

JOSÉ FRANCISCO VILELA ROSA

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS POROSOS CONSTITUÍDOS DE ARGILA
EXPANDIDA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO ADIABÁTICO
EVAPORATIVO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R788a
2009

Rosa, José Francisco Vilela, 1962-

Avaliação de painéis porosos constituídos de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo / José Francisco Vilela Rosa. – Viçosa, MG, 2009.

xix, 82f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 76-82.

1. Construções rurais - Aquecimento e ventilação - Avaliação. 2. Produção animal - Fatores climáticos. 3. Populações animais - Fatores climáticos. 4. Bioclimatologia. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.22

JOSÉ FRANCISCO VILELA ROSA

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS POROSOS CONSTITUÍDOS DE
ARGILA EXPANDIDA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO
ADIABÁTICO EVAPORATIVO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

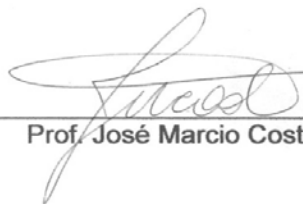
APROVADA: 15 de maio de 2009.



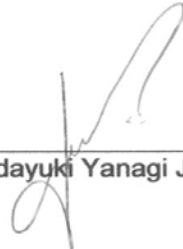
Prof. Carlos Magno Fernandes
(Co-orientador)



Prof. Jadir Nogueira da Silva



Prof. José Marcio Costa



Prof. Tadayuki Yanagi Júnior



Prof.^a Ilda de Fátima Ferreira Tinôco
(Orientadora)

À memória do meu querido pai *José Rosa*.

À minha querida mãe *Dirce*, pelo carinho e incentivo.

À minha esposa *Carla*, pelo incentivo, companheirismo e amor.

Às minhas filhas *Mariana* e *Ana Carolina*, pelo amor, pelo carinho e pela paciência.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, por ter me dado luz e perseverança durante a execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa - UFV, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola.

À Professora Ilda de Fátima Ferreira Tinoco, pela orientação, confiança, incentivo e amizade durante a realização deste trabalho – profissional da mais alta competência, por quem tenho uma grande admiração.

Ao Professor Carlos Magno Fernandes, pela orientação, pelo incentivo e pelo exemplo de competência e humildade – um grande amigo e irmão em vários momentos difíceis da execução deste trabalho.

Ao professor Sergio Zolnier, pelo apoio, pela dedicação e pelos valiosos ensinamentos, que muito contribuíram nesta pesquisa.

Aos professores Fernando da Costa Baêta, Jadir Nogueira da Silva, José Márcio Costa e Tadayuki Yanagi Júnior, pelo apoio e pelas sábias e oportunas sugestões. Ao professor Paulo Roberto Cecon, pela ajuda com as análises estatísticas.

Ao Sr. Geraldo Vaz de Melo Barbosa e à Sra. Francisca de Oliveira Barbosa, pelo carinho, pelo incentivo e pela paciência.

Ao amigo Mateus Marques Bueno, pela valiosa colaboração no período do experimento.

Aos amigos Irene Menegali, Maria Clara Guimarães, Neiton Machado, Cristina Akemi, Keller Rocha, Marcelo Bastos e Samuel Martin, pela colaboração acadêmica, pela convivência e, principalmente, pela bela amizade.

A Geraldo Vieira Júnior, pelo apoio, pelas oportunas colaborações e, acima de tudo pela amizade.

A Lourdes das Dores Santos, pelo apoio sempre presente.

BIOGRAFIA

JOSÉ FRANCISCO VILELA ROSA, filho de José dos Santos Rosa e Dirce Aparecida Vilela, nasceu em 21 de julho 1962, na cidade de Prata, Estado de Minas Gerais.

Em 1984, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (Viçosa - MG), diplomando-se em janeiro de 1989.

Em maio de 1992, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa (MG), com concentração na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas.

Em agosto de 2005, iniciou o curso de Pós-Graduação (Doutorado) em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa (MG), com concentração na área de Construções Rurais e Ambiente.

CONTEÚDO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Influência do clima quente na produção animal	4
2.2. Resfriamento adiabático evaporativo do ar.....	5
2.3. O sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE).....	8
2.4. Classificação dos sistemas de resfriamento evaporativo	9
2.4.1. Resfriamento evaporativo direto (RED).....	10
2.4.2. Resfriamento evaporativo indireto.....	11
2.4.3. Resfriamento evaporativo direto e indireto	13
2.4.4. Sistemas de resfriamento evaporativo por microaspersão	13
2.5. Materiais utilizados nas células evaporativas	15
2.6. Argila expandida	17

2.7. Ar ambiente e propriedades de interesse ao conforto térmico de abrigos construídos	21
2.7.1. Temperatura de bulbo seco	21
2.7.2. Termômetro de bulbo úmido	21
2.7.3. Temperatura do ponto de orvalho	22
2.7.4. Umidade absoluta do ar	22
2.7.5. Umidade relativa do ar	23
2.7.6. Entalpia	23
2.7.7. Propriedades termodinâmicas do ar no gráfico psicrométrico	23
2.8. Conforto térmico ambiente e produção animal.....	24
2.8.1. Zonas de conforto térmico	26
2.8.2. Aplicações do resfriamento adiabático evaporativo em instalações para produção animal	29
2.9. Sistemas de climatização.....	35
2.9.1. Ventilação	35
2.9.1.1. Ventilação natural.....	36
2.9.1.2. Ventilação forçada.....	36
2.9.1.3. Sistema de ventilação por pressão negativa ou exaustão	37
2.9.1.4. Sistema de ventilação por pressão positiva ou pressurização	38
2.10. Desempenho de um resfriador evaporativo	38
2.10.1. Transferência de calor e massa em uma parede umidificada ...	39
2.10.2. Eficiência do resfriamento adiabático evaporativo do ar	42
2.10.3. Bancada de testes de Liao e Chiu	42
2.11. Regressão linear múltipla.....	44
3. MATERIAL E MÉTODOS	45
3.1. Experimento de campo	45
3.1.1. Túnel de vento para avaliação das placas de materiais porosos	45
3.1.2. Painéis de material poroso em argila expandida	49
3.1.3. Placas de material poroso em celulose	50
3.1.4. Medições e sistema de aquisição de dados.....	51
3.1.5. Procedimento experimental.....	55
3.2. Pressão estática	57

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1. Avaliação das eficiências dos painéis de argilas expandidas em relação ao painel de celulose	58
4.1.1. Eficiência de cada painel evaporativo para cada distinta abertura do regulador de vazão, granulometria e espessura.	58
4.1.2. Eficiência de cada painel evaporativo para distintas espessuras e velocidades do ar, com argila expandida na granulometria 1... ..	61
4.1.3. Eficiência de cada painel evaporativo para distintas espessuras e velocidades do ar, com argila expandida na granulometria 2.. ..	62
4.2. Avaliação estatística dos painéis de argila expandida	64
4.3. Estudo da relação entre a variação da umidade relativa do ar e a variação da sua temperatura	68
4.4. Determinação da espessura ideal para um painel com argila expandida	69
5. CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Médias de velocidade média no painel (V), vazão mássica (\dot{m}), pressão estática (P_e) e eficiência do resfriamento adiabático evaporativo (ϵ) para as espessuras em centímetros de 6,0, 8,5 e 10,0, para as granulometrias 1 e 2 e celulose .	65
Tabela 2 – Valores médios de eficiência dos painéis de cinasita e de celulose por abertura do regulador de vazão e espessura – valores de t calculados pelo teste t de Student.....	67
Tabela 3 – Equações de regressão ajustadas para a variação da umidade relativa do ar em função da variação da temperatura, para cada conjunto (espessura e granulometria)	68
Tabela 4 – Valores médios de eficiência de resfriamento do ar (ϵ), espessura do painel de argila expandida (E), velocidade média do ar (V), temperatura externa média do ar (T_e), temperatura de bulbo molhado (T_u), temperatura no interior do túnel (T_i), umidade relativa do ar no exterior (U_{Re}) e umidade relativa no interior do túnel (U_{Ri}) – granulometria 1....	70
Tabela 5 – Valores médios de eficiência de resfriamento do ar (ϵ), espessura do painel de argila expandida (E), velocidade média do ar (V), temperatura externa média do ar (T_e), temperatura de bulbo molhado (T_u), temperatura no interior do túnel (T_i), umidade relativa do ar no exterior (U_{Re}) e umidade relativa no interior do túnel (U_{Ri}) – granulometria 2....	71
Tabela 6 – Equações de regressão linear múltiplas ajustadas de eficiência de resfriamento do ar em função da espessura E e velocidade V para as granulometrias 1 e 2 e respectivos coeficientes de determinação	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características médias da argila expandida	19
Quadro 2 – Características granulométricas da argila expandida	19
Quadro 3 – Conjuntos de painéis formados para os testes	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema demonstrativo do processo de resfriamento evaporativo.....	7
Figura 2 – Esquema e carta psicrométrica do processo de resfriamento evaporativo adiabático do ar.	8
Figura 3 – Resfriador evaporativo direto.	11
Figura 4 – Resfriador evaporativo indireto: (a) tipo placa, (b) tipo tubo.	12
Figura 5 – Processo de um resfriador evaporativo indireto.	12
Figura 6 – Resfriamento evaporativo em dois estágios: indireto/direto..	13
Figura 7 – Névoa artificial produzida por sistema de microaspersão (nebulização), no interior de uma instalação avícola.....	14
Figura 8 – Painéis de resfriamentos evaporativos CELdek® (Munters)..	16
Figura 9 – Princípio de funcionamento do painel CELdek® (Munters). ..	16
Figura 10 – Estrutura granular da argila expandida.	18
Figura 11 – Gráfico psicrométrico mostrando as propriedades termodinâmicas do ar.....	24

Figura 12 – Carta de conforto ASHRAE.	27
Figura 13 – Zonas de conforto ASHRAE (a): representa a zona de conforto para inverno e verão de acordo com a temperatura efetiva; (b): representa a mudança relativa na zona de conforto para o resfriamento evaporativo (CAMARGO, 2000).	28
Figura 14 – Delimitação da região de onde é possível atingir a zona de conforto por resfriamento evaporativo.	29
Figura 15 – Esquema de um sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel.....	37
Figura 16 – Esquema do painel evaporativo com as grandezas do processo de transferência de calor e massa entre o ar e a superfície úmida.	40
Figura 17 – Bancada de testes montada por Liao e Chiu (2002).....	43
Figura 18 – Túnel de vento desenvolvido por Vioderis (2002). (a) - vista lateral; (b) - vista frontal sem o painel poroso (c) - vista frontal, mostrando o painel e, abaixo, a calha para recolhimento da água drenada.	46
Figura 19 – Representação esquemática do túnel de vento e do painel de resfriamento evaporativo.	47
Figura 20 – Sistema de molhamento dos painéis evaporativos.....	48
Figura 21 – Sistema abastecido pela caixa-d'água.....	49
Figura 22 – Detalhes da argila expandida acomodada entre as telas. ..	50
Figura 23 – Painéis com argila expandida e placas de celulose usadas como testemunha.....	50
Figura 24 – Painel de celulose instalado no túnel de vento para teste. .	51
Figura 25 – Regulador de vazão do protótipo – Detalhe 1.....	51
Figura 26 – Regulador de vazão – Detalhe 2.	52
Figura 27 – Esquema do sistema de aquisição de dados utilizado na pesquisa.	53

Figura 28 – Placa de expansão CYEXP32.	53
Figura 29 – Placa de aquisição de dados - CYDAS 1620HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT, e placa de expansão CYEXP32.	54
Figura 30 – Sensor utilizado para leitura das temperaturas e umidades relativas do ar – modelo HUM50Y, VAISALA.	54
Figura 31 – Anemômetro de fio quente, modelo FMA-903-I, OMEGA, Stanford.	55
Figura 32 – Valores de eficiências médias em função das características de cada painel.	59
Figura 33 – Valores de eficiência para as espessuras de 6,0, 8,5 e 10,0 cm, a cada abertura do regulador de vazão – granulometria 1.	62
Figura 34 – Valores de eficiência para as espessuras de 6,0, 8,5 e 10,0 cm, a cada abertura do regulador de vazão – granulometria 2.	63
Figura 35 – Gráfico dos valores médios das eficiências de cada painel nas diversas vazões, em relação ao painel de celulose.	64
Figura 36 – Valores de variação da umidade relativa do ar do resfriamento adiabático evaporativo em função da variação da temperatura do ar.	69
Figura 37 – Variação da eficiência de resfriamento do ar em função da espessura do painel com argila expandida (granulometria 1) para cada velocidade do ar adotada no experimento.	73
Figura 38 – Variação da eficiência de resfriamento do ar em função da espessura do painel com argila expandida (granulometria 2) para cada velocidade do ar adotada no experimento.	73

RESUMO

ROSA, José Francisco Vilela, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2009. **Avaliação de painéis porosos constituídos de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo.** Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Coorientadores: Carlos Magno Fernandes, Sergio Zolnier, Fernando da Costa Baêta e Paulo Roberto Cecon.

O Brasil possui uma das maiores indústrias de produção e exportação de produtos de origem animal do mundo, detendo, provavelmente, uma tecnologia das mais avançadas para a ambientação e alojamento animal voltada para as condições de clima tropical, com menor custo e melhor eficiência produtiva do setor. No entanto, valores altos de temperatura do ar, especialmente durante o verão, associados à tipologia aberta e sem isolamento térmico dos alojamentos para animais, ainda constituem grave problema para o desempenho produtivo dos plantéis na sua fase adulta. Nesse sentido, os sistemas de acondicionamento de ambientes (arrefecimento térmico) usuais nas atividades de produção animal brasileira geralmente utilizam processos de resfriamento adiabático evaporativo do ar (SRAE). Em uma de suas formas de climatização mais comuns e em expansão, a indústria de produção animal no Brasil vem buscando promover melhorias ao ambiente interno das instalações por meio da adoção de sistemas de ventilação em modo túnel, associados aos

sistemas de resfriamento evaporativo composto de painéis de material poroso umedecido por gotejamento ou aspersor, através do qual o ar que o atravessa é resfriado antes de adentrar o alojamento. Usualmente são empregadas placas de celulose, que apresentam desempenho bastante satisfatório no arrefecimento do ar. Entretanto, alguns problemas estão associados à utilização desse material: baixa durabilidade para as condições climáticas brasileiras, vulnerabilidade a ataque por roedores, dificuldade de aquisição (material patenteado importado) e custo elevado. Muitos estudos já concluíram que é viável o uso de materiais alternativos em substituição à celulose, entre eles a argila expandida (cinasita), devido às suas boas características físicas: densidade, porosidade, durabilidade e disponibilidade no comércio. Contudo, nenhum desses trabalhos finalizou a questão relativa ao dimensionamento dos painéis de argila expandida em termos de escolha da granulometria e espessura, que possibilite uma eficiência de resfriamento do ar similar à conseguida com o material-padrão (celulose). Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho: (a) obter um modelo estatístico que permita dimensionamento de placas porosas em argila expandida (cinasita) para todas as condições de temperatura e velocidade das correntes de ar, espessura e granulometria, para emprego em acondicionamento de ambientes em geral; (b) verificar a viabilidade de uso do túnel de vento utilizado nas pesquisas em relação às eficiências calculadas; (c) aplicar os princípios da conservação de massa e energia no dimensionamento de placas evaporativas de argila expandida, validação através do experimento e comparações com o painel evaporativo comercial de celulose; e (d) determinar as dimensões e especificações granulométricas de painéis de argila expandida (cinasita) que sejam consideradas ótimas em termos de transferência de calor e massa. Os resultados foram analisados utilizando testes de hipóteses de duas médias e regressão linear múltipla. Foram encontrados melhores valores de eficiência de resfriamento para os painéis confeccionados com argila expandida na granulometria 1 (referência à brita 1) em relação à granulometria 2 (referência à brita 2), para todas as espessuras de painéis adotadas (6,0, 8,5 e 10 cm). Verificou-se, também, bom desempenho para o painel evaporativo de 10 cm de espessura, para a granulometria 2 da

argila. Pela análise estatística de regressão linear múltipla, concluiu-se que os painéis de argila expandida com granulometria 1 e espessura de 8,0 cm são os que possibilitam melhor eficiência de resfriamento adiabático evaporativo para velocidade do ar compreendida entre 0,49 e 1,05 m/s. O túnel de vento utilizado mostrou-se adequado para a avaliação técnica dos painéis evaporativos.

