativos como, carvão vegetal, brita, argila expandida (cinasita) ou fibras vegetais naturais disponíveis nas regiões tropicais.



A avaliação comparativa de materiais porosos, tal como as fibras vegetais naturais, quando envolve o estudo diretamente em galpões agroindustriais ou em túneis de vento convencionais, muitas vezes inviabiliza a pesquisa por questões de custo e disponibilidade do espaço para implementação de experimentos científicos. Neste sentido, Liao e Chiu (2002), em Taiwan, desenvolveram um túnel de vento reduzido para estudo de materiais para SRE e concluíram que o protótipo poderia ser adequado aos experimentos relativos ao estudo de materiais alternativos.

Vigoderis (2002), Vigoderis *et al.*, (2007), Rosa (2009) e Rosa *et al.*, (2011) estudaram materiais alternativos para confecção de placas evaporativas utilizando a metodologia proposta por Liao e Chiu (2002) para confeccionar o túnel de vento reduzido e obtiveram bons resultados quando compararam placas de cinasita em diferentes espessuras com placas de celulose.

Tinôco *et al.* (2002), na Universidade Federal de Viçosa, desenvolveram um estudo de comparação entre a eficiência de alguns materiais porosos alternativos encontrados no Brasil: cinasita (argila expandida), serragem, fibra vegetal e carvão, para o SRE. Nesse estudo, os autores concluíram que a confecção de placas porosas para resfriadores evaporativos, utilizando-se os materiais cinasita e carvão vegetal, indica vantagens tais como: custo de aquisição, durabilidade e eficiência de resfriamento sobre os demais materiais estudados (serragem e fibra de madeira).

Santos (2005), ao efetuar a análise técnica e econômica para utilização de insumos alternativos em um sistema de resfriamento evaporativo-adsorativo aplicado ao condicionamento de ar, concluiu que o armazenamento da água de chuva para utilização em resfriadores evaporativos é justificado pelo fato de que esse sistema poderá ser utilizado em qualquer região. O aproveitamento da água de chuva pode ser um bom negócio no ponto de vista econômico. Além de que, a política ambiental e social que muitas indústrias buscam torna essa tecnologia muito atrativa, ainda que o retorno de investimento não seja (obtido) em curto prazo. Ademais, o autor sugere como trabalhos futuros efetuar estudos de materiais recicláveis e mais baratos para os dessecantes e resfriadores evaporativos, contribuindo para diminuição de custos de implantação desses sistemas e, conseqüentemente, para a diminuição no retorno dos investimentos comparados com o sistema convencional.

Freitas (2007) realizou testes com três painéis alternativos de fibra de coco, os quais apresentaram altos coeficientes de transferência de calor e massa, o que pode viabilizar a utilização da fibra de coco em resfriamento evaporativo, bastando, apenas, definir uma geometria que permita uma alta eficiência na refrigeração evaporativa. O autor sugere para trabalhos futuros testes com novas geometrias de painéis com fibra de coco, bem como diversos tipos de fibra de coco, de forma a maximizar as transferências de calor e de massa, melhorando a eficiência do sistema e reduzindo a perda de carga.

Daí e Sumathy (2002), Castro e Pimenta (2004), Camargo *et al.* (2005), Heidarinejade Bozorgment (2007) e Wu *et al.* (2008), pesquisando por meio de simulação numérica quais parâmetros podem influenciar a eficiência do resfriamento evaporativo, afirmaram que a espessura das placas evaporativas é uma variável significativa. Outrossim, Brito *et al.* (2020) avaliando a aplicação da bucha vegetal (*Luffaegyptiaca*) para construção de colméias de resfriamento

evaporativo no oeste da Bahia afirmam que o material é viável e de fácil aplicação apresentando características de resfriamento próximo a das placas comerciais. Além disso, Fernandes et al (2022) afirmam que houve *maior redução nas variáveis térmicas e índices de conforto* quando efetuaram o pré-resfriamento da água usada no molhamento de placas porosas de sistemas de resfriamento evaporativo (SRE). *Ademais, os autores propuseram a equação empírica ( $F = - 0.010218 t_{\text{água}} - 0.017841 t_{\text{bs}} + 0.042595 t_{\text{bu}}$ ) para a estimativa do fator de desempenho de resfriamento em função da temperatura da água, da temperatura de bulbo seco e da temperatura de bulbo úmido do ar.*

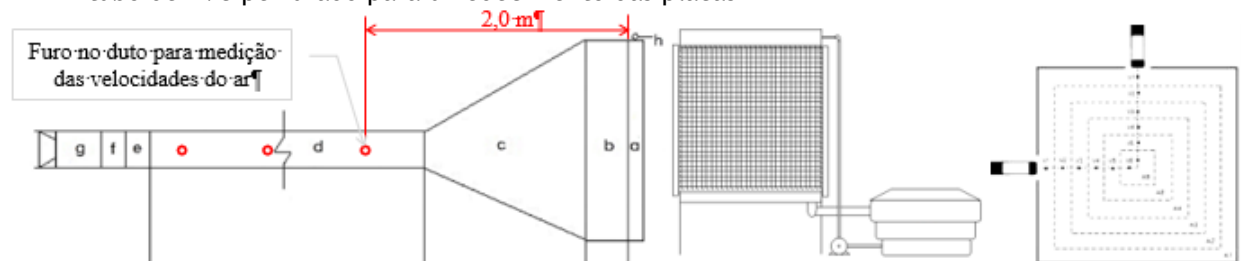
Neste contexto, objetivou-se com este trabalho construir placas evaporativas, de diversas espessuras, com fibras vegetais naturais (bucha vegetal, fibra de coco e fibra de sisal) ambas disponíveis na região nordeste do Brasil; e avaliar a eficiência de resfriamento das placas evaporativas utilizando um túnel de vento reduzido com diferentes vazões de ar.

## MATERIAL E MÉTODOS

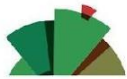
A construção das placas evaporativas ocorreu no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente do *campus* de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf) no município de Petrolina-PE (latitude: 09° 23' 55" S longitude: 40° 30' 03" W), no período de setembro a novembro de 2016.

As placas evaporativas foram construídas a partir de fibras vegetais naturais de bucha vegetal (*Luffacylindrica*), fibras de coco (*Cocos nucifera*) e fibras de sisal (*Agave sisalana*) em diferentes espessuras. As placas desenvolvidas foram avaliadas no túnel de vento reduzido do respectivo laboratório o qual obedece à recomendação de Liao e Chiu (2002) quanto à relação comprimento/largura ser maior ou igual a 10. A extremidade livre do exaustor é dotada de um anteparo cônico regulável visando à variação da abertura e, conseqüentemente, a regulação da vazão de ar que atravessa o duto do túnel conforme se observa na Figura 1.

**Figura 1.** Esquema do túnel de vento reduzido em que: **a)** Placa evaporativa; **b)** Câmara de seção quadrada de 1000x1000mm, **c)** Redução concêntrica com comprimento de 1500mm, **d)** Duto de seção quadrada de 400x400mm por 4000mm de comprimento, **e)** Adaptador de seção quadrada para circular de 400mm de comprimento, **f)** Exaustor de 400mm de diâmetro, **g)** Anteparo cônico móvel de 400 mm de comprimento para regular o fluxo, **h)** tubo de PVC perfurado para umedecimento das placas



Durante os testes das placas evaporativas, estas foram umedecidas com água, para permitir o resfriamento por evaporação. O sistema de molhamento foi constituído de um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro, posicionado logo acima das placas e perfurado a cada 35 mm, totalizando 28 orifícios, por onde saía jatos de água, que ao bater em um anteparo metálico, formava uma lâmina



d'água homogênea que escoava pelo material poroso (Figura 3g). Esse tubo foi alimentado com água pressurizada por um conjunto motobomba que possibilitou a regulação da vazão de água aplicada. Abaixo das placas evaporativas foi posicionada uma canaleta de PVC conectada a um tubo também de PVC de 50 mm, visando à coleta da água excedente.