ABSTRACT

ROSA, José Francisco Vilela, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2009. **Evaluation of porous panels made of expanded clay in na evaporative adiabatic cooler systems.** Adviser: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Coadvisers: Carlos Magno Fernandes, Sergio Zolnier, Fernando da Costa Baêta and Paulo Roberto Cecon.

Brazil has one of the greatest industry of production and exportation of products of animal origin of the world, probably holding one of the most advanced technology for the acclimatization and animal housing directed to tropical weather conditions, with the lower cost and best productive efficiency of the sector. However, high air temperature values, specially during summer, associated to the open air without thermal isolation typology of the animal housing, still are a serious problem for the productive performance of the breeding stock in their adult phase. Therefore, the conditioning environmental systems (thermal moderation) generally used by the Brazilian animal production activities commonly uses air evaporative adiabatic cooling (SRAE) processes. In one of its most common and expanding acclimatization means, the animal production industry in Brazil is attempting to promote improvements in the internal environmental of the housings by adopting ventilation systems in tunnel mode, associated to the evaporative cooling systems composed by panels made of porous material

moistened by water dripping or sprinkling, through which the air passes and is cooled before entering the building. Usually cellulose plates are used, which show a quite satisfactory performance for air cooling. However, some problems are associated to the use of this material: low durability for the Brazilian climatic conditions, vulnerability to rodent attacks, purchasing difficulty (imported patented material) and high cost. Many studies have concluded that it is feasible to use alternative materials to replace the cellulose, among them the expanded clay (cinasita), due to its physical characteristics: density, porosity, durability and availability on the market. However, none of these works approached the question related to the dimensions of the expanded clay panels in terms of granulometry and thickness that allows the efficiency of air cooling similar to that one achieved with the standard material (cellulose). Thus, the objective of this work was: (a) to obtain a statistical model that allows the dimensioning of porous plates of expanded clay for all the conditions of temperature and speed of air currents, thickness and granulometry, for the use in environmental acclimatization in general; (b) to verify the feasibility of the use of wind tunnel used in the researches related to the calculated efficiencies; (c) to apply the mass and energy conservation principles in the dimensioning of the evaporative plates of expanded clay, validated through the experiment and comparisons with the commercial cellulose evaporative panel; and (d) to determine the dimensions and granulometric specifications of the expanded clay panels which are considered optimal in terms of heat and mass transference. The results were analysed using the hypotheses tests with two means and multiple linear regression. The best values were found with the expanded clay in the granulometry 1 (reference to the grit 1) in relation to the granulometry 2 (reference to the grit 2), for all the thicknesses of the panels adopted (6.0; 8.5 and 10 cm). A good performance of the evaporative panel with 10 cm of thickness, for the granulometry 2 of the clay was also verified. By the statistical analysis of multiple linear regression, it was concluded that the expanded clay panels with granulometry 1 and thickness of 8.5 cm are the ones that allow the best efficiency of evaporative adiabatic cooling for the air speed between 0.49

and 1.05 m/s. The wind tunnel used showed to be appropriate for the technical evaluation of the evaporative panels.

1. INTRODUÇÃO

No agronegócio brasileiro, a produção animal é de grande importância, constituindo-se uma enorme fonte de divisas para o País. Em nível mundial, o Brasil talvez seja a nação que possua um dos maiores potenciais de crescimento de exportação, principalmente devido aos progressos tecnológicos que transformaram a atividade de produção animal e de seus derivados em grande empreendimento econômico.

A produção animal é o resultado da combinação entre o potencial genético das espécies e sua interação com a nutrição, a sanidade, o manejo e os fatores ambientais, incluindo-se também o nível de bem estar a que o animal está submetido. Verifica-se que muitos animais não conseguem expressar todo o seu potencial produtivo sob as condições adversas do meio em que vivem; assim, o ambiente constitui-se em um dos principais responsáveis pelo sucesso ou fracasso dos empreendimentos, podendo ele ser definido como a soma dos impactos dos meios biológicos e físicos circundantes sobre os animais (CURTIS, 1983).

No Brasil, os principais fatores limitantes de adaptação dos animais para a produção têm sido os altos valores de temperatura de bulbo seco, associados a altos valores de umidade relativa do ar nos ambientes de criação, que ocorrem em algumas regiões e sobretudo no verão, o que pode reduzir a produtividade de algumas espécies (YANAGI JUNIOR, 2006).

O ambiente térmico é representado pela temperatura, pela umidade relativa, pela velocidade do ar e pelos níveis de radiação. Nesse caso, as limitações climáticas que venham a comprometer negativamente a atividade de produção animal podem ser amenizadas a partir de um projeto de instalação adequado, em conjunto com alimentação e manejo racionais (CURTIS, 1983; RIVERO, 1986).

O sucesso da atividade de produção animal no Brasil depende, entre outros fatores, da redução dos eventuais efeitos negativos sobre os animais, com destaque para a utilização de técnicas de modificações térmicas ambientais. Nesse sentido, uma técnica de modificação ambiental artificial bastante difundida para o acondicionamento de ambientes é o resfriamento evaporativo do ar.

O resfriamento adiabático evaporativo (SRAE) consiste em possibilitar que o ar ambiente a ser resfriado entre em contato com uma superfície umedecida ou aspergida. O contato desse ar (não saturado) com a água pode ser intensificado e otimizado por meio de ventilação mecânica, a qual promove maior velocidade de troca simultânea de calor e massa e conseqüente evaporação da água; a energia necessária para esta mudança de estado (líquido-vapor) vem do calor sensível contido no ar e na água, resultando em decréscimo da temperatura de ambos. Os sistemas de resfriamento adiabático evaporativo são de baixo custo de instalação e manutenção.

Além de promoverem o arrefecimento térmico, esses dispositivos podem ser utilizados para outros fins, como: umidificação e purificação de ambientes, tratamento do ar em locais poluídos, resfriamento e umidificação, com emprego em casas de vegetação, armazenamento de produtos agrícolas e, entre outros, na indústria de maneira geral, assim como na indústria de produção animal, em particular.

Em uma de suas formas de climatização mais comuns e em expansão, a indústria de produção animal no Brasil vem buscando promover melhorias ao ambiente interno das instalações por meio da adoção de sistemas de ventilação em modo túnel, associados aos sistemas de resfriamento evaporativo composto de painéis de material poroso umedecido por gotejamento ou aspersor, através do qual o ar que o atravessa é resfriado antes de adentrar o alojamento.

Usualmente são empregados painéis de celulose, que apresentam desempenho satisfatório no arrefecimento do ar, porém os problemas associados a esse material são: baixa durabilidade para as condições climáticas brasileiras, vulnerabilidade a ataque por roedores, dificuldade de aquisição (material patenteado importado) e custo elevado. Muitos estudos já concluíram que é viável o uso de material alternativo em substituição à celulose; entre eles, aparece como viável a argila expandida (cinasita), cujas principais vantagens são: leveza, resistência, estabilidade dimensional e incombustibilidade.

Em pesquisas anteriores foi demonstrado que a argila expandida (cinasita) possui características favoráveis de densidade, porosidade, durabilidade e disponibilidade no comércio, sugerindo tratar-se de material que satisfaz as exigências pertinentes a um bom material poroso, podendo substituir, com vantagem econômica, a celulose. Contudo, nenhum desses trabalhos finalizou a questão relativa ao dimensionamento dos painéis de argila expandida em termos de área, escolha de granulometria e espessura, que possibilite uma eficiência de resfriamento do ar similar à conseguida com o material-padrão (celulose).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivos: obter um modelo estatístico que permita o dimensionamento de placas porosas em argila expandida (cinasita) para todas as condições de temperatura e velocidade das correntes de ar, bem como para as condições de espessuras e painéis e granulometrias das argilas, para emprego em acondicionamento de ambientes em geral; verificar a validade de significância do túnel de vento de Vigoderis (2002) para utilização nas pesquisas relativas a cálculo de eficiências de resfriamento; aplicar os princípios da conservação de massa e energia no dimensionamento de placas evaporativas de argila expandida e validação por meio do experimento e de comparações com o painel evaporativo comercial de celulose; determinar as dimensões e especificações granulométricas de placas de argila expandida (cinasita) que sejam consideradas equivalentes à celulose em termos de transferência de calor e massa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Influência do clima quente na produção animal

O ambiente é caracterizado por um conjunto de fatores climáticos que, atuando isoladamente ou, mais frequentemente, em simultaneidade, exercem influência sobre os animais de maneira favorável ou desfavorável ao desenvolvimento biológico e desempenho produtivo dos mesmos (CURTIS, 1983).

Em regiões com climas tropicais e subtropicais, a exemplo do Brasil, a intensa radiação solar e os altos valores de temperatura e umidade relativa do ar, principalmente no verão, têm-se mostrado limitantes à atividade de produção animal, afetando negativamente o desempenho produtivo dos plantéis (TINÔCO, 1988).

Isso ocorre devido ao fato de que os animais domésticos em geral (aves, suínos, bovinos, etc.) são homeotérmicos, ou seja, necessitam manter relativamente constante a temperatura interna do corpo, mesmo que seja por compensações fisiológicas. Assim, de acordo com Bond et al. (1954), um ambiente é considerado confortável pelos homeotérmicos quando o calor produzido pelo metabolismo animal é perdido para o meio ambiente sem prejuízo do rendimento animal; quando isso não ocorre, caracteriza-se o estresse por calor.

A título de exemplo, Souza (1996) relata que, sob valores elevados de temperatura do ar, os animais homeotérmicos buscam reduzir a produção de calor de maneira a garantir a homeotermia. Para isso, involuntariamente perdem o apetite e ocorre menor ingestão de ração, com consequente redução do ganho médio de peso e aumento da mortalidade, especialmente nos dias que antecedem ao abate, com prejuízo da conversão alimentar e dos índices de eficiência produtiva esperados.

De acordo com Esmay (1969), as principais variáveis climáticas que influenciam o desempenho animal, em um microclima, são: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, vento, pluviosidade, luminosidade e altitude. Os animais coexistem em processo ininterrupto de interação com o ambiente no qual se encontram inseridos, reagindo de diversas maneiras às distintas condições que lhes são impostas.

Assim, quando a temperatura tem valor maior ou menor que a faixa estabelecida como ótima de conforto animal, faz-se necessário o emprego de artifícios capazes de manter o equilíbrio térmico entre o animal e o meio (ESMAY, 1969). Entre esses artifícios, destacam-se os processos de arrefecimento térmico que fazem uso do sistema de ventilação em associação ao de resfriamento adiabático evaporativo do ar ambiente (TINÔCO, 1988, 1996).

2.2. Resfriamento adiabático evaporativo do ar

O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e elevação de sua umidade relativa a partir da incorporação de água ao ar, por meio de mecanismos artificiais e/ou naturais que promovem simultânea transferência de calor e massa entre o ar e a água por ele incorporada (PIMENTA; CASTRO, 2003).

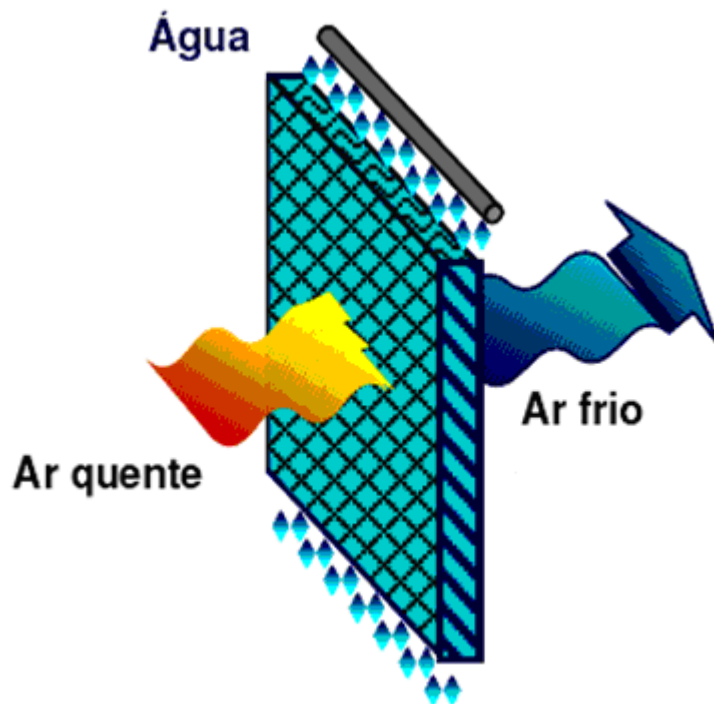
O processo de resfriamento evaporativo trabalha essencialmente com a conversão de calor sensível em calor latente. A corrente de ar (mistura de ar seco e vapor de água) é resfriada por evaporação da água para o ar. A adição de vapor d'água aumenta o calor latente e a umidade relativa do ar. Considerando desprezíveis as perdas de calor para o ambiente, o processo pode ser considerado adiabático e, dessa forma, o

aumento do calor latente é compensado por uma redução do calor sensível e conseqüente diminuição da temperatura de bulbo seco do ar (CASTRO; PIMENTA, 2004).