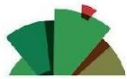
**Figura 2.** Vista do túnel de vento reduzido antes da instrumentação e acoplamento das placas evaporativas e sistema de molhamento



Foram medidos os valores de velocidade do ar próximo às placas evaporativas, pressão estática, temperatura de bulbo seco, umidade do ar externo e temperatura do ar interno para quatro diferentes aberturas do regulador de vazão (anteparo cônico). Com este procedimento, obtiveram-se os valores limites da vazão, desde a menor até a maior, fornecida pelo sistema. A partir destes dados, construiu-se a curva do ventilador para a situação de ensaio de cada placa.

Para obtenção das velocidades do ar antes da passagem pela placa, foram delineadas em tinta no próprio telado das placas evaporativas, quadrículas de dimensões 100 mm x 100 mm (Figura 3h). Para obter a velocidade média de escoamento do ar, foram medidas velocidades no centro geométrico de cada quadrícula da estrutura, totalizando 100 medições. As medidas foram obtidas utilizando-se um anemômetro digital de fio quente, considerando a calibração do fabricante. As leituras de pressão estática foram obtidas utilizando-se um manômetro com medidas em mmH<sub>2</sub>O e exatidão de 0,1 mmH<sub>2</sub>O (posteriormente convertidas em Pa), o qual foi acoplado, por meio de uma mangueira, a cada um dos tubos fixados nas faces do duto em três pontos distintos. Tal procedimento foi adotado a fim de averiguar a homogeneidade do fluxo de ar.

Para determinação da eficiência do resfriamento evaporativo ( $\eta$ ), foram obtidos valores de temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e da umidade relativa (UR) do ar, em intervalos de 30 segundos, por meio da programação dos sensores destes parâmetros. Para o ar de entrada, foi utilizado um sensor conjugado de temperatura e umidade conectado a um datalogger com resolução 0,1°C (temperatura) e 1% (umidade) e acurácia de  $\pm 0,3^\circ\text{C}$  (temperatura) e  $\pm 1\%$  (umidade). A temperatura de bulbo seco do ar de saída, ou após a passagem pelo material poroso, foi obtida por termistores acoplados a um datalogger, com resolução de 0,1°C e acurácia de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , em três pontos distintos dentro do duto (no início, a 1 m e a 2 m de distância da placa evaporativa). De posse desses valores, foi determinada a temperatura de bulbo úmido e, posteriormente, foi calculada a eficiência do resfriamento evaporativo ( $\eta$ ) por meio da equação 1 (ASHRAE, 1983).



$$\eta_{(\%)} = \frac{Tbs_1 - Tbs_2}{Tbs_1 - Tbu_1}$$

Equação 1

Em que:

$Tbs_1$  = temperatura de bulbo seco do ar, antes de passar pelo material poroso (°C);

$Tbs_2$  = temperatura de bulbo seco do ar, após passar pelo material poroso (°C);

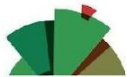
$Tbu_1$  = temperatura de bulbo úmido do ar, antes de passar pelo material poroso (°C).

Os valores de perda de carga, velocidade média do ar próximo às placas evaporativas e eficiência do resfriamento evaporativo ( $\eta$ ), obtidos nas avaliações com o túnel de vento reduzido, foram comparados àqueles fornecidos pelos ábacos do fabricante da celulose corrugada, a fim de averiguar a confiabilidade do túnel de vento reduzido. A variável de entrada dos ábacos para obtenção da pressão estática e eficiência do resfriamento evaporativo foi à velocidade média próxima à placa evaporativa, fornecida pelo túnel de vento reduzido.

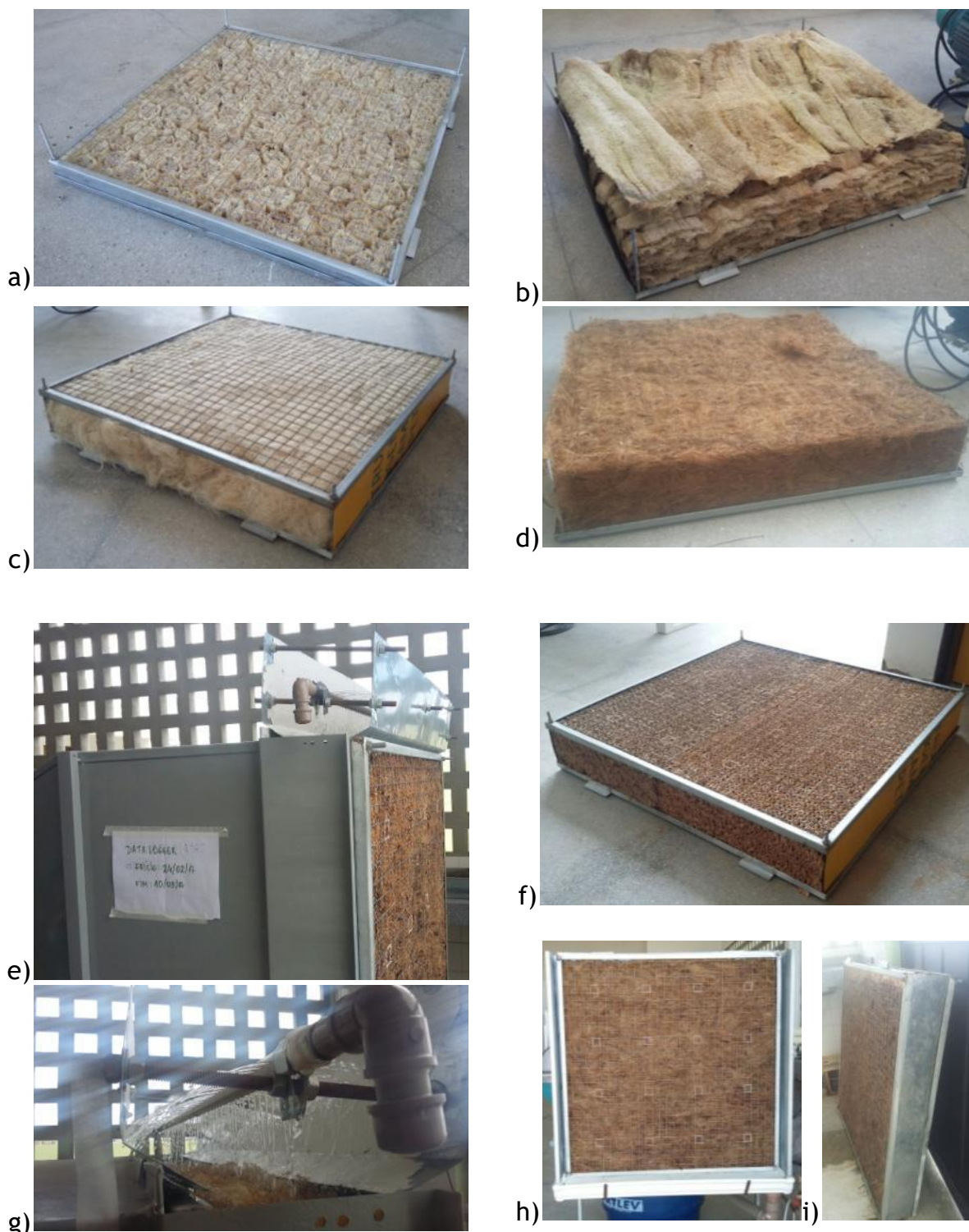
Para avaliação das fibras vegetais naturais como material constituinte dos painéis evaporativos, foram confeccionadas três diferentes espessuras de painel (100 mm, 125 mm e 150 mm), exceto as placas confeccionadas com bucha vegetal (50 mm, 75 mm e 100 mm) por limitação da quantidade de material disponível para este trabalho. Tais espessuras foram determinadas com base em experimentos em túnel de vento reduzido anteriormente realizados por Silva (2002), no município de Palotina, PR. As dimensões das placas de 1000 x 1000 mm foram adotadas visando maximizar a praticidade no manuseio e acoplamento no túnel mantendo a caracterização dos parâmetros analisados, sendo fixadas à abertura da câmara por meio de parafusos.

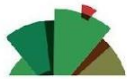
Para a avaliação das placas evaporativas (Figura 3), foram realizadas interações entre três fatores: tipo de fibra vegetal natural, espessura do painel e vazão do ar, mantendo constante a vazão de água aspergida.

Foram utilizados três tipos de fibras, sendo: fibras de bucha vegetal (FB), fibras de coco (FC) e fibras de sisal (FS). As espessuras dos painéis evaporativos utilizadas na validação foram de 100 mm (E1), 125 mm (E2) e 150 mm (E3) para as fibras de coco e de sisal, já para as buchas vegetais foram 50 mm (E1), 75 mm (E2) e 100 mm (E3). Cada abertura do regulador de vazão foi denominada V1, V2 e V3, sendo V1 a menor e V3 a maior vazão de ar.



**Figura 3.** Vista das placas de resfriamento em que: a) placa evaporativa constituída de bucha vegetal (*Luffaaegyptiaca*) configuração 1; b) placa evaporativa constituída de bucha vegetal (*Luffaaegyptiaca*) configuração 2; c) placa evaporativa constituída de fibra de sisal (*Agave sisalana*); d) placa evaporativa constituída de fibra de coco (*Cocos nucifera*); e) detalhe da placa acoplada ao túnel de vento reduzido; f) placa evaporativa comercial constituída de celulose; g) detalhe do sistema de aspersão de água sobre a placa; h) vista frontal da placa constituída com fibra de coco acoplada ao túnel de vento reduzido; i) vista lateral da placa constituída de fibra de coco; j) detalhes das configurações preliminares das placas confeccionadas com fibra de coco





A configuração final adotada, neste trabalho, para as placas confeccionadas com bucha vegetal foi a ilustrada na Figura 3b, ou seja, as buchas foram abertas e posicionadas em forma de camadas sobrepostas cruzadas.

Segundo o fabricante, o exaustor de 400 mm de diâmetro acoplado no túnel de vento é capaz de oferecer uma vazão  $4200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  para uma pressão estática de 13 milímetros de coluna de água (mmca), a uma rotação de 1600 rpm, com uma potência fornecida de 184 Watts. Dessa forma, com três tipos de fibras, três espessuras e três vazões, formaram-se 27 conjuntos de medidas para os testes; e, para cada conjunto foram feitas três repetições.

A medição da vazão de água aspergida foi realizada por meio da pesagem da água coletada durante 5 segundos. Foram realizadas 5 repetições para cada tratamento, sendo calculada sua média e erro padrão. Tal procedimento teve caráter de controle, para que não fosse disponibilizada uma maior quantidade de água para determinado tratamento, alterando e interferindo significativamente nos resultados obtidos. A vazão de água média foi de  $0,33 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  com erro padrão de  $\pm 0,008$ .

Para as medições das velocidades do ar no interior do duto, primeiramente, efetuaram-se furos no duto, localizados a dois metros de distância da placa evaporativa, um lateralmente e o outro na parte superior. Por meio desses furos, foi possível inserir dois anemômetros de fio quente marca Instrutherm, modelo TAFR-190, de  $0,01 \text{ m s}^{-1}$  de resolução e acurácia de  $\pm 1\%$ , conforme ilustrado na Figura 1.

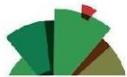
Os anemômetros registraram a velocidade do ar a cada 0,04m de distância até o centro do duto, seguindo esquema ilustrado na Figura 1. Cada medida foi obtida através da média de valores correspondentes a 20 segundos, sendo feita triplicata para cada área representativa. Ao final, foi obtida a soma de vazão para a área total.

Esse procedimento foi realizado para as seguintes aberturas do regulador de vazão: 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm, 13 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm e 45 cm, resultando em vazões totais para cada abertura de regulador. De posse desses dados, foi possível criar gráficos (abertura x vazão) e gerar uma equação representativa, com o objetivo de estimar as aberturas que correspondessem as vazões  $0,111 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $0,306 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $0,694 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ,  $1100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ,  $1800 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  e  $2500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , respectivamente). Esses valores de vazões foram determinados a partir da limitação do sistema. Todo esse procedimento foi realizado para cada placa evaporativa avaliada, já que essas apresentavam características diferentes que influenciavam na passagem de ar.

Através da equação de continuidade, em que a vazão é igual à área da seção transversal multiplicado pela velocidade, foi possível estimar as velocidades de ar próximas a placa evaporativa, a partir dessas vazões determinadas. Sendo, portanto, delimitadas as velocidades de ar:  $V_1 = 0,12 \text{ m s}^{-1}$ ;  $V_2 = 0,33 \text{ m s}^{-1}$ ;  $V_3 = 0,54 \text{ m s}^{-1}$  e  $V_4 = 0,75 \text{ m s}^{-1}$ .

Depois de determinado o material, espessura e verificadas as aberturas do regulador de vazão para as velocidades próximas a placa evaporativa, ocorreram os ensaios para avaliação da eficiência de resfriamento evaporativo.





Cada ensaio de eficiência evaporativa foi feito durante 60 minutos, sendo os primeiros 30 minutos destinados a homogeneizar o fluxo de ar e proporcionar o molhamento uniforme da placa evaporativa. Durante os instantes 30 min., 35 min., 40 min., 45 min., 50 min., 55 min. e 60 min. foram medidos os valores de temperatura do bulbo seco interna, como também os valores de temperatura externa de bulbo seco e molhado para o cálculo de eficiência evaporativa. No ensaio, foi também verificada a vazão da água.

As comparações entre os tratamentos foram realizadas por meio do ajuste de curvas de respostas tridimensionais com auxílio do software SigmaPlot 11.0, assim como a confecção das curvas do ventilador com as placas evaporativas com diferentes materiais e espessuras acopladas ao túnel de vento reduzido.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse dos dados de vazão para as aberturas (1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm, 13 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm e 45 cm) do regulador cônico foi possível elaborar gráficos (abertura x vazão) conforme ilustrado na Figura 4 e obter equações de ajuste do terceiro grau (equação 2) pelo método do quadrado mínimo dos erros. Ademais, os coeficientes de ajuste foram estimados, automaticamente, pelo software utilizado, para cada espessura de cada material constituinte das placas evaporativas. Com as curvas do ventilador elaboradas para cada espessura de placa, definiu-se a abertura do defletor cônico que correspondessem as vazões propostas na metodologia. Esses quatro valores de vazões foram determinados a partir da limitação do túnel de vento reduzido.

$$V = a + bX + cX^2 + dX^3$$

Equação 2

Em que:

$$V = \text{Vazão (m}^3\text{h}^{-1}\text{)};$$

$$X = \text{Abertura do defletor (cm)}$$

Os coeficientes de ajuste a,b,c e d da equação 2 encontram-se discriminados na tabela 1 para os diferentes materiais nas suas respectivas espessuras das placas evaporativas avaliadas.