O ar atmosférico é uma mistura de ar seco e vapor d'água. Para uma dada condição de temperatura e pressão, essa mistura tem capacidade de conter uma quantidade de vapor d'água (ar saturado = 100% de umidade relativa). Na prática, essa condição de ar saturado é observada, por exemplo, durante e logo após uma chuva. Normalmente, o ar encontra-se com umidade relativa inferior a 100% e, portanto, apto a absorver mais vapor d'água. Para que haja essa absorção, é necessário que a água passe da fase líquida para vapor; essa mudança de fase demanda uma quantidade de energia que é retirada do ar, resfriando-o (SILVA, 2002).

Quando a água evapora de uma superfície, esta se resfria porque a água requer energia para mudar do estado líquido para o de vapor. Cada grama de água evaporada retira do sistema cerca de 590 calorias em forma de calor sensível. Conforme o ar entra em contato com a água, ele a absorve, e a quantidade de água absorvida depende da quantidade de vapor d'água existente no ar. Dessa forma, quando o ar quente e não saturado entra em contato com uma superfície molhada, parte da água é evaporada. À medida que a vaporização ocorre, o ar e a água resfriam-se, e o processo continua até que o ar fique saturado (Figura 1).

Tendo em vista o exposto, e como ilustrado na Figura 1, quando a água evapora em uma corrente de ar livre, sem suprimento externo de calor, a temperatura de bulbo seco (TBS) do ar é reduzida e seu conteúdo de umidade é elevado, enquanto sua temperatura termodinâmica de bulbo úmido (TBU) permanece constante. Esse processo, que ocorre sem adição ou extração de calor, é denominado adiabático, pois a quantidade total de calor do ar (sensível e latente) permanece constante.

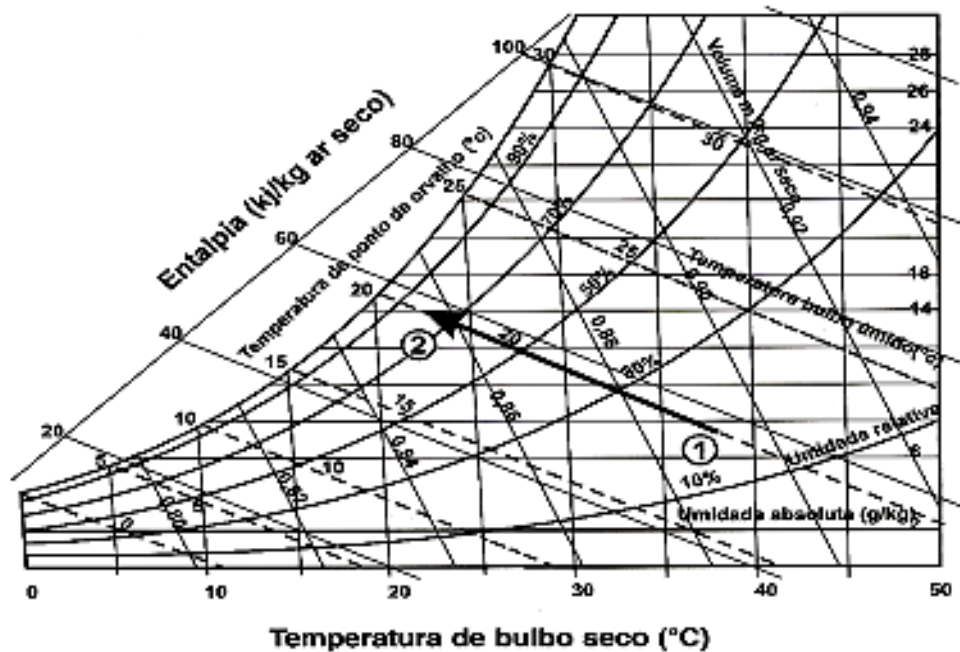


Fonte: Abreu e Abreu (2005).

Figura 1 – Esquema demonstrativo do processo de resfriamento evaporativo.

Nesse processo, a evaporação da água ocorre quando suas moléculas próximas à superfície recebem energia do interior desta em quantidade superior à necessária para manter as ligações moleculares da fase líquida. Essa energia latente, cedida pela água, resulta num resfriamento desta, que, no entanto, em regime permanente, é compensado pela energia transferida do entorno para a superfície do líquido. Em regime permanente e desprezando-se os efeitos da radiação, quando o ar do entorno transfere a mesma quantidade de energia cedida pela água, diz-se que esta atingiu a temperatura de bulbo úmido (TBU), mantendo-se constante nessa temperatura. Conseqüentemente, o calor cedido pelo ar do entorno, reduz a temperatura deste, ocorrendo o resfriamento (Figura 2).

Em resumo, o processo de evaporação depende da temperatura do ar, da umidade relativa do ar, da velocidade do ar, da temperatura da água e da superfície de contato entre a água e o ar.



Fonte: Leal (1997).

Figura 2 – Esquema e carta psicrométrica do processo de resfriamento evaporativo adiabático do ar.

Nas avaliações teóricas dos sistemas de resfriamento evaporativo, a temperatura da água permanece constante, sem aumentar ou diminuir em contato com o ar. Disso resulta que toda a evaporação serve para resfriar o ar, não para resfriar a água, diminuindo o consumo desta e o ganho de umidade pelo ar. Na prática, entretanto, a água usualmente ganha algum calor sensível no tanque reservatório, na bomba ou na tubulação. Esse calor sensível pode ter como fonte a transferência de calor ambiente e a radiação solar. Dessa forma, a maioria dos “comportamentos adiabáticos” em resfriamento evaporativo representa apenas uma aproximação (WATT; BROWN, 1997).

2.3. O sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE)

Em atividades agrícolas, o processo usualmente empregado no arrefecimento de instalações tem sido o resfriamento adiabático evaporativo. O processo consiste em mudanças do ponto psicrométrico de

estado do ar, ou seja, à medida que se aumenta o conteúdo de água no ar, ocorre redução de sua temperatura. A incorporação de água ao ar pode ocorrer por aspersão, nebulização ou mesmo fazendo o ar atravessar uma parede porosa umedecida (placas evaporativas). Assim, o sistema de nebulização e o uso de placas evaporativas são duas diferentes maneiras de resfriamento evaporativo, que podem ser associadas à ventilação forçada de pressão positiva e/ou à ventilação de pressão negativa (TINÔCO; RESENDE, 1997).

O resfriamento adiabático evaporativo para instalações para frangos de corte é tipicamente provido através de sistemas de placas evaporativas ou por nebulização. O sistema por placas evaporativas tende a ser mais eficiente na evaporação da água do que os sistemas por nebulização (TIMMONS; BAUGHMAN, 1984).

Quando o resfriamento adiabático evaporativo ocorre em condições naturais, o processo de resfriamento é muito lento. Normalmente, para intensificar a evaporação são utilizados ventiladores, que têm a função de aumentar o movimento de ar (WIERSMA; SHORT, 1983).

2.4. Classificação dos sistemas de resfriamento evaporativo

De acordo com Givoni (1994), os sistemas de resfriamento evaporativo podem ser classificados quanto ao contato da água evaporada com o ar a ser resfriado e quanto à energia requerida para promover a evaporação:

- Resfriamento evaporativo direto: quando a água evapora em contato com o ar que se deseja resfriar, umidificando-o.
- Resfriamento evaporativo indireto: quando o ar a ser resfriado mantém-se separado do processo evaporativo e sem receber umidade.
- Resfriamento evaporativo em duplo estágio: sistemas que utilizam o processo direto e o indireto.
- Resfriamento passivo: quando a evaporação ocorre naturalmente, sem consumo de energia, como no caso do uso de vegetação, de fontes d'água, torres de resfriamento e tanques na cobertura.

- Resfriamento semipassivo: sistemas em que a evaporação é promovida ou intensificada através de dispositivos mecânicos.

Segundo Argiriou e Santamouris (1995), os sistemas supracitados são chamados de *híbridos* ou *semipassivos*, pois, apesar de não terem consumo nulo de energia, este é muito baixo quando comparado com o de sistemas convencionais de condicionamento. Givoni (1994), por sua vez, inclui o uso de bombas e ventiladores entre as estratégias *passivas*, diante de seus consumos insignificantes, ou seja, todo e qualquer tipo de resfriamento evaporativo, inclusive mecânico, é considerado *passivo*. Muitas vezes, essa distinção é bastante tênue, porém, por motivos de diferenciação, considerou-se o resfriamento evaporativo mecânico como *semipassivo*.

A avaliação quantitativa de diversas técnicas de resfriamento passivo pode ser encontrada em publicações de Givoni (1994). Relevando as características peculiares dos experimentos, seus estudos representam a melhor orientação disponível à aplicação dessas técnicas de resfriamento. Avaliações qualitativas podem ser obtidas em diversas outras publicações que abordam as vantagens, desvantagens e limitações técnicas dos sistemas passivos de resfriamento (EVANS; SCHILLER, 1988; WATSON; LABS, 1983).

2.4.1. Resfriamento evaporativo direto (RED)

Equipamentos de refrigeração direta resfriam um gás por contato direto ou com uma superfície líquida ou com uma superfície sólida molhada ou, ainda, através de *sprays*. A Figura 3 mostra, esquematicamente, um resfriador evaporativo direto.

Nesse equipamento, a água é vaporizada dentro da corrente de ar e a energia transferida entre o ar e a água reduz a temperatura de bulbo seco (TBS) do ar e aumenta a sua umidade, mantendo constante a entalpia (resfriamento adiabático). No resfriamento evaporativo direto (RED) não há resfriamento real (redução na entalpia) e a mínima temperatura que se pode atingir é a de bulbo úmido do ar que entra no sistema.

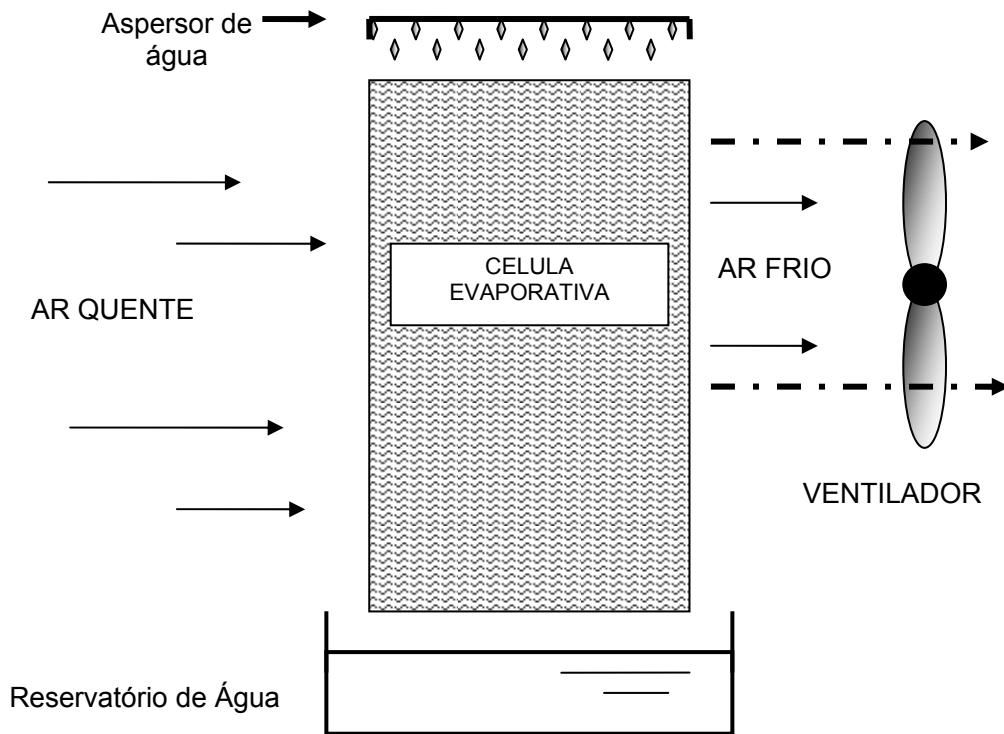


Figura 3 – Resfriador evaporativo direto.

É possível obter menores temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída, mas, para isso, a água recirculada, que supre o equipamento, deve ser resfriada antecipadamente. O arranjo reduz o custo de operação entre 25 e 40%, quando comparado ao custo de refrigeração mecânica somente (ASHRAE, 1995).

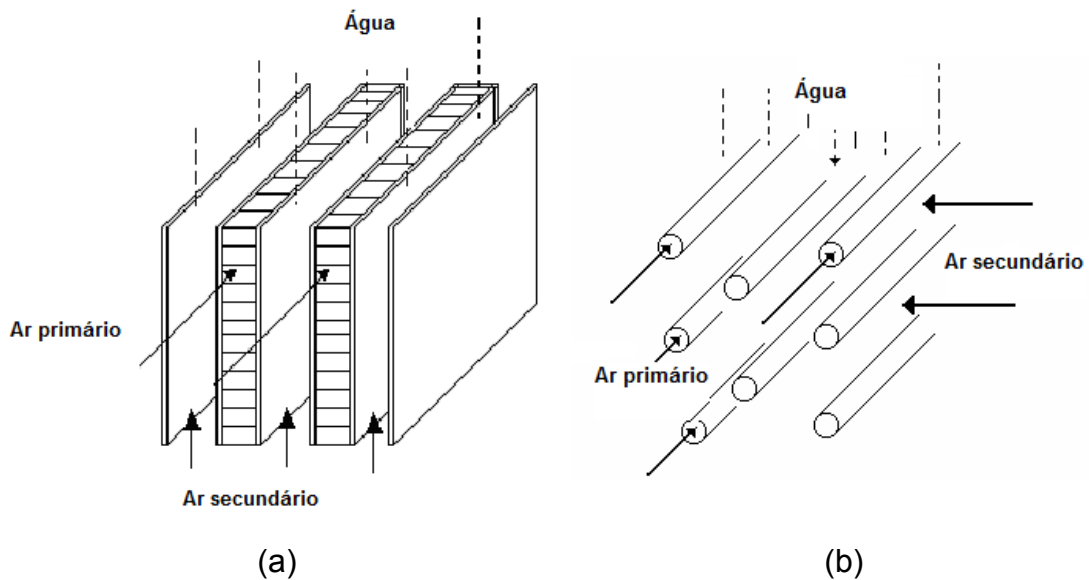
2.4.2. Resfriamento evaporativo indireto

De acordo com Camargo (2003), no resfriador evaporativo indireto (REI), o ar que será utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor ou para uma corrente de ar secundária ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente. A entalpia do ar do lado seco é, assim, reduzida, em contraste com a redução adiabática de temperatura de um refrigerador evaporativo direto.

Um avanço na tecnologia do resfriamento evaporativo deve-se à introdução dos equipamentos de REI, nos quais o ar, relativamente seco, é mantido separado do ar do lado molhado, onde o líquido está sendo evaporado.

Sistemas de REI poupam entre 60 e 75% do custo total de operação, quando comparado ao da refrigeração mecânica, para produzir o mesmo efeito de resfriamento (ASHRAE, 1995).