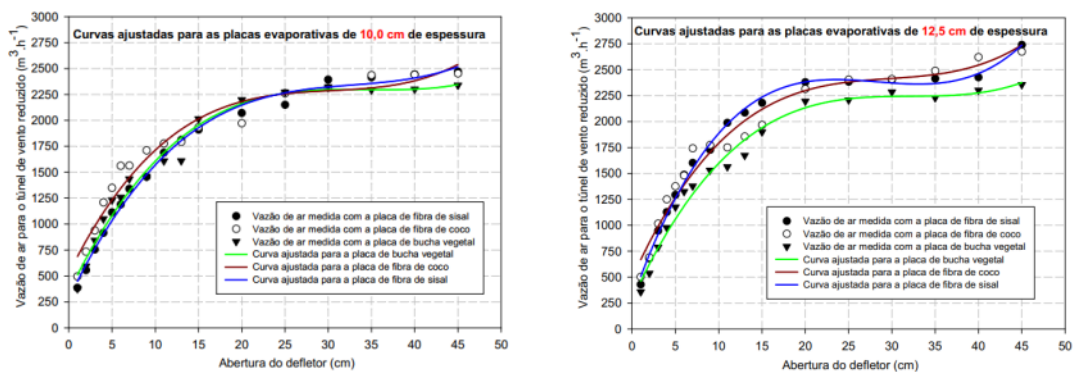
**Tabela 1.** Valores dos coeficientes das curvas do ventilador do túnel de vento reduzido para os diferentes tipos de material e espessuras das placas evaporativas

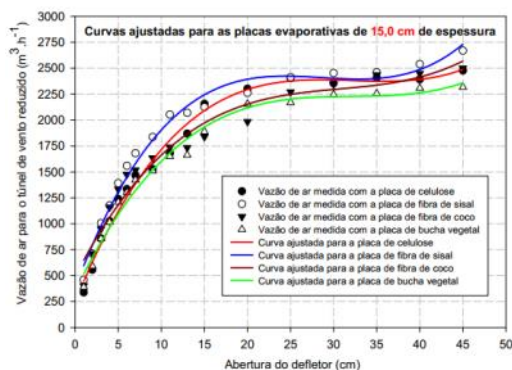
Placas evaporativas com 100 mm de espessura					
Material das placas	Parâmetro da equação de regressão	Valor ajustado	Erro padrão	P valor	R <sup>2</sup> ajustado
Fibra de sisal	a	277,2	45,8	<0,0001	0,992
	b	175,7	10,4	<0,0001	
	c	-5,2	0,6	<0,0001	
	d	0,1	0,01	<0,0001	
Fibra de coco	a	525,7	97,0	0,0001	0,951
	b	166,6	22,0	<0,0001	
	c	-5,4	1,2	0,0006	
	d	0,1	0,02	0,0050	
Bucha vegetal	a	343,6	75,147	0,0005	0,975
	b	171,5	16,996	<0,0001	



	c	-5,0	1,0	0,0001	
	d	0,05	0,01	0,0036	
<b>Placas evaporativas com 125 mm de espessura</b>					
Fibra de sisal	a	277,9	36,2	<0,0001	0,995
	b	236,7	8,2	<0,0001	
	c	-8,6	0,4	<0,0001	
	d	0,1	0,01	<0,0001	
Fibra de coco	a	491,4	277,9	0,0002	0,962
	b	183,0	21,3	<0,0001	
	c	-6,0	1,2	0,0002	
	d	0,1	0,02	0,0018	
Bucha vegetal	a	282,4	65,4	0,0008	0,981
	b	182,1	14,9	<0,0001	
	c	-5,7	0,8	<0,0001	
	d	0,1	0,01	0,0003	
<b>Placas evaporativas com 150 mm de espessura</b>					
Fibra de sisal	a	379,8	66,6	<0,0001	0,981
	b	222,7	15,1	<0,0001	
	c	-8,0	0,8	<0,0001	
	d	0,1	0,01	<0,0001	
Fibra de coco	a	491,2	97,194	0,0002	0,955
	b	162,0	22,0	<0,0001	
	c	-5,0	1,2	0,0010	
	d	0,1	0,02	0,0083	
Bucha vegetal	a	348,3	62,2	<0,0001	0,981
	b	173,8	14,1	<0,0001	
	c	-5,4	0,8	<0,0001	
	d	0,1	0,01	0,0003	
Celulose	a	246,2	60,8	0,0014	0,986
	b	204,8	13,8	<0,0001	
	c	-6,5	0,7	<0,0001	
	d	0,1	0,01	<0,0001	

**Figura 4** Exemplo das curvas do ventilador com as placas evaporativas de diferentes espessuras acopladas ao túnel de vento reduzido



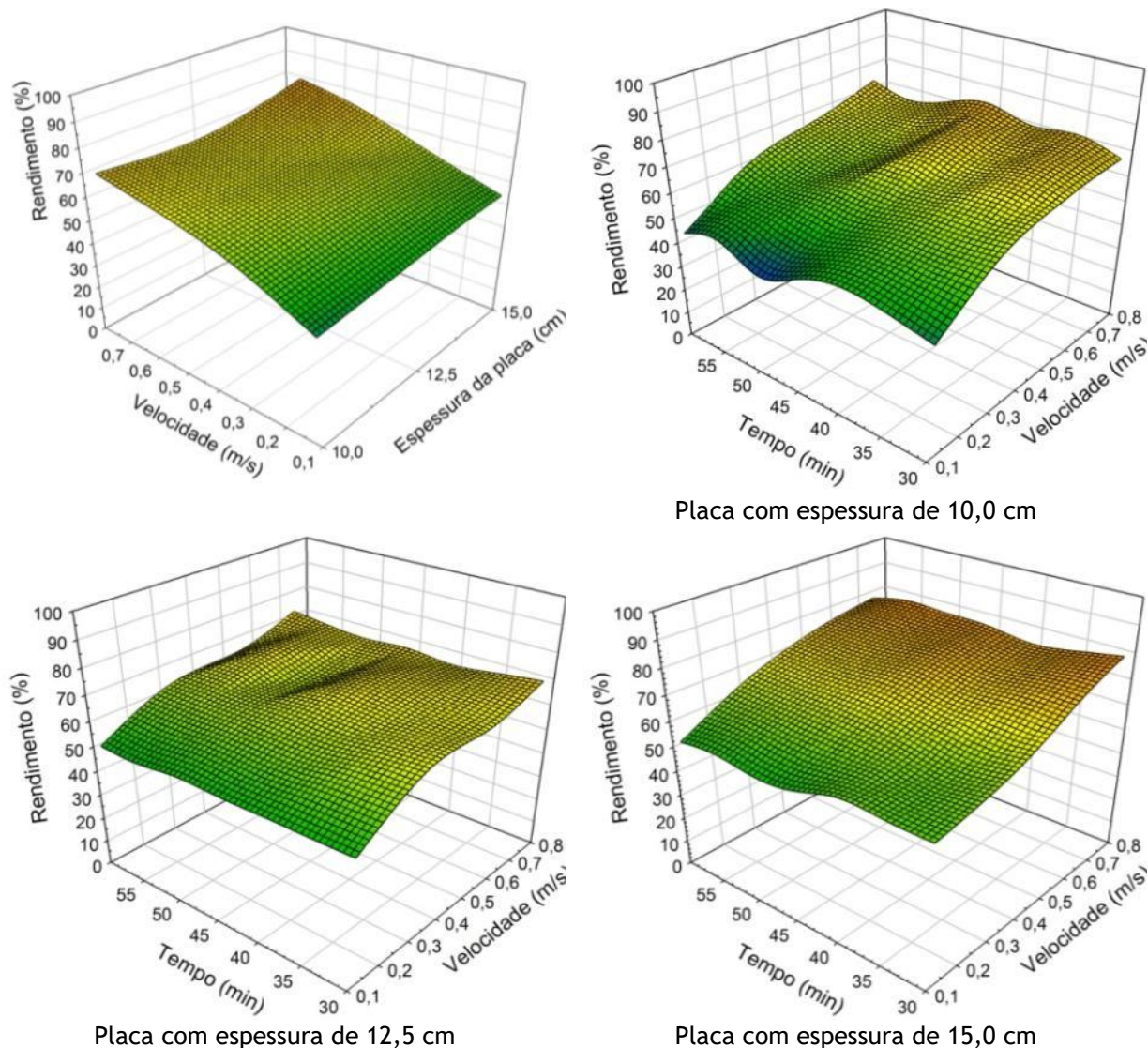


Conforme pode ser observado na Figura 4, resumidamente, pode-se afirmar que as placas constituídas de bucha vegetal em ambas as espessuras (100, 125 e 150 mm) apresentaram maiores perdas de cargas, ou seja, para a mesma espessura e a mesma abertura do defletor a vazão de ar no túnel de vento reduzido foi menor. Em contra partida, as placas constituídas de fibra de sisal para as espessuras 125mm e 150mm apresentaram menores perdas de carga, ou seja, maiores vazão de ar, no duto do túnel de vento reduzido, para a mesma abertura do defletor. Diante desta observação, vale ressaltar a importância de se construir as curvas do ventilador, previamente, para ajustar as vazões de ensaio (abertura do defletor) para materiais que apresentam características de porosidade diferente.

Ademais, de modo geral, pode-se afirmar que os resultados de eficiência de resfriamento evaporativos das placas construídas com fibras vegetais natural, nas condições do presente estudo, foram superiores aos valores numéricos encontrados por diversos autores: Al-Sulaiman (2002), Liao e Chiu (2002), Silva (2002), Alodane Al-Faraj (2005), Barros (2005), Araújo (2006), Rawangkulet *al.* (2008) e Kulkarni e Rajput (2010), que analisaram a eficiência de painéis com materiais alternativos comparando-os a painéis comerciais, de celulose rígida corrugada (Papel Kraft).

### Avaliação das placas confeccionadas com fibra de coco

Observou-se que a placa evaporativa de fibra de coco com espessura de 150 mm obteve o maior rendimento quando a velocidade foi máxima, chegando a apresentar 81,37% de rendimento, e que a placa de 100 mm apresentou maior rendimento se comparada a placa evaporativa de 125 mm quando se tem velocidade máxima, conforme pode ser observado na Figura 5.

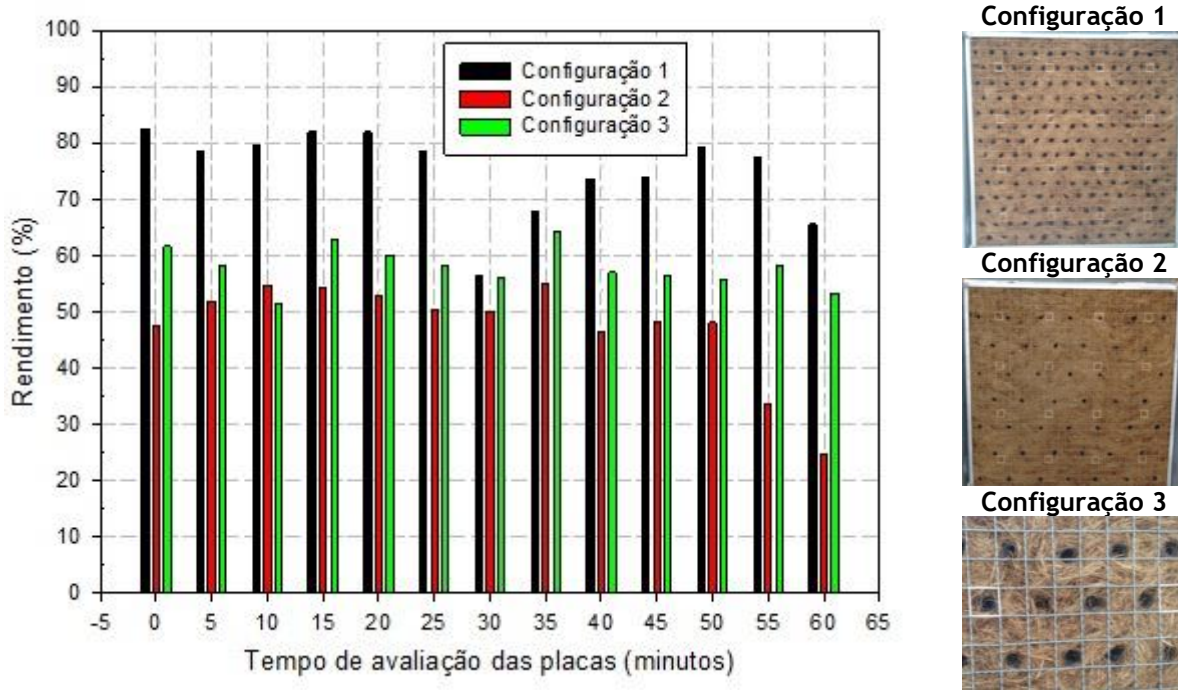


Placa com espessura de 10,0 cm  
Placa com espessura de 12,5 cm  
Placa com espessura de 15,0 cm  
**Figura 5.** Rendimento das placas evaporativas confeccionadas com fibras de coco (*Cocos nucifera*)

Estes resultados foram superiores aos encontrados por Barros (2005), que verificou para painéis constituídos com fibra de coco eficiência de resfriamento evaporativo de 53%. Valor este similar ao encontrado por Araújo (2006), que encontrou eficiência de resfriamento de 52,24% com velocidade do ar de  $1,83 \text{ ms}^{-1}$  para painéis fabricados com fibra de coco. Ambos os resultados corroboraram com Rawangkulet *al.* (2008) que, ao avaliar a eficiência de resfriamento de painéis de fibra de Coco, encontrou valores em torno de 35% e 50% de eficiência de resfriamento evaporativo.

Neste trabalho efetuou-se um pré teste com três outras configurações para a placa de 150 mm de espessura constituída com fibras de coco. Inseriram-se pedaços de espirais, normalmente utilizadas em encadernações, constituídas de fios de plásticos de 1,9mm de espessura com diâmetro da espiral de 22,4mm, na tentativa de aumentar a porosidade da placa e conseqüentemente o seu rendimento de resfriamento. Os resultados e ilustrações da configuração deste pré teste encontram-se na Figura 6