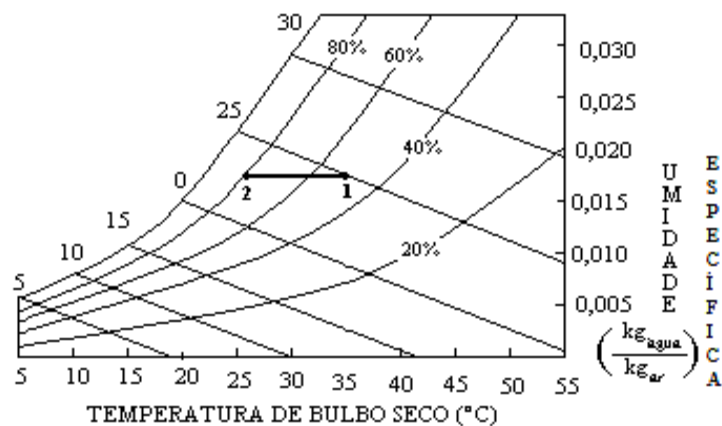
Na Figura 4 são ilustrados dois tipos de sistemas de resfriamento evaporativo indireto: placa (Figura 4a) e tubo (Figura 4b).



Fonte: Camargo (2003).

Figura 4 – Resfriador evaporativo indireto: (a) tipo placa, (b) tipo tubo.

A Figura 5 ilustra a carta psicrométrica do processo de resfriador evaporativo indireto.



Fonte: Camargo (2003).

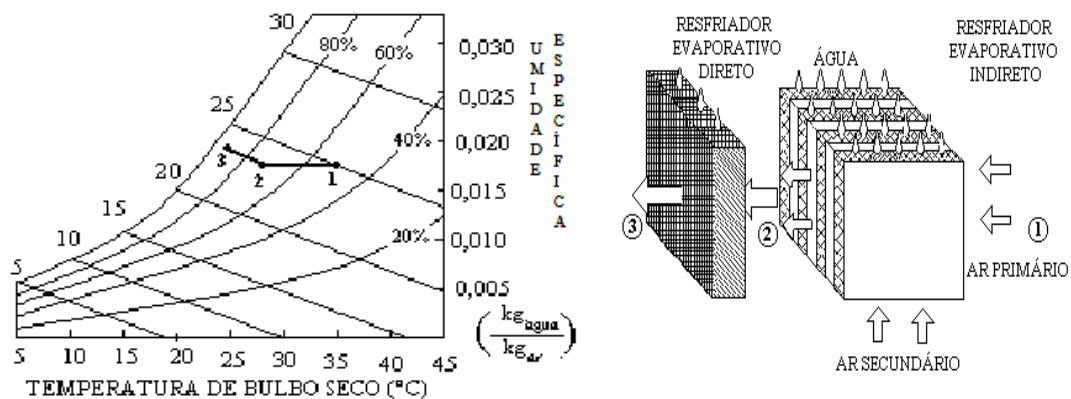
Figura 5 – Processo de um resfriador evaporativo indireto.

2.4.3. Resfriamento evaporativo direto e indireto

Sistemas combinados podem envolver ambos os princípios de resfriamento: direto e indireto.

Em regiões nas quais o aumento da umidade é indesejável, o resfriamento evaporativo direto e indireto pode ser utilizado para aumentar a eficiência de resfriamento, sem que, necessariamente, a umidade seja agregada ao ambiente. Nesses casos, o ar umidificado e resfriado ou a água resfriada de um processo de resfriamento direto é utilizado como refrigerante de trocadores ar – ar ou ar – água. Com o advento de pesquisas nessa área e com o surgimento dos equipamentos evaporativos do tipo direto e indireto, já se tem alcançado a queda da temperatura do ar à entrada até bem próximo da temperatura de condensação (OLIVEIRA, 2007). Entretanto, esses aparelhos não são economicamente viáveis para o uso em galpões comerciais para criação de frangos de corte.

A Figura 6 mostra um RED acoplado a um REI e o respectivo processo psicrométrico.



Fonte: Camargo (2003).

Figura 6 – Resfriamento evaporativo em dois estágios: indireto/direto.

2.4.4. Sistemas de resfriamento evaporativo por microaspersão

Os sistemas de microaspersão, algumas vezes denominados de sistema de atomização ou “névoa artificial”, representam um tipo de resfriamento evaporativo semipassivo direto, que é citado por Watt e Brown (1997) e por Givoni (1994) como alternativa de resfriamento de áreas

externas, não constando entre as técnicas de resfriamento evaporativo de ambientes internos, a não ser áreas de criação de animais e cultivo de plantas.

Os sistemas de microaspersão caracterizam-se pela aspersão de gotículas d'água tão minúsculas (entre 10 e 20 μm) que evaporam de forma completa e rápida quando em contato com o ar, retirando calor deste e abaixando sua temperatura, sem molhar e sem projetar água líquida sobre as pessoas próximas, embora a névoa seja visível (GIVONI, 1994). A Figura 7 apresenta uma névoa no interior de uma instalação aviária.

A atomização decorrente do choque entre o líquido e o ar ambiente resulta na ruptura da lâmina de líquido e posterior rompimento das gotas maiores em gotas menores.

O resfriamento evaporativo por atomização da água tem por princípio básico pulverizar água no ambiente a ser beneficiado. O processo é oriundo da expansão de líquido, que é comprimido por uma bomba de pressão. Na passagem pelo bico de aspersão, a água é pulverizada em pequenas gotículas, que se evaporam no ambiente a ser resfriado, retirando carga térmica sensível do ar. Esses equipamentos são chamados de evaporativos por microaspersão (OLIVEIRA, 2007).



Figura 7 – Névoa artificial produzida por sistema de microaspersão (nebulização), no interior de uma instalação avícola.

2.5. Materiais utilizados nas células evaporativas

De acordo com Wiersma e Stott (1974) e Bottcher et al. (1991), alguns países de clima seco e quente têm usado o sistema de resfriamento adiabático evaporativo com economia e eficiência para promover redução da temperatura em construções agrícolas. Contudo, o material usualmente empregado nesses equipamentos corresponde a uma placa de celulose, a qual pode vir acompanhada por uma série de inconvenientes, como custo elevado, baixa durabilidade, dificuldade de aquisição ou problemas com roedores, entre outros.

Os materiais comumente empregados nos enchimentos dos resfriadores evaporativos são: fibra de vidro, celulose impregnada com resina, polipropileno e fibra de madeira. O enchimento, além de promover a evaporação da água pelo ar, também atua como um filtro, retendo partículas acima de 3 micra (GLACIER-COR, 1999).

Sobre a espessura e a densidade de placas de material poroso, Wiersma e Stott (1983) e Tinôco (1988) afirmam que, à medida que se aumenta a espessura do material poroso, normalmente eleva-se a resistência à passagem do ar e, conseqüentemente, aumenta-se o tempo de contato do ar com o material poroso umedecido. Se para uma mesma espessura forem aumentadas a densidade, a porosidade e a capilaridade do material poroso, a distribuição de água será uniforme; entretanto, torna-se necessário maior volume de água para o umedecimento, aumentando dessa maneira a resistência à ventilação do ar.

Muitos fabricantes de lavadores de ar têm produzido modernas células evaporativas e enchimentos de celulose, que têm grande eficiência. Essas células possuem grande área de superfície molhada em contato com a corrente de ar e apresentam pequena perda de carga. Nesse caso, requer-se pouca água para molhar a superfície e o tamanho do reservatório pode ser diminuído (ASHRAE, 1996).

De acordo com Camargo (2003), os equipamentos de resfriamento evaporativo direto da fabricante Munters (1999) utilizam 100% de ar externo, e esse ar é constantemente filtrado (90% de eficiência para partículas até 10 micra) pelo processo de lavagem contínua (Figura 8). No

seu princípio de funcionamento, o ar é resfriado e umidificado pela água através de células evaporativas fabricadas com material celulósico altamente higroscópico, tratado quimicamente para evitar o apodrecimento e a decomposição ou com um material composto de fibra de vidro resistente à água e antichamas (Figura 9). Além de resfriarem o ar em temperaturas próximas às de bulbo úmido, esses sistemas levam em consideração o efeito da movimentação do ar, o que proporciona uma sensação de queda de temperatura – variando entre 2 e 7 °C, em média – adicionalmente à temperatura efetivamente reduzida pelo resfriador evaporativo.

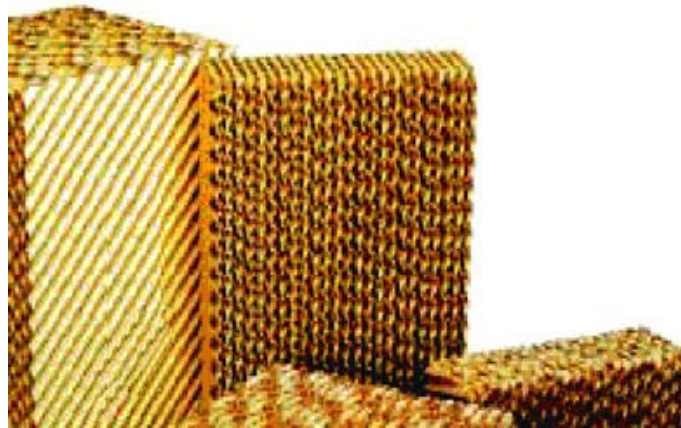


Figura 8 – Painéis de resfriamentos evaporativos CELdek® (Munters).

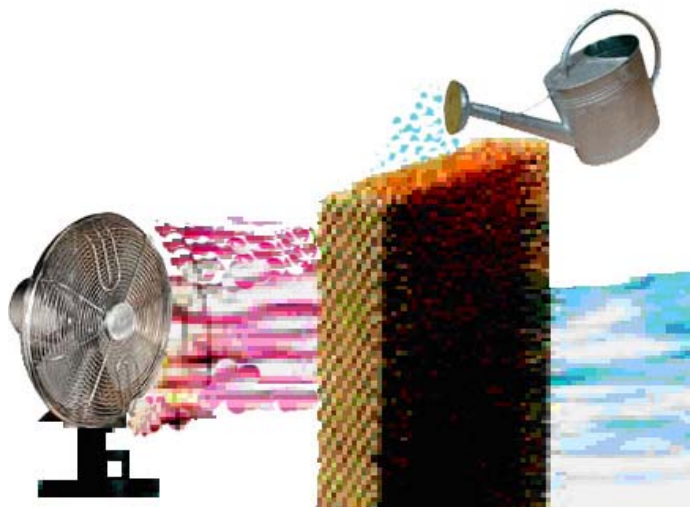


Figura 9 – Princípio de funcionamento do painel CELdek® (Munters).

Tinôco et al. (2002) desenvolveram um estudo comparativo da eficiência de alguns materiais porosos alternativos encontrados no Brasil: cinasita (argila expandida), serragem, fibra vegetal e carvão, para o Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo (SRAE). O experimento deu-se em condições de verão, em estufas situadas na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Foi avaliado o conforto térmico ambiente através do índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU) e da umidade relativa do ar (UR), medidos diariamente, a cada duas horas, das oito às 18 horas.

Com base nesse estudo, foi possível concluir que a confecção de placas porosas para resfriadores evaporativos, utilizando os materiais cinasita e carvão vegetal, indica vantagens sobre os demais materiais estudados (serragem e fibra de madeira). No entanto, como não houve diferença estatística significativa em todos os horários, para os materiais testados e com base nos resultados de umidade relativa do ar e ITGU, sugeriu-se a realização de novas pesquisas, no sentido de determinar a espessura correta da placa porosa.

Tinôco et AL. (2002) concluíram que, devido ao fato de a argila expandida (cinasita) ser um material facilmente encontrado no Brasil, bem como possuir características favoráveis de densidade, porosidade, durabilidade e disponibilidade, esse material poderia satisfazer às exigências de um bom material poroso, podendo substituir, com vantagem econômica, a celulose dentro do processo de resfriamento evaporativo.

2.6. Argila expandida

Normalmente, na confecção de placas evaporativas utilizam-se diferentes materiais, como madeira, celulose, metais, minerais, vidros, plásticos e cimento. A escolha do melhor material está intimamente ligada à sua durabilidade e eficiência (WIERSMA; STOTT, 1983).

Segundo Gea et al. (2003), a argila expandida ou cinasita (Figura 10) é um material cerâmico com uma estrutura altamente porosa, de elevada resistência mecânica e inerte. A matéria-prima natural utilizada na produção da argila expandida é um tipo de argila especial pré-histórica, de

idade entre 60 e 70 milhões de anos. O primeiro identificador da argila que pode ser usada para se transformar em argila expandida, ou seja, uma argila que tenha capacidade de expansão, é conter “agonitas” e fósfil (BRAVO; ESPINOSA, 2003). O material extraído da natureza é então triturado, de modo que se obtenham partículas muito finas, com uma granulometria de 0 a 6 mm. Essas partículas esféricas “cruas” são submetidas a um choque térmico de 1.000 a 1.200 °C em forno rotativo, onde se fundem rapidamente, ao mesmo tempo que se produz uma combustão do material orgânico no interior do grão da argila (GEA et al. 2003).

Durante o choque térmico, uma parte dos constituintes do material se funde, gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente, liberando gases que são incorporados por essa massa, expandindo-a em até sete vezes o seu volume inicial. Esses gases, retidos no interior da argila, não podem escapar para o seu exterior devido à fase líquida que envolve as partículas da argila. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento, de modo que a massa unitária do material resultante torna-se menor do que antes do aquecimento.



Figura 10 – Estrutura granular da argila expandida.

A elevação brusca da temperatura acarreta também a formação de uma “capa” superficial vitrificada no grão de argila, isto é, ocorre a ceramização da superfície do grão, o que impede a saída dos gases formados no seu interior, obrigando-o a um inchamento. Os gases que conseguem sair do grão são imediatamente oxidados, nessa alta temperatura, e permanece no interior do grão da argila expandida uma fração residual de caráter carbônico (coque) de cor preta característica (ALLENDE et al., 2005).

As principais características da argila expandida são: leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, incombustibilidade e excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico. As suas características físicas são apresentadas no Quadro 1, e as granulométricas, no Quadro 2.

Quadro 1 – Características médias da argila expandida

Características Médias	Cinasita
Massa específica aparente (kg/m ³)	353
Massa específica seca (kg/m ³)	345
Massa específica saturada (kg/m ³)	610
Diâmetro máximo (mm)	25
Absorção (% vol / 24h)	8,3

Quadro 2 – Características granulométricas da argila expandida

Granulometrias			
Tamanho	Diâmetro	Equivalência	Densidade
Grande (3222)	22 a 32 mm	Brita 2	400/480 kg/m ³
Médio (2215)	15 a 22 mm	Brita 1	450/530 kg/m ³
Fino (1506)	6 a 15 mm	Brita 0	580/660 kg/m ³
Restolho	Abaixo de 6 mm	Areia grossa	800/880 kg/m ³

A argila expandida pode ser empregada não somente na confecção de concreto estrutural leve, mas também como isolamento térmico, bloco de concreto leve, isolamento acústico, concreto refratário e mistura asfáltica para pavimentação a quente.

Nevilie (1997) apresenta as principais características conferidas pelo emprego da argila expandida:

- Durabilidade: o material é consistente mecanicamente, durável e quimicamente estável. A argila expandida é um material prático, que pode ser estocado sem dificuldade em qualquer local, por um longo período de tempo.
- Baixa densidade: a densidade da argila expandida, seca e no estado solto, é em média de 550 kg/m^3 , o que equivale a aproximadamente 2,5 vezes menor que agregados normais de areia e pedra, usados nas construções.
- Quimicamente inerte: a argila expandida é livre de qualquer substância que possa ter efeito adverso sobre os materiais em contato com ela.
- Redução de custo: o uso dessa argila tem apresentado economia no concreto e nas cargas de fundações.
- Alto isolamento térmico: por aliar as qualidades de isolamento térmico, resistência mecânica e preço, a argila expandida possibilita excelentes técnicas e vantagens econômicas no campo do isolamento térmico.
- Isolamento acústico: ensaios realizados em outros países com agregados semelhantes à argila expandida recomendam sua aplicação nesse campo.
- Resistência a altas temperaturas: uma vez que a argila expandida é produzida em temperaturas de $1.100 \text{ }^\circ\text{C}$, ela é indicada para concretos refratários e como isolante térmico, até $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.7. Ar ambiente e propriedades de interesse ao conforto térmico de abrigos construídos

O ar atmosférico pode ser considerado uma mistura de substâncias puras (ar seco), vapor d'água e uma quantidade de outras substâncias, como gases poluentes, pólen e fumaça, de maneira que a concentração de vapor de água é relativamente baixa em comparação com o ar seco, e as quantidades das outras substâncias são quase insignificantes (CORTEZ et al., 2002).

As propriedades termodinâmicas, como temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo úmido (TBU), temperatura do ponto de orvalho (TO), umidade absoluta (W), umidade relativa (UR) e entalpia (h); são importantes para o estudo das condições atmosféricas e climatização de ambientes, pois elas caracterizam a influência da quantidade de vapor d'água no ar.

2.7.1. Temperatura de bulbo seco

Denominada de temperatura do ar, é a temperatura indicada por um termômetro que responde a uma mudança do sensor provocada pela dilatação ou contração térmica. Trata-se da verdadeira temperatura do ar úmido com o termômetro protegido da radiação solar (CORTEZ et al., 2002)

2.7.2. Termômetro de bulbo úmido

É a temperatura medida por um termômetro que tem seu bulbo envolto por um material, como um pedaço de algodão ou gaze, embebido em água destilada. Esse termômetro registra sempre uma temperatura menor que a do ar; isso acontece porque o ar, ao passar por ele, retira a umidade do material, até se saturar, sendo isso um processo simultâneo de transferência de calor e massa, com conseqüente redução da temperatura indicada pelo termômetro.

A capacidade de absorção de água é inversamente proporcional à sua umidade relativa. Quanto mais seco o ar, maior será a quantidade de água absorvida por ele e menor será a temperatura de bulbo úmido. Também, pode-se afirmar que, quando a umidade relativa do ar alcança 100%, as temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido são idênticas. Inicialmente, em virtude de o ar não estar saturado, parte da água da mecha de algodão começa a se vaporizar, reduzindo a temperatura do bulbo do termómetro. Estabelecendo-se esse diferencial de temperatura entre a mecha e a corrente de ar, o calor será cedido do ar para a mecha. Assim, sucede uma espécie de equilíbrio dinâmico, por intermédio do qual todo calor cedido pelo ar úmido será utilizado para evaporar a água da mecha (CORTEZ et al., 2002)

2.7.3. Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura na qual o vapor de água da atmosfera fica saturado é conhecida como temperatura de orvalho (SILVA, 2003), isto é, ponto em que se inicia a condensação do vapor de água contido no ar úmido, quando o processo de resfriamento do ar se dá a uma pressão e umidade absoluta ou específica constante (CORTEZ et al., 2002). Quando o vapor se torna saturado, inicia-se um processo de condensação. Nessas condições define-se a saturação do ar, indicando que nessa temperatura o ar contém a máxima quantidade possível de vapor.

2.7.4. Umidade absoluta do ar

É a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco presente na mistura (ar seco + vapor d'água), ou seja, é a quantidade de vapor d'água dissolvida em 1 kg de ar seco. Usualmente é expressa em kg de vapor de água por kg de ar seco, ou gramas de vapor d'água por kg de ar seco (SILVA, 2003).

2.7.5. Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar pode ser definida como a razão entre a quantidade de umidade absoluta do ar e a quantidade máxima que ele pode conter para a temperatura daquele determinado instante. De acordo com Cortez et al. (2002), essa umidade é definida como a razão entre a fração molar do vapor de água presente na mistura (ar seco + vapor d'água) e a fração molar desse componente na condição de saturação, considerando as mesmas temperaturas e pressão total do ar úmido, isto é, pode-se definir umidade relativa como a razão entre a pressão parcial de vapor de água do ar e a pressão de vapor de água na saturação.

2.7.6. Entalpia

Sendo o ar atmosférico uma mistura de dois gases, a sua entalpia é o resultado das massas que o constituem e das respectivas entalpias. A entalpia é medida em unidades de calor por unidade de massa de ar seco, ou seja, em kcal/kg de ar seco.

Segundo Silva (2003), a entalpia específica é muito utilizada para indicar o nível de energia de uma substância. Em psicrometria, utiliza-se geralmente a variação de entalpia envolvida nos processos de tratamento do ar. Se uma transformação ocorre apenas através da transferência de energia térmica, pela primeira lei da termodinâmica pode-se obter a variação de entalpia como sendo igual à variação de calor adicionado ou removido.

2.7.7. Propriedades termodinâmicas do ar no gráfico psicrométrico

A Figura 11 mostra graficamente as propriedades termodinâmicas do ar na carta psicrométrica.

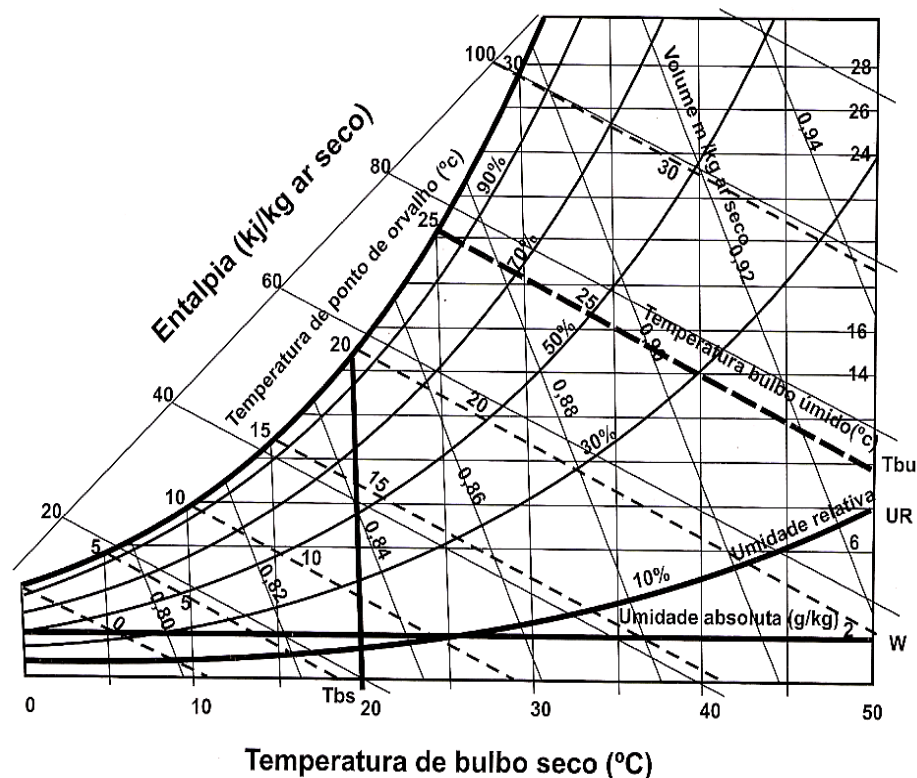


Figura 11 – Gráfico psicrométrico mostrando as propriedades termodinâmicas do ar.

2.8. Conforto térmico ambiente e produção animal

O termo conforto térmico está relacionado à questão do microclima (clima interior de uma instalação); por isso, condições ambientais inadequadas afetam direta e negativamente o desenvolvimento produtivo dos animais. Assim, as condições de conforto térmico para todos os animais são essenciais para que eles permaneçam em condições de expressar suas potencialidades.

Sabendo-se que a produção animal é o resultado do potencial genético das espécies e conhecendo sua interação com a nutrição, sanidade, manejo e fatores ambientais, verifica-se que muitos animais não conseguem expressar todo o seu potencial produtivo sob as condições adversas do meio em que vivem. Assim, o ambiente constitui-se em um dos principais responsáveis pelo sucesso ou fracasso da indústria de produção animal.

Segundo a ASHRAE (1997), a caracterização do ambiente térmico animal envolve os efeitos combinados de temperatura, umidade, radiação e vento e pode ser representada por meio de uma única variável, denominada temperatura efetiva. Para determinada faixa de temperatura efetiva ambiental, o animal mantém constante a temperatura corporal, com mínimo esforço dos mecanismos termorregulatórios. É a chamada zona de conforto térmico ou de termoneutralidade, em que não há sensação de frio ou calor e o desempenho do animal é otimizado (BAÊTA; SOUZA, 1997).

Silva (2000) destaca os fatores a serem considerados na determinação do conforto térmico e nas condições de adaptação dos animais a ambientes específicos:

- Ambiente interno do abrigo – temperatura do ar, temperatura radiante, radiação solar, umidade do ar, vento e pressão atmosférica.
- Envoltório do abrigo – espessura, estrutura, isolamento e amortecimento térmico dos materiais constituintes, influência e característica da ventilação natural advinda do exterior (relacionada aos movimentos da atmosfera), ventilação forçada ou dinâmica, permeabilidade ao vapor, transmissividade, emissividade, absorvidade, refletividade dos materiais de construção e acessórios etc.
- Características corporais – forma corporal, tamanho e movimentos, área de superfície radiante, área exposta à radiação solar direta, emissividade da epiderme e absorvidade da epiderme.
- Respostas fisiológicas – temperatura (epiderme, retal etc.), taxa de sudação, trocas respiratórias, produção, taxa de crescimento e desenvolvimento, níveis hormonais e metabolismo.

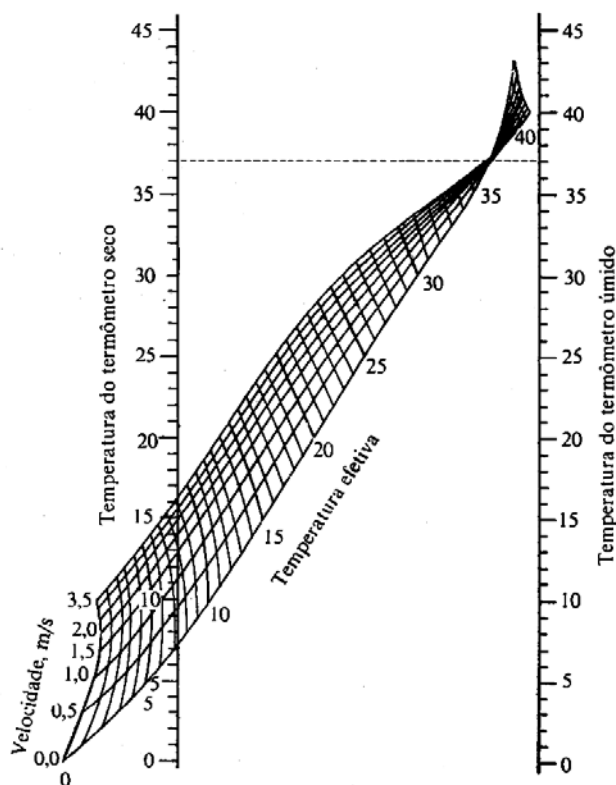
Os índices de conforto térmico, de acordo com Frota e Schiffer (2003), foram desenvolvidos com base em diferentes aspectos do conforto e podem ser classificados como:

- Índices biofísicos – baseiam-se nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos.
- Índices fisiológicos – baseiam-se nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar.
- Índices subjetivos – baseiam-se nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam. Tem relação com o bem-estar do usuário.

2.8.1. Zonas de conforto térmico

A temperatura efetiva (TE) é um índice que bem representa a sensação térmica. Uma vez que a temperatura, a umidade e a movimentação do ar interagem de forma independente, é necessário considerá-las juntas, pois todos esses fatores contribuem para determinar a sensação de frio ou calor experimentada pelo corpo humano ou animais em geral. A temperatura efetiva é uma composição desses parâmetros e procura exprimir a temperatura na qual “a maioria das pessoas e animais se sentem bem”, levando em conta o tempo de exposição e os efeitos da umidade e da movimentação do ar.

Testes realizados por Yaglou, em 1923, na cidade de Pittsburgh, EUA, resultaram na Carta de Conforto ASHRAE (Figura 12). Apesar de ter sido feita em Pittsburgh, com trabalhadores homens usando roupas para residência ou escritório, ela resultou no mais conhecido índice ou nas condições internas desejáveis e é utilizada por toda a indústria de condicionamento de ar (CAMARGO, 2003).



Fonte: Camargo (2000).

Figura 12 – Carta de conforto ASHRAE.

Uma carta psicrométrica, que inclui a zona de conforto da ASHRAE, é mostrada na (Figura 13a, b). Essa zona de conforto foi depois expandida para resfriamento evaporativo, conforme apresentado por Crow (1972) e pela Ashrae (1995).

Devido à forma da zona de conforto expandida da ASHRAE, tem-se que a curva de umidade relativa de 80% é o limite superior para o resfriamento evaporativo, podendo ser usada a umidade relativa de 70% como um limite alternativo em ambientes com pouca ventilação ou onde a umidade pode prejudicar os produtos ou objetos dentro do ambiente (CAMARGO, 2003).

Camargo (2000) determinou, no diagrama psicrométrico, uma zona em que, a partir dela, é possível atingir a região de conforto tanto através do resfriamento direto quanto do indireto. O resultado é mostrado na Figura 14.

Para escolher uma temperatura externa de projeto, pode-se optar por um determinado nível de frequência de ocorrência de temperatura.

Frequências de 1, 2,5 e 5% foram selecionadas pela ASHRAE visando oferecer alternativas ao projetista para julgar e decidir o nível de risco do seu projeto. Esses três níveis de frequência de ocorrência representam temperaturas de bulbo seco que são igualladas ou excedidas por 1, 2,5 e 5% do número total de horas dos meses de verão, de dezembro a março, no hemisfério sul (121 dias, num total de 2.904 h) (CAMARGO, 2003).