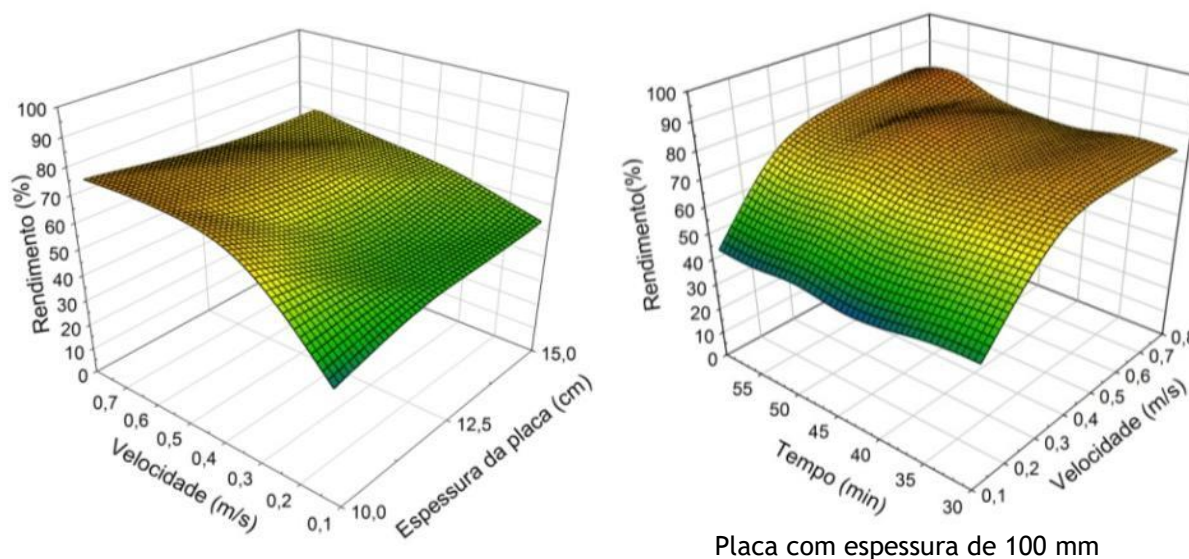
**Figura 6.** Rendimento de resfriamento evaporativo das placas de 15 cm de espessura constituídas de fibra de coco com variações na configuração inicial



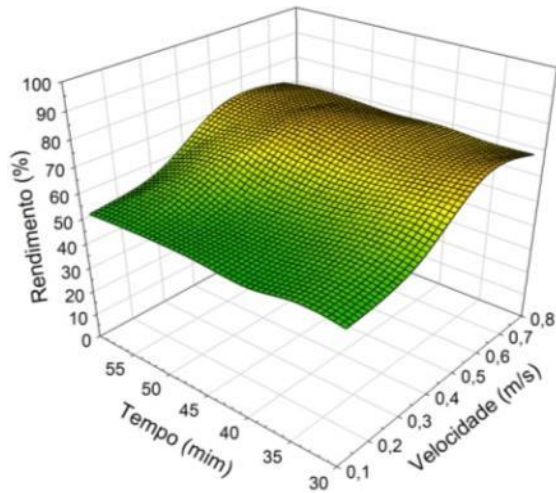
### Avaliação das placas confeccionadas com fibra de sisal

Verificou-se maior rendimento na placa evaporativa confeccionada com fibra de sisal quando a mesma possui a espessura de 100mm, e na medida em que a velocidade aumenta, chegando a um valor máximo de 83,90% de rendimento no processo de resfriamento do ar. E o rendimento diminui à medida em que a espessura e a velocidade diminuem, conforme pode ser observado na Figura 7.

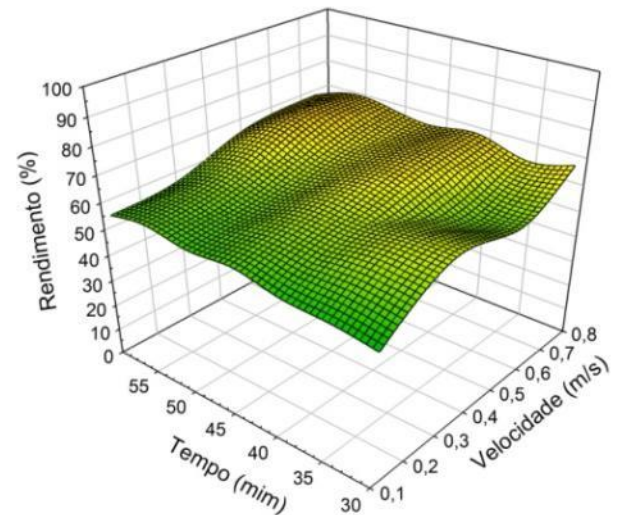
**Figura 7 -** Rendimento das placas evaporativas confeccionadas com fibras de sisal (*Agave sisalana*)



Placa com espessura de 100 mm



Placa com espessura de 125 mm



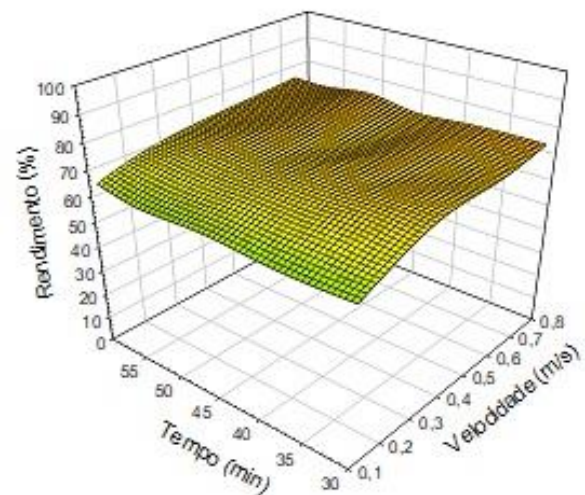
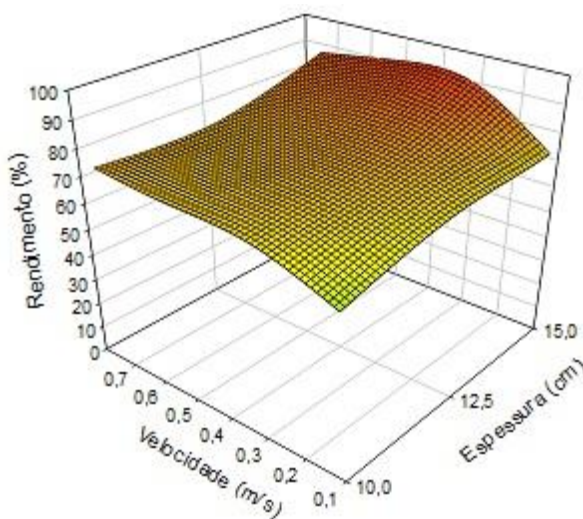
Placa com espessura de 150 mm

Estes resultados foram superiores aos encontrados por Araújo (2006), que encontrou eficiência de resfriamento de 44,95% com velocidade do ar de  $0,85 \text{ ms}^{-1}$  para os painéis de sisal. Barros (2005) encontrou, para painéis constituídos com fibra de sisal, eficiência de resfriamento evaporativo de 43,94%.

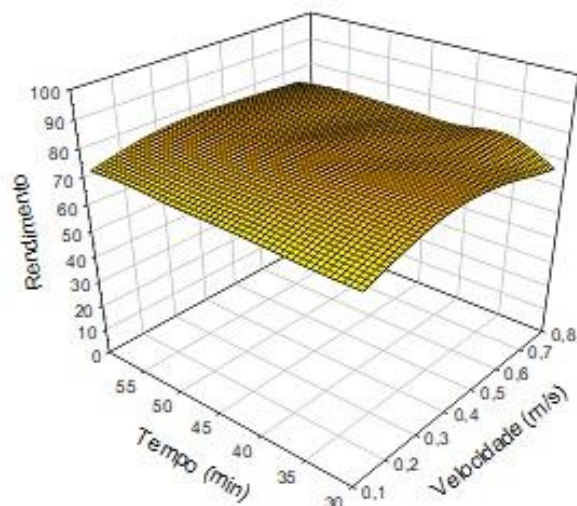
- **Avaliação das placas confeccionadas com bucha vegetal**

A placa confeccionada com fibra de bucha vegetal com espessura de 150mm, na velocidade  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ , obteve um rendimento superior as demais placas confeccionadas, independente da velocidade do ar, com valores de 87,12% de rendimento máximo. E a placa de 100mm de espessura foi a placa evaporativa que obteve o menor rendimento. conforme pode ser observado na Figura 8.