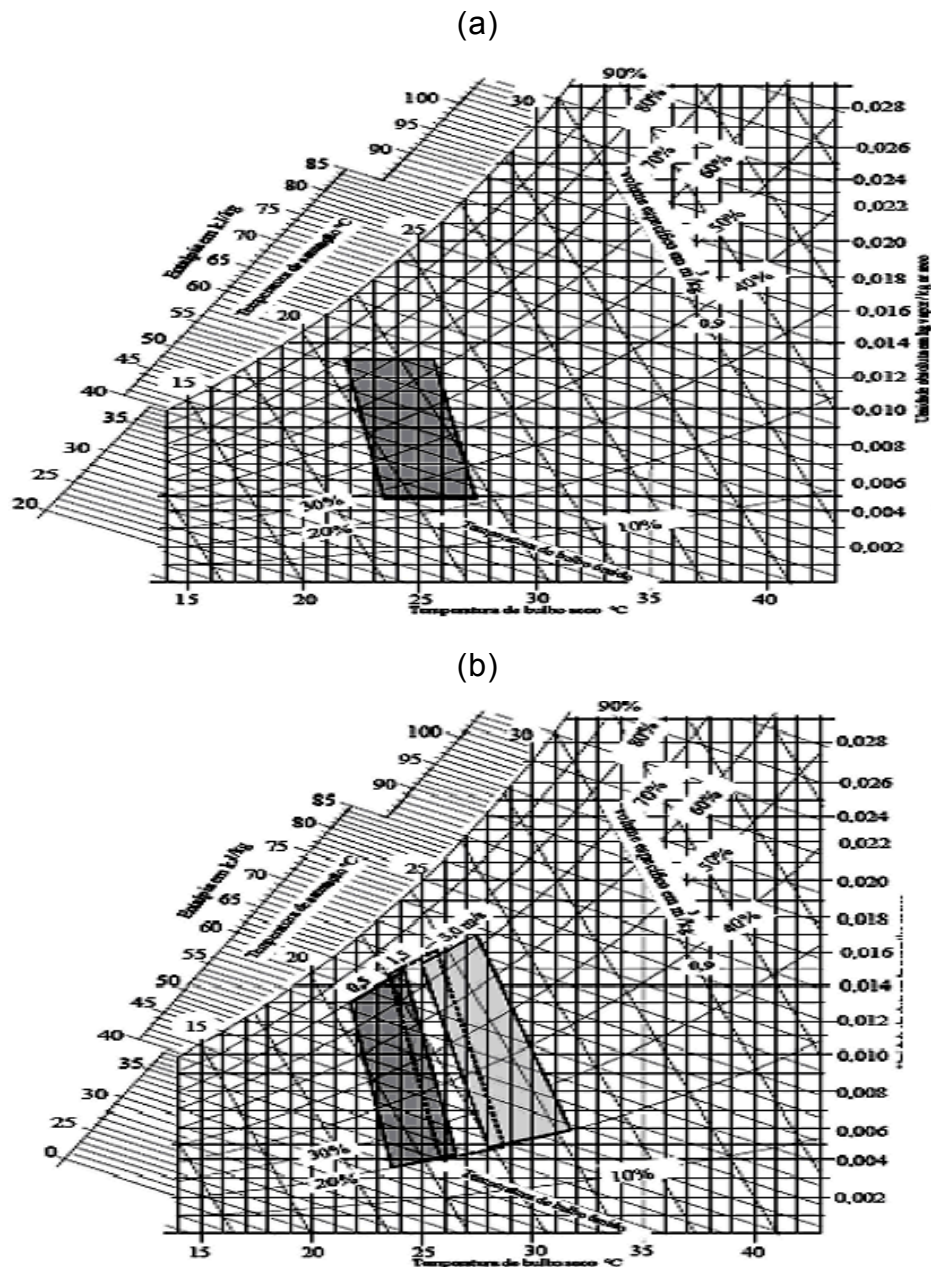


Figura 13 – Zonas de conforto ASHRAE (a): representa a zona de conforto para inverno e verão de acordo com a temperatura efetiva; (b): representa a mudança relativa na zona de conforto para o resfriamento evaporativo (CAMARGO, 2000).

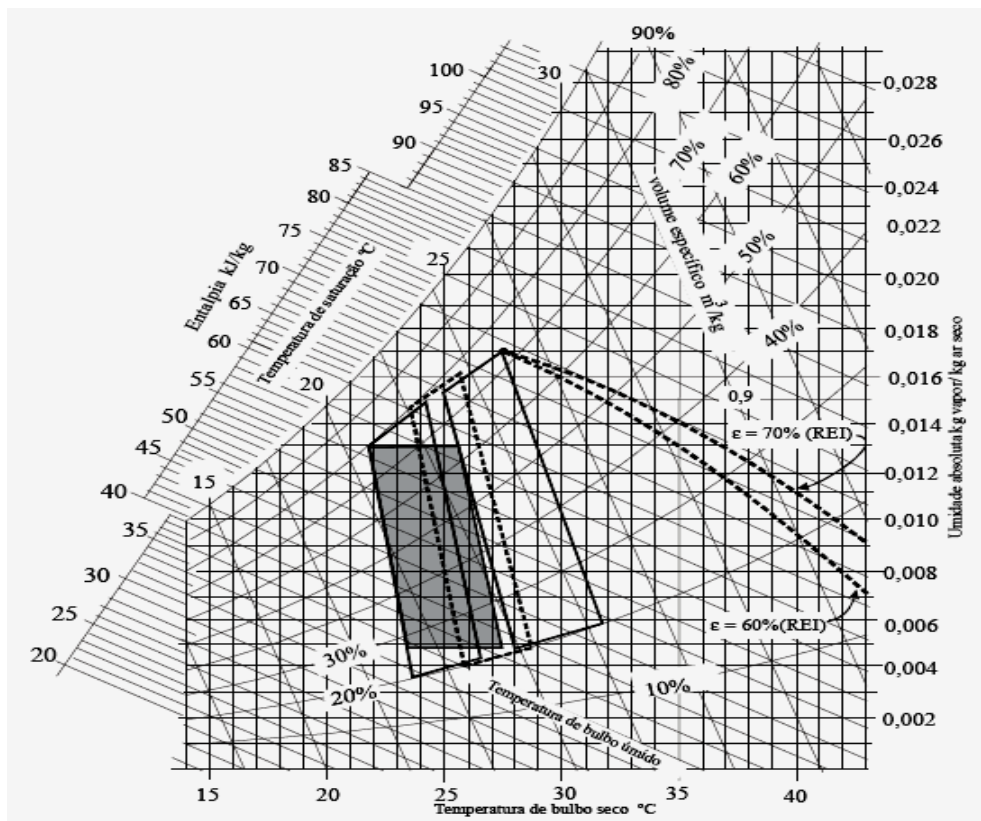


Figura 14 – Delimitação da região de onde é possível atingir a zona de conforto por resfriamento evaporativo.

2.8.2. Aplicações do resfriamento adiabático evaporativo em instalações para produção animal

Quando os meios naturais não são suficientes para promover melhorias no ambiente, torna-se necessária a utilização de meios artificiais – o aumento da taxa de ventilação – a fim de eliminar o calor produzido pelos animais, evitando uma temperatura excessivamente elevada dentro da instalação. A ventilação desses ambientes pode promover melhorias nas condições termo-higrométricas, representando um fator de conforto térmico de verão ao incrementar trocas de calor por convecção e evaporação. Sempre que os meios naturais não proporcionarem os índices de renovação do ar ou abaixamento de temperatura necessária, algum tipo de sistema de condicionamento de ambiente deve ser adotado (SILVA, 2000).

Os animais vivem em equilíbrio dinâmico com o meio e a ele reagem de forma individual. Sua produção está condicionada às influências do ambiente, o qual não se mantém constante ao longo do tempo. A vulnerabilidade dos animais às condições meteorológicas, quando deslocados para um ambiente diferente do ideal ou diante de mudanças dentro do mesmo ambiente, faz com que recorram a mecanismos de adaptação fisiológica para manter a homeostase (BACCARI JUNIOR, 2001).

De acordo com Hanh (1993), o estresse caracteriza a soma dos mecanismos de defesa do organismo em resposta a um estímulo provocado por um agente estressor, externo ou interno, para manter o equilíbrio fisiológico.

A resposta dos animais a um evento estressante compreende três componentes principais: o reconhecimento da ameaça à homeostase ou ao bem-estar, a resposta e as consequências do estresse. Uma série de fatores, como experiência anterior, genética, idade, sexo ou condições fisiológicas, modela a natureza da resposta biológica de um animal a um estressor (MOBERG, 1987).

O controle eficiente do ambiente pode empregar sistemas naturais e artificiais. Inúmeros métodos têm sido desenvolvidos para modificar o ambiente no qual o animal está inserido, visando amenizar o efeito do estresse térmico. A movimentação do ar, o umedecimento da superfície do animal, o resfriamento evaporativo do ar e o uso de sombras para minimizar o efeito da radiação solar são artifícios empregados para potencializar a dissipação de calor (WEST, 2003).

A capacidade do animal de resistir às condições de estresse calórico tem sido avaliada fisiologicamente por alterações na temperatura retal e frequência respiratória. A medida da temperatura retal é usada frequentemente como índice de adaptabilidade fisiológica aos ambientes quentes, pois seu aumento mostra que os mecanismos de liberação de calor se tornaram insuficientes (Mota, citado por MARTELLO et al., 2002). Na defesa contra o estresse pelo calor, os bovinos aumentam a frequência respiratória e a taxa de produção de suor, o que possibilita as perdas de calor do corpo por evaporação (BACCARI JUNIOR, 2001). A pele contribui

para a manutenção da temperatura corporal mediante trocas de calor com o ambiente: em temperaturas mais amenas o calor é dissipado para o ambiente na forma sensível e, sob estresse pelo calor, o principal processo de perda de calor é o da evaporação.

As respostas fisiológicas incluem a vasodilatação periférica e aumentos na taxa de sudorese e frequência respiratória. No campo imunológico, os glicocorticoides produzem alterações no número de glóbulos brancos e inibem a resposta linfocitária aos desafios imunogênicos. Como reação à resposta comportamental, verifica-se que os bovinos de origem europeia, não bem adaptados geneticamente ao calor, procuram sombra nas horas mais quentes do dia, durante o verão, tentando amenizar os efeitos do estresse térmico causado pela radiação solar direta (BACCARI JUNIOR, 2001). Também ocorre aumento no número de visitas ao bebedouro, procura por sombra e, quando há disponibilidade de lagoas, os animais tendem a permanecer em pé na água, de modo a facilitar a perda de calor por condução (PIRES et al., 1998).

Sartor et al. (1999) desenvolveram um experimento com o objetivo de verificar o efeito da ventilação forçada e de sistemas de resfriamento evaporativo no desempenho de matrizes suínas lactantes e de suas leitegadas. Os tratamentos utilizados foram: ventilação forçada, resfriamento evaporativo com nebulizador acoplado ao ventilador, resfriamento evaporativo com material poroso umedecido acoplado ao ventilador e testemunha. Analisando as variáveis temperatura retal, frequência respiratória, consumo de ração das matrizes e ganho de peso dos leitões, pôde-se concluir que os sistemas de resfriamento evaporativo proporcionaram redução significativa na temperatura retal (de 40,6 °C para 39,2 °C) e na frequência respiratória das matrizes (de 122 para 70 respirações/minuto), além de aumento de aproximadamente 25% no consumo de ração das matrizes e de aproximadamente 30% no ganho de peso dos leitões. Esses resultados foram obtidos em virtude das melhores condições térmicas ambientais para as matrizes lactantes nessas salas.

Nos últimos anos houve aumento na produção de carne avícola no Brasil, o que foi atribuído à introdução de novas tecnologias de

condicionamento térmico, visando economia de escala e redução dos custos de produção.

As inovações tecnológicas adotadas para criação de frangos de corte objetivam construir aviários que proporcionem conforto térmico, auxiliando as aves na expressão de seu potencial genético de produção. Dessa forma, para a concepção desses aviários é necessária uma sistematização dos dados climáticos da região onde será implantada a criação e comparar esses dados com as exigências das aves para definir quais as soluções construtivas necessárias que promovam o conforto térmico das aves, com menor custo.

O Brasil possui grande diversidade climática. Apesar dessa diversidade, a temperatura e a intensidade de radiação são elevadas em quase todo o ano e têm sido associadas ao estresse calórico. Esse problema tende a ser mais intenso na criação em alta densidade, em face do maior número de aves no aviário, conduzindo à maior produção de calor e ao estresse calórico. Novas tecnologias, quando adotadas, permitem reduzir o impacto das altas temperaturas, proporcionando à ave condições ideais de conforto térmico. Antes de adotar mecanismos sofisticados de condicionamento térmico para controlar o estresse calórico, devem ser considerados, para a concepção dos aviários, a localização, a orientação, as dimensões, o pé-direito, beirais, telhado, lanternim, fechamentos, quebra-ventos, sombreiros, características dos materiais a serem utilizados no aviário e outros que permitam o condicionamento térmico natural. Essas alternativas, porém, em muitos casos, principalmente em regiões quentes, são insuficientes para manter a temperatura ambiente de acordo com as exigências das aves. Nesse sentido, vários equipamentos e métodos de ventilação e de resfriamento do ar têm sido propostos.

Em regiões tropicais quentes e úmidas, onde o excesso de umidade impossibilita que a ave elimine calor através da respiração, há necessidade do resfriamento. Estando a temperatura e a umidade relativa altas, a ave não consegue respirar suficientemente rápido para remover todo o calor que precisa dissipar de seu corpo, podendo ocorrer a prostração e morte quando a temperatura ambiente alcançar 47 °C, que é o limite máximo fisiológico vital para aves, de acordo com Nääs (apud ARADAS, 2001).

Ventiladores e nebulizadores de última geração já são realidade na produção avícola. Tem-se observado boa aceitação do túnel de ventilação conjugado ao sistema de resfriamento evaporativo ("pad cooling" ou nebulização), com aumento de produtividade das aves. Com a adoção dessa tecnologia, buscam-se aviários pouco influenciados pelas condições climáticas externas, o que condiciona o emprego de materiais com bom isolamento térmico, como poliuretano, poliestireno, fibra de vidro, isopor, entre outros (ABREU; ABREU, 2000).

Os sistemas de resfriamento evaporativo na criação de aves são utilizados com o objetivo de reduzir a temperatura interna do aviário, minimizando os efeitos indesejáveis do estresse calórico sobre os animais. Dessa forma, os sistemas de resfriamento baseados em painéis umedecidos requerem ventilação mecânica para forçar o ar através dos painéis evaporativos; e dependendo das condições climáticas da região onde será implantado, é possível diminuir em 10 °C ou mais a temperatura do ar no interior do aviário.

Tinôco (1988) desenvolveu um trabalho com o objetivo de estudar as condições de conforto térmico e produtividade de frangos de corte em galpões providos de dois diferentes sistemas, sendo eles: resfriamento adiabático evaporativo e por aspersão e ventilação, em condições de verão. Como conclusão, observou-se que, entre os dois sistemas, o de resfriamento adiabático (evaporativo) foi o que proporcionou melhor condição de conforto térmico e, conseqüentemente, melhor condição de produção de aves.

Sartor et al. (2001) desenvolveram um trabalho com o objetivo de avaliar o efeito de três sistemas de resfriamento evaporativo no desempenho de frangos de corte. Para isso, utilizou-se um galpão dividido em quatro partes nas quais foram instalados os tratamentos: ventilador associado à nebulização (VNB), ventilador de alta rotação associado à nebulização (VNA), nebulização (NEB) e nebulização acoplada ao ventilador (NEV). Foram registrados o consumo de ração, o ganho de peso e a mortalidade, obtendo-se assim a conversão alimentar. Os sistemas de resfriamento evaporativo (VNA e VNB) proporcionaram os melhores resultados, com os maiores valores de ganho de peso por ave e os

menores valores de conversão alimentar e mortalidade. Resultados menos satisfatórios foram observados no NEV, com os menores valores de ganho de peso por ave e maiores valores de conversão alimentar e mortalidade.

Em outro trabalho, Sartor et al. (2003) avaliaram o efeito de um modelo de resfriamento evaporativo no desempenho de suínos, na fase de terminação. O experimento foi realizado nos meses de janeiro e fevereiro de 1999, no município de Patos de Minas - MG. Foram utilizados dois galpões divididos em 36 baias, permanecendo, em cada baia, 15 animais com idade entre 110 e 150 dias. Na lateral de um galpão, foram instalados quatro equipamentos com sistemas de ventilação e nebulização acoplados, tendo-se o tratamento com resfriamento evaporativo (SRE); já no outro galpão não foram feitas modificações, sendo o tratamento testemunha (TES). O sistema de resfriamento evaporativo melhorou as condições térmicas ambientais no interior das instalações de terminação de suínos, reduzindo os valores do índice de temperatura de globo e umidade (ITGU), bem como proporcionou melhor conversão alimentar e maior ganho de peso dos animais.

Campos et al. (2002) desenvolveram um trabalho que teve como objetivo determinar o potencial de redução de temperatura do ar por meio de sistemas de resfriamento adiabático evaporativo para a região de Maringá, Estado do Paraná. Foram utilizados dados de 13 anos da Estação Climatológica Principal de Maringá. Relacionou-se a temperatura ambiente, a umidade relativa e o potencial de redução de temperatura por meios evaporativos. Através dos resultados obtidos, foi possível depreender que os meses com maior potencial de redução de temperatura foram agosto, setembro, outubro e novembro, devido aos baixos valores de umidade relativa do ar. Os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, apesar de se situarem no verão, mostraram menor potencial de redução de temperatura por meio de resfriamento adiabático evaporativo, em razão da incidência de maiores valores de umidade relativa do ar. Entretanto, pelos valores analisados, conclui-se que esta técnica (resfriamento adiabático) apresenta-se promissora para os horários mais críticos (13h às 18h), com maior temperatura do ar.

2.9. Sistemas de climatização

Refrigeração é o nome dado ao processo de remoção do calor de um determinado meio e à manutenção dessa condição por meios mecânicos ou naturais. As aplicações da refrigeração são muitas; entre elas, destacam-se a conservação de alimentos e a climatização.

Quando se fala em “climatizar ambiente”, refere-se ao processo de tratamento de ar em recintos fechados, de modo a controlar simultaneamente a sua temperatura, umidade, pureza e movimentação, para obtenção de um ambiente mais agradável (SILVA, 2003).

2.9.1. Ventilação

De acordo com Costa (2005), dá-se o nome de ventilação ao processo de renovação do ar de um recinto. O objetivo fundamental da ventilação é controlar a pureza e o deslocamento do ar em um ambiente fechado, embora, dentro de certos limites, a substituição do ar também possa controlar a temperatura e a umidade do ambiente.

São diversas as formas de atingir as temperaturas de conforto dentro de um abrigo, e uma delas é a ventilação. Controlando-se, convenientemente, a entrada de calor no aviário, bem como facilitando a saída do calor produzido, a ventilação passa a ser uma complementação dos requisitos de conforto (ABREU; ABREU, 2000).

O conhecimento sobre a ventilação permite o desenvolvimento de processos de engenharia que se tornaram indispensáveis na moderna técnica das construções, visando sempre o necessário conforto ambiental, especialmente nas construções de caráter industrial, onde é comum o surgimento de desconfortos adicionais, provocados pela produção de calor e de contaminantes (COSTA, 2005).

A renovação do ar de um ambiente pode ser obtida por dois processos: ventilação natural e ventilação forçada – esta última também denominada de artificial ou mecânica.

2.9.1.1. Ventilação natural

A ventilação natural (espontânea) é um movimento do ar que ocorre devido às diferenças de pressão causadas pela ação de ventos ou de gradientes de temperaturas existente entre dois sistemas considerados. A ventilação natural permite alterações e controle da pureza do ar, provendo os abrigos de oxigênio, eliminando ou reduzindo os níveis de amônia, dióxido de carbono e outros gases nocivos, excesso de umidade e odores. Isso possibilita, dentro de certos limites, controlar a temperatura e a umidade do ar nos ambientes habitados, de forma que o ar quente e úmido expelido seja substituído; assim, aumenta a perda calorífica por convecção (TINÔCO, 1998).

2.9.1.2. Ventilação forçada

A ventilação forçada é produzida por equipamentos especiais, como exaustores e ventiladores. Deve ser utilizada sempre que as condições naturais de ventilação não proporcionarem adequada movimentação do ar ou abaixamento de temperatura no ambiente. Tem a vantagem de permitir filtragem, distribuição uniforme e suficiente do ar no ambiente e ser independente das condições atmosféricas. Permite fácil controle da taxa de ventilação, através do dimensionamento dos ventiladores, das entradas e saídas de ar.

A ventilação artificial, ou forçada, é aquela em que a movimentação do ar se faz por meios mecânicos. Ela pode ser classificada, em geral, como diluidora ou local exaustora (COSTA, 2005).

A ventilação artificial (mecânica) é produzida por dispositivos especiais, que requerem energia, especialmente elétrica, para o seu funcionamento, como exaustores, ventiladores etc. A principal vantagem desse sistema é a possibilidade de controlar a taxa de ventilação, por meio de ventilador com adequada capacidade, de entradas de ar bem localizadas e com as dimensões corretas (BAÊTA; SOUZA, 1997)

A movimentação forçada do ar no interior de uma instalação pode ser realizada de duas formas: sistema de pressão negativa ou exaustão; e sistema de pressão positiva ou pressurização.

2.9.1.3. Sistema de ventilação por pressão negativa ou exaustão

Nesse processo, o ar é forçado por meio de ventiladores (exaustores) de dentro para fora da instalação, o sistema cria uma diferença de pressão do ar de dentro e do lado de fora, e este sai por meio de aberturas.

No sistema de ventilação por exaustão, os ventiladores são posicionados no sentido longitudinal ou transversal, voltados para fora em uma das extremidades da instalação. Na outra extremidade são dispostas aberturas para entrada do ar (Figura 15). Com o sistema em funcionamento, os ventiladores são acionados, succionando o ar de uma extremidade à outra da instalação. A eficiência desse processo depende de uma boa vedação do aviário, evitando perdas de ar. Nos casos em que os contaminantes são localizados e podem ser retirados (captados) antes que se espalhem pelo ambiente, como ocorre na maior parte das operações industriais, a ventilação indicada, por ser mais eficiente e econômica, é a ventilação local exaustora (COSTA, 2005).

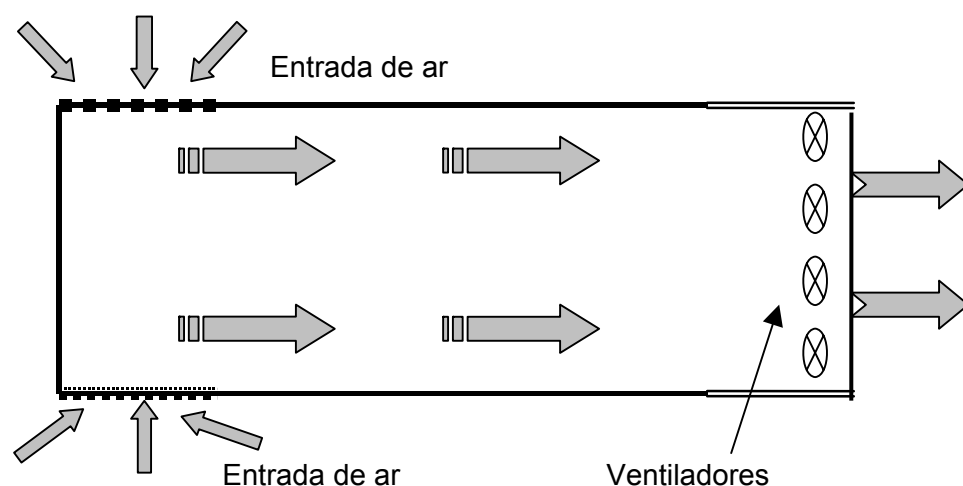


Figura 15 – Esquema de um sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel.

2.9.1.4. Sistema de ventilação por pressão positiva ou pressurização

No sistema de ventilação por pressão positiva, o ar externo ao abrigo é insuflado para dentro deste por meio de ventiladores, gerando gradiente de pressão positiva do ar. A ventilação é denominada geral diluidora quando o ar admitido se mistura com o ar anteriormente presente no ambiente, diluindo seus contaminantes antes de estes serem retirados do recinto. Quando o ambiente é limpo e se deseja mantê-lo em uma pressão superior à do exterior para evitar infiltrações indesejadas, o sistema de ventilação diluidora adotado é o de insuflamento com possibilidade de filtragem do ar (COSTA, 2005).

2.10. Desempenho de um resfriador evaporativo

São muitos os estudos realizados acerca do desenvolvimento de sistemas de resfriamento evaporativo, seja de cunho teórico, experimental ou aplicado.

Em 2004, Pimenta e Castro desenvolveram um modelo matemático da transferência de calor e massa para sistemas de resfriamento evaporativo direto por painéis de contato, obtido por meio da aplicação de um balanço global de massa e energia em um volume de controle, formado pela corrente de ar úmido e pelo painel. Foi analisada a relação da transferência de calor e massa entre a água envolvida no processo e o ar – modelo esse validado em pesquisa relativa à determinação de eficiência de resfriador evaporativo padrão e outros alternativos.

Maclaine-Cross e Banks (1981) propuseram uma teoria para correlacionar o coeficiente de transferência de superfícies seca e úmida. Com essa teoria, foi possível determinar o desempenho de um trocador de calor de superfície úmida e compará-lo com os resultados experimentais.

Dowdy e Karabash (1987) obtiveram experimentalmente os coeficientes de transferência de calor e massa para o processo de resfriamento evaporativo direto através de vários tamanhos de painéis evaporativos de celulose, o que possibilitou maior detalhamento no método de dimensionamento de equipamentos evaporativos.

Dai e Sumathy (2002) analisaram teoricamente um resfriador evaporativo direto usando como meio úmido papel do tipo colmeia, mostrando que painéis evaporativos com essas características são mais compactos em tamanho e peso e podem suprir a necessidade de resfriamento e umidificação desejados.

Liao e Chiu (2002) desenvolveram um túnel de vento compacto para simular sistemas de resfriamento evaporativo e testar painéis evaporativos fabricados por materiais alternativos. O desempenho de resfriamento evaporativo em termos da efetividade e queda de pressão foi determinado para painéis à base de esponja de PVC, áspera e fina, com espessuras de 50, 100 e 150 mm. Verificou-se que o painel feito em esponja de PVC áspera apresentou efetividade variando entre 81 e 85% aproximadamente, para condições de operação estabelecidas, enquanto o painel em esponja de PVC fina apresentou efetividade entre 76 e 91%.

Camargo e Ebinuma (2002) apresentaram um modelo matemático do resfriamento evaporativo direto e indireto com base na transferência de calor e massa entre o ar e a água, sob certas hipóteses de simplificação. Assim, foi possível chegar a relações entre as principais grandezas envolvidas no resfriamento evaporativo, que podem ser usadas na simulação do processo em busca de uma otimização para o projeto.

Castro e Pimenta (2004) realizaram uma abordagem teórica acerca dos princípios de funcionamento de um sistema de resfriamento evaporativo direto por painéis de contato, apresentando uma modelagem matemática da transferência de calor e massa em painéis evaporativos, além de um modelo para cálculo da queda de pressão em um painel comercial de celulose.

2.10.1. Transferência de calor e massa em uma parede umidificada

Na análise de uma transferência de calor e massa, considera-se que a mistura gasosa de ar com vapor de água obedece à lei dos gases ideais e que as perdas para o ambiente são desprezíveis, isto é, o processo é adiabático. O processo é realizado em regime permanente e são desprezíveis as variações de energia cinética e energia potencial. Devido à

circulação constante da água de umidificação do painel, é considerado que sua temperatura seja próxima à de bulbo úmido do ar ambiente (CASTRO; PIMENTA, 2004).

Segundo Carossi (2006), ao atravessar uma parede umidificada (Figura 16), o ar sofre uma variação de temperatura por transferência de calor sensível e por transferência de calor latente.

A transferência de calor sensível acontece quando a temperatura da superfície (T_s) for diferente da temperatura do ar (T_{AR}) que a atravessa. Se a pressão parcial do vapor na corrente de ar (P_v) for diferente da pressão parcial do vapor no ar junto à superfície (P_s), haverá transferência de massa. Essa transferência de massa necessita de energia em forma de calor sensível para a mudança de fase da água. No caso específico da evaporação, o calor sensível deve ser transferido do ar para a água.

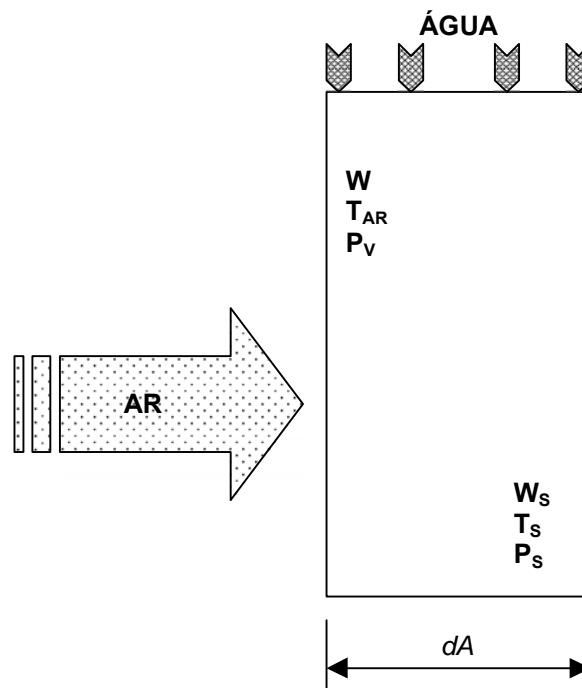


Figura 16 – Esquema do painel evaporativo com as grandezas do processo de transferência de calor e massa entre o ar e a superfície úmida.