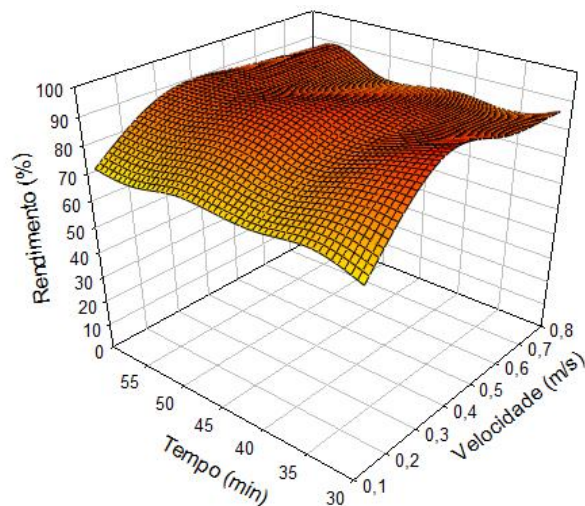
**Figura 8.** Rendimento das placas evaporativas confeccionadas com bucha vegetal (*Luffaegyptiaca*)



Placa com espessura de 100mm



Placa com espessura de 125mm



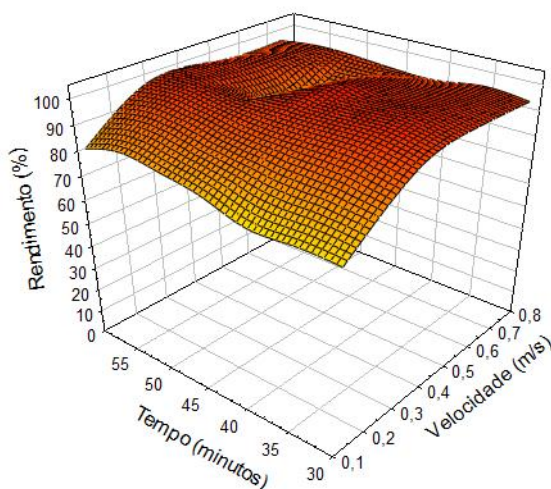
Placa com espessura de 150 mm

Estes resultados foram superiores ao encontrado por Araújo (2006), que obteve eficiência de resfriamento de 44,72% com velocidade do ar de  $0,4 \text{ ms}^{-1}$  para painéis com bucha vegetal. Al-Sulaiman (2002), avaliando a eficiência de resfriamento de placas evaporativas preenchidas com fibras de palma, de juta (*CorchorusCapsularis*) e bucha vegetal (*LuffaCilindrica*), encontraram eficiência de resfriamento em média 62,1% para a Juta, 55,1% para a bucha vegetal, 49,9% para os painéis de celulose e 38,95% para a palma. KulkarnieRajput (2010), ao avaliarem a eficiência de resfriamento de dois painéis com arranjo em forma de feixes de cordas fabricadas com fibras de juta em sistemas de resfriamento evaporativo do tipo direto, alcançaram 74% a 87% de rendimento para a melhor condição.

### Avaliação das placas confeccionadas com celulose

Para a placa de celulose (testemunha - espessura de 150 mm), ou seja, a placa comercial vendida no mercado, foi efetuado estudo de rendimento (%) em relação ao tempo (minutos), e velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ), já que não havia disponível variação de espessura para este tipo de placa (Figura 9). Pode-se observar que a placa evaporativa de celulose apresenta sempre valores elevados de rendimento, acima de 73%, e foi verificada eficiência máxima de 100% para algumas velocidades do ar. Ou seja, o produto comercial é realmente eficiente no que se propõe. Embora, apresente desvantagens quanto a durabilidade e custo de aquisição quando comparado com as placas de fibras vegetais naturais propostas.

**Figura 9.** Rendimento da placa evaporativa comercial confeccionada com fibras de celulose com espessura de 15,0 cm



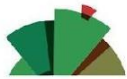
Consultando a literatura, verificou-se que Araújo (2006) encontrou eficiência de resfriamento de 65,92% com velocidade de  $1,9 \text{ ms}^{-1}$  para painéis constituídos de celulose rígida corrugada (papel Kraft). Enquanto, Barros (2005) encontrou para painéis comercial, de papel Kraft, eficiência de resfriamento evaporativo de 41,22%. Rawangkulet *al* (2008) encontrou eficiência de resfriamento evaporativo para painéis de celulose rígida corrugada em torno de 47%. Resultados estes inferiores ao encontrados neste trabalho.

Os resultados gerais deste trabalho corroboram com Oliveira (2011) e Oliveira *et al.* (2012a e 2012b), que ao investigar a eficiência do resfriamento evaporativo de duas estruturas compostas por materiais vegetais economicamente e ecologicamente viáveis (fibra de coco e esponja vegetal), comparadas àquela de um painel comercial (papel kraft), afirmaram que as fibras vegetais apresentam perspectivas promissoras para o uso em escala industrial. Ademais, foram superiores aos encontrados por Damasceno *et al* (2019) quando estudou a eficiência de resfriamento de uma placa porosa umedecida construída com argila expandida (cinasita).

## CONCLUSÃO

A fibra de bucha vegetal, em geral, apresentou maiores valores de médias de eficiência (61,4 a 90,6%) comparada ao coco (45,0 a 78,7%) e ao sisal (42,8 a 78,2%). Espessuras de placas evaporativas maiores, variando em torno de 13,6 a 15 cm são mais adequadas no uso de sistemas de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE's) com placas constituídas de fibra de coco e de 14,2cm a 15cm para bucha vegetal. Para painéis evaporativos com fibras de sisal é aconselhado o uso de espessuras com 10 cm. Velocidades de ar próximas a placa em torno de  $0,72$  a  $0,75 \text{ ms}^{-1}$  otimizam e maximizam os SRAE's para o material coco. No caso do material sisal, velocidades de ar na faixa de  $0,6$  a  $0,75 \text{ ms}^{-1}$ , melhoram o desempenho do sistema. Diferentemente do coco e sisal, velocidades compreendidas na faixa de  $0,51$  a  $0,68 \text{ ms}^{-1}$  são adequadas para SRAE's com placas evaporativas de fibra de bucha vegetal. A celulose quando comparada com os demais materiais apresentou maiores





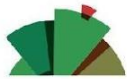
valores de eficiência evaporativa, para todas as velocidades de ar avaliadas. Como observado pelos resultados, às fibras vegetais (coco, sisal e bucha vegetal) são promissoras no uso em SRAE's, devido aos altos resultados de eficiência. Os valores de 0,56 e 0,52 ms<sup>-1</sup> de velocidade resultaram em 99,0 e 92,7% de eficiência para os materiais celulose e bucha vegetal, respectivamente. Diferentemente desses materiais supracitados, as fibras de coco e de sisal não obtiveram um ponto máximo.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Universidade Federal do Vale do São Francisco -Univasf pelo espaço; ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq pela concessão das bolsas de iniciação científica; ao Sr. Ostevaldo, proprietário da empresa TNC clima, pela doação do túnel de vento reduzido; ao Sr. José Carlos, representante comercial da Ventidelta, pela doação do exaustor, a Engenheira agrônoma Kátia Araújo Silva pela revisão no texto e adequação do manuscrito as diretrizes da revista; aos revisores ad-hoc; e aos demais colaboradores do projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, A.; AL-HAIDARY, A. A.; ALSHAIKH M. A. The effect of evaporative cooling in alleviating seasonal differences in milk production of Almarai dairy farms in the Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Animal*. v 12. n 4, p. 590-596, 1999.
- ALJMAL, K. Greenhouse cooling in hot countries. *Energy*. v 19. n 11, p. 1187-1192, 1994.
- ALODAN, M. A.; AL-FARAJ, A. A. Design and evaluation of galvanized metal sheets as evaporative cooling pads. *Agricultural Science*, Saudi Arabia, v. 18, n. 1, p. 9-18. Aug./Feb. 2005.
- AL-SULAIMAN, F., 2002. Evaluation of the performance of local fibers in evaporative cooling. *Energy Conversion and Management*, Dhahran, Vol. 43, n.16, pp. 2267-2273.
- ARAÚJO, S. D. O., 2006. "Análise do Desempenho Térmico de Fibras Vegetais em Sistemas de Resfriamento Evaporativo", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. Curso de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica.
- ARBEL, A.; YEKUTIELI, O.; BARAK, M. Performance of a fog system for cooling Green houses. *Journal of Agricultural Engineering Research*. v 72. n 2, p. 129-136, 1999.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. Evaporative air-cooling equipment. In: ASHRAE Equipment Handbook. Atlanta, 1983. part 1: Air-handling equipment, cap. 4, p. 1-10.
- BARROS, R. R., 2005. Bancada experimental para teste de enchimentos usados em climatizadores evaporativos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Curso de Engenharia Mecânica.
- BRITO, N.A.M., SATO, A.I., SOUZA, A.B., SILVA JUNIOR, L.J. Aplicação da bucha vegetal (*Luffaaegyptiaca*) para colméia de resfriamento evaporativo no oeste da Bahia. *Brazilian Journal Development*, Curitiba, v.6 n.6.p.366694-366709 jun. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n6-272
- BOTTCHER, R. W.; BAUGHMAN, G. R.; GATES, R. S. Characterizing efficiency of misting systems for poultry. *Transactionsof ASAE*. v 34. n 2, p. 586-590, 1991.
- CAMARGO, J. R., EBINUMA, C. D. AND SILVEIRA, J. L., 2005. Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city. *InternationalJournalofRefrigeration*, Vol. 28, pp.1124-1132.



CASTRO, W. P.; PIMENTA, J. M. D. Modelagem e simulação de painéis evaporativos diretos. Departamento de Engenharia Mecânica. In: 10° Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2004, Universidade de Brasília, Brasil. p.9. 2004.

DAI, Y. J. AND SUMATHY, K., 2002. Theoretical Study on a Cross-flow Direct Evaporative Cooler Using Honeycomb Paper as Packing Material. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp.1417-1430.

DAMASCENO, F.A., SILVA, E., BALIEIRO, J.I.D., NASCIMENTO, J.A.C., FERREIRA, M.R. Eficiência de resfriamento de uma placa porosa umedecida construída com argila expandida. *CIÊNCIA ET PRÁXIS*, V.12, N.23 p.7-10 2019

FREITAS, E. F. Construção de uma bancada otimizada para estudo de painéis evaporativos e ensaios de painéis de fibras vegetais. Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

FERNANDES, J.L.B., YANAGI JUNIOR, T., MOURA, J.B., RIBEIRO, A.O. Pre-cooling water applied to porous plates of evaporative cooling systems. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.52:11, e20201015, 2022. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20201015>

GATES, R. S.; USRY, J. L.; NIENABER, J. A. An optimal misting method for cooling livestock housing. *Transactions of ASAE*. v 34. n 5, p. 2199-2206. 1991.

HEIDARINEJAD, GH e BOZORGMEHR, M., 2007. Modeling of Indirect Evaporative Air Coolers. Building and Housing Research Centre, Iran and University of Tarbiat Modares. In: 2° PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete Island, Greece. p.5.

KULKARMI, R. K AND RAJPUT, S. P. S., 2010. Theoretical performance analysis of jute fiber rope bank as media in evaporative coolers. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol.3, n.10.

LIAO, C.; CHIU, K. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative coolings pads in Taiwan region. *Building and Environment*. v 37. p. 177-187. 2002.

OLIVEIRA, R. S., 2011. Análise experimental e numérica da eficiência de resfriamento de painéis de fibras vegetais utilizados em sistemas de resfriamento evaporativo, Tese de Doutorado, UFPE, Curso Engenharia Mecânica.

OLIVEIRA, R.S.; HENRÍQUEZ, J.R.; PRIMO, A.R.M. Determinação da eficiência de fibras vegetais utilizados para sistemas de resfriamento evaporativo direto. In VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho a 03 de Agosto 2012a, São Luis - Maranhão

OLIVEIRA, R.S.; HENRÍQUEZ, J.R.; PRIMO, A.R.M. Eficiência de painéis de fibras vegetais utilizados para sistemas de resfriamento evaporativo direto: um estudo experimental. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, v. 33, n. 1, p. 32-45, jun. 2012b.

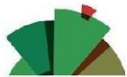
RAWANGKUL, R. KHEDARI, J., HIRUNLABH, J. AND ZEGHMATI, B., 2008. Performance analysis of a new sustainable evaporative cooling pad made from coconut coir. *International Journal of Sustainable Engineering*. Vol. 1, n.2, pp.117-131.

ROSA, J. F. V. Avaliação de painéis porosos constituídos de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo. 2009. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2009.

ROSA, J. F.; TINÔCO, I. F. F.; FERNANDES, C. M.; ZOLNIER, S.; BUENO, M. M. Análise da eficiência de resfriamento de painéis porosos preenchidos com argila expandida em comparação aos de celulose usando túnel de vento. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa - MG, v.19, n.6, p. 516-523, nov./dez. 2011.

RYAN, D. P.; BOLAND, M. P.; KOPEL, E. Evaluating two different evaporative cooling management systems for dairy cows in a hot, dry climate. *Journal of dairy science*. v. 75, n. 4, p. 1052-1059, 1992.

SANTOS M. A. M. Análise técnica e econômica para utilização de insumos alternativos em um sistema de resfriamento evaporativo-adsorativo aplicado ao condicionamento de ar. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.



SILVA, C. E. Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistema de resfriamento adiabático evaporativo do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel. 2002. Viçosa: UFV. 2002. 67 p. (Tese de mestrado).

SILVA, C. E., 2002. Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistemas de resfriamento evaporativo adiabático do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Curso de Engenharia Agrícola.

TINÔCO, I. F. F. Efeito de diferentes sistemas de acondicionamento de ambientes e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, em condições de verão e outono. 1996. Belo Horizonte: UFMG. 1996. 173 p. (Tese de doutorado).

TINÔCO, I. F. F.; FIGUEIREDO, J. L. A.; SANTOS, R. C.; PAULA, M. O.; PUGLLESI, N. L.; VIGODERIS, R, B. Avaliação de materiais alternativos utilizados na confecção de placas porosas para sistemas de resfriamento adiabático evaporativo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.1, p.147-150, 2002.

VIGODERIS RB, TINÔCO IFF, LACERDA FILHO AF, SILVA JN, GATES RS, PAULIDG, SILVA CE, GUIMARÃES MCC. Construção de túnel de vento reduzido, visando à avaliação de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo para arrefecimento térmico em galpões de produção animal. *Engenharia na Agricultura*. 2007; 15(3):191-199.

VIGODERIS, R. B. Desenvolvimento de um protótipo para resfriamento adiabático evaporativo, em instalações climatizadas para animais, usando argila expandida. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2002.

WU, J. M., HUANG., X. e ZHANG, H., 2008. Numerical investigation on the heat and mass transfer in a direct evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp.195-201.