Segundo Castro e Pimenta (2004), a taxa de transferência de calor sensível é dada por:

$$dQ_s = h_c dA (T_s - T_{AR}) \quad (1)$$

em que:

dQ_s é a taxa de calor sensível; h_c , o coeficiente de transferência de calor por convecção ($Wm^{-2} °C^{-1}$); dA , o elemento de área; T_s , a temperatura da superfície do painel evaporativo; e T_{AR} , a temperatura do ar ambiente.

A taxa de transferência de massa é proporcional à diferença de pressões parciais, e a umidade específica é proporcional à pressão parcial de vapor, então:

$$\dot{m} = h_D dA(W_s - W) \quad (2)$$

em que:

\dot{m} é a taxa de transferência de massa; h_D , o coeficiente de transferência de massa; W_s , a umidade absoluta do ar na superfície do painel; e W , a umidade absoluta do ar ambiente.

Lembrando que a equação de cálculo da taxa de transferência de calor latente (dQ_L) é o produto da taxa de transferência da massa com o calor latente de vaporização da água (L_v), tem-se:

$$dQ_L = \dot{m}L_v \quad (3)$$

então:

$$dQ_L = h_D dA(W_s - W)L_v \quad (4)$$

em que a constante de proporcionalidade da transferência de massa (h_D) pode ser relacionada, para facilitar na determinação da taxa de transferência de calor latente, com o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) na forma:

$$h_D = \frac{h_c}{c_{pu}} \quad (5)$$

em que c_{pu} é o calor específico do ar úmido, que é dado por:

$$c_{pu} = c_p + W c_{ps} \quad (6)$$

A taxa de transferência de calor total é dada pela soma das equações 1 e 4:

$$dQ_t = dQ_s + dQ_L \quad (7)$$

isto é:

$$dQ_t = h_c dA (T_s - T_{AR}) + h_D dA (W_s - W) L_v \quad (8)$$

Substituindo as equações 5 e 6 na equação 8 e reagrupando os dados, obtém-se:

$$dQ_t = \frac{h_c dA}{c_{pu}} (h_s - h_{AR}). \quad (9)$$

2.10.2. Eficiência do resfriamento adiabático evaporativo do ar

A partir da equação 1 e da média logarítmica das diferenças das temperaturas do ar, obtém-se a equação:

$$1 - \frac{T_{ext} - T_{int}}{T_{ext} - T_{BU}} = \exp\left(-\frac{h_H A (T_{ext} - T_{int})}{Q}\right) \quad (10)$$

A eficiência ε pode ser obtida por meio de:

$$\varepsilon = \frac{T_{ext} - T_{int}}{T_{ext} - T_{BU}} 100\% \quad (11)$$

ou também por:

$$\varepsilon = \left[1 - \exp\left(-\frac{h_H A (T_{ext} - T_{int})}{Q}\right)\right] \quad (12)$$

Se o valor do coeficiente de transferência de calor h_H não for conhecido, pode ser calculado por:

$$h_H = \frac{Q}{A} \cdot \frac{\ln\left(\frac{T_{int} - T_{BU}}{T_{ext} - T_{BU}}\right)}{T_{int} - T_{ext}} \quad (13)$$

podendo ser reduzida a:

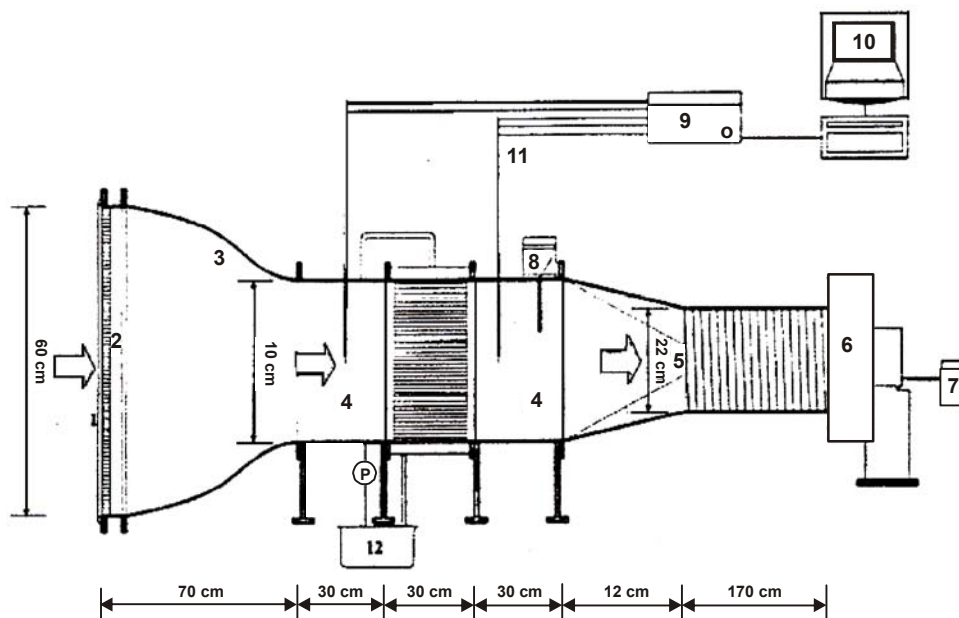
$$h_H = \frac{Q}{A} \cdot \frac{\ln(1 - \varepsilon)}{(T_{int} - T_{ext})} \quad (14)$$

2.10.3. Bancada de testes de Liao e Chiu

Liao e Chiu (2002) fizeram medições experimentais diretas para determinar a eficiência de sistemas evaporativos utilizando um túnel de

vento. Avaliaram os efeitos da velocidade do ar, do fluxo de água, da queda de pressão e da eficiência de resfriamento. No caso dos modelos experimentados, os testes indicaram eficiência de 76,7 a 91,6% para velocidade do ar variando de 0,75 a 1,5 m/s. Os elementos evaporativos utilizados foram produzidos a partir de esponjas de plástico PVC. A Figura 17 apresenta a bancada de testes montada por Liao e Chiu; em função dos parâmetros mensurados, procedeu-se ao balanço de massa e energia para as condições de regime permanente necessário à determinação dos parâmetros de interesse (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Vigoderis (2002), Liao e Chiu, nessa mesma época, realizaram estudos com vários materiais da região de Taiwan. Para isso, foi utilizado um túnel de vento convencional, porém em escala e concepção diferenciadas. Esse equipamento possibilitou respostas quanto aos fatores físicos de materiais diversos semelhantes às daqueles obtidos num túnel de vento convencional, com a vantagem de ser menor, mais econômico, fácil de manusear e adequado à utilização em laboratórios.



Fonte: Oliveira (2007).

Figura 17 – Bancada de testes montada por Liao e Chiu (2002).

2.11. Regressão linear múltipla

As regressões lineares múltiplas envolvem três ou mais variáveis. O estimador é uma variável dependente em função de duas ou mais variáveis independentes. Em geral, a variável dependente ou de resposta pode estar relacionada a k variáveis independentes ou regressores.

A equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (15)$$

é chamada de modelo de regressão linear múltipla com k regressores.

Os parâmetros β_j , $j = 0, 1, 2, \dots, k$ são chamados de coeficientes de regressão, e ε é o termo do erro aleatório.

Os modelos de regressão linear múltipla são frequentemente usados como modelos empíricos. Ou seja, o modelo mecanístico (modelos baseados no conhecimento científico de física, química ou de engenharia do fenômeno) que relaciona Y e x_1, x_2, \dots, x_k é desconhecido, porém, em certas faixas das variáveis independentes, o modelo de regressão linear é uma aproximação adequada (MONTGOMERY et al., 2004).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Experimento de campo

O experimento de campo foi realizado nos períodos de janeiro de 2007, abril de 2007 e janeiro de 2008, no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Anteriormente à parte experimental, procedeu-se à restauração do túnel de vento desenvolvido por Vigoderis (2002), à construção do painel móvel e à instalação do reservatório de água (abastecimento de água) usado no processo de umedecimento do sistema de resfriamento estudado. Concomitantemente, procedeu-se à separação da argila expandida por granulometria, à instalação e calibração dos instrumentos medidores e à instalação do sistema de aquisição automática de dados para cada variável envolvida.

3.1.1. Túnel de vento para avaliação das placas de materiais porosos

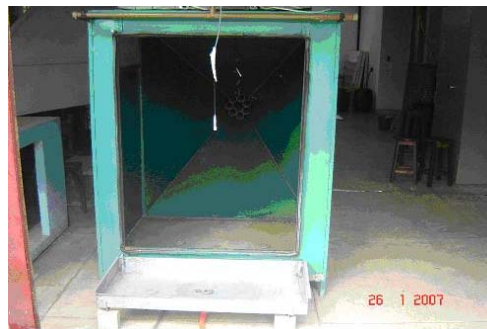
O túnel de vento utilizado na pesquisa foi construído e desenvolvido por Vigoderis (2002), com base em protótipo de Liao e Chiu (2002). Esse

equipamento permite avaliações de dados físicos e térmicos do ambiente e da eficiência de sistemas de resfriamentos evaporativos com painéis evaporativos fabricados por materiais alternativos (Figura 18a, b, c).

(a)



(b)



(c)



Figura 18 – Túnel de vento desenvolvido por Vioderis (2002). (a) - vista lateral; (b) - vista frontal sem o painel poroso (c) - vista frontal, mostrando o painel e, abaixo, a calha para recolhimento da água drenada.

O túnel de vento concebido por Vigoderis (2002), com base em protótipo de Liao e Chiu (2002), é composto pelas seguintes partes: câmara com 1,50 m de altura, 1,00 m de largura e 1,20 m de profundidade. Essas dimensões foram adotadas para que as características psicrométricas do ar pudessem ser avaliadas em, no mínimo, um metro de distância das placas porosas. O túnel assim constituído possui uma abertura com dimensões de 1,23 x 0,93 m, onde foram acomodados os painéis porosos. A câmara foi confeccionada com chapas metálicas galvanizadas nº 26. Em uma das extremidades da câmara foram colocados os painéis porosos para a realização dos testes. No centro geométrico de cada uma das faces da câmara foram colocados orifícios, para instalação de tubos plásticos, para a medição da pressão estática em vários pontos. Uma redução metálica foi fixada na extremidade oposta da câmara, convergindo para um duto circular de 0,26 m de diâmetro e 3,00 m de comprimento. Faz parte do sistema um ventilador centrífugo de vazão de $1,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, acionado por um motor de 5.500 W, 220/380 Volts, trifásico, de 1.750 rpm. A extremidade livre do ventilador possui um anteparo regulável, com a função de variar a vazão do ar e, conseqüentemente, a velocidade deste (Figura 19).

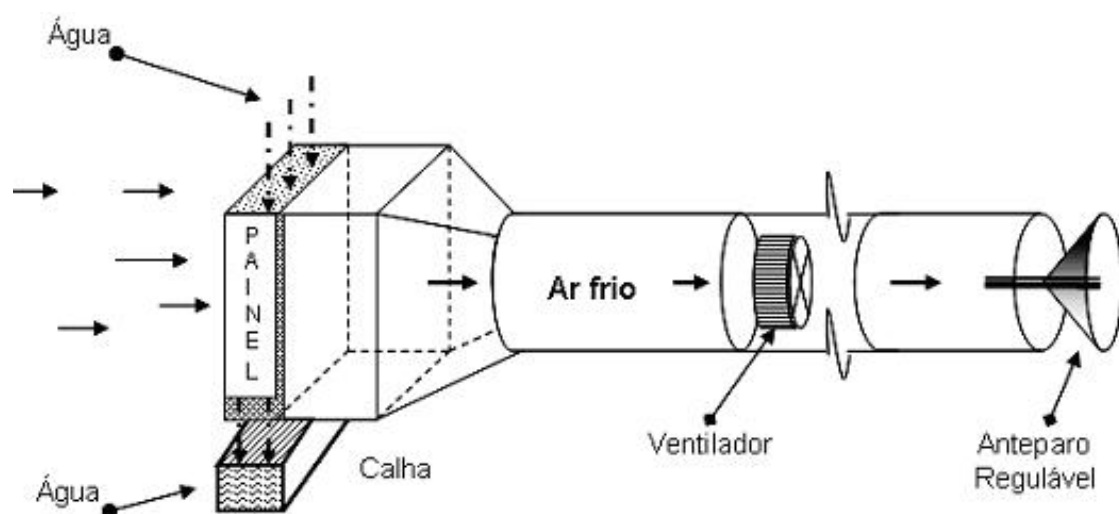


Figura 19 – Representação esquemática do túnel de vento e do painel de resfriamento evaporativo.

Durante os testes, os painéis de material poroso foram irrigados com água do reservatório anexo. Dessa forma, o ar externo, ao ser forçado a atravessar o painel, entrava em contato com a água nele contida, ocorrendo assim a evaporação e o conseqüente resfriamento do ar. O sistema de molhamento dos painéis foi constituído de um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro, posicionado logo acima da placa e perfurado a cada 35 mm, num total de 28 furos, por onde gotejava a água em uma lâmina homogênea através do material poroso (Figura 20).

Abaixo dos painéis evaporativos, foi colocada uma calha metálica conectada a um tubo de PVC de 20 mm, visando à coleta da água excedente que deixava o material poroso (Figura 18c).

Conforme mencionado, este tubo era abastecido pela água de uma caixa-d'água, a uma vazão de aproximadamente $0,27 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figura 21).



Figura 20 – Sistema de molhamento dos painéis evaporativos.



Figura 21 – Sistema abastecido pela caixa-d'água.

3.1.2. Painéis de material poroso em argila expandida

Foram construídos dois painéis com dimensões fixas, com espessuras de 8,5 e 10 cm, respectivamente.

Outro painel foi construído por duas telas sobrepostas móveis, nas dimensões de 1,23 x 0,93 m, em tela de arame galvanizado com malha de 15 x 15 mm e espessuras variáveis conforme a necessidade para os testes. Os painéis nessas dimensões visaram compatibilizar a praticidade no manuseio e a caracterização dos parâmetros analisados e foram fixados à abertura da câmara por meio de parafusos borboletas. O espaço entre as telas foi preenchido com a argila expandida, nas diferentes granulometrias utilizadas na pesquisa (Figura 22).



Figura 22 – Detalhes da argila expandida acomodada entre as telas.

3.1.3. Placas de material poroso em celulose

Foram utilizadas como testemunha placas de celulose com dimensões de 1,23 x 0,31 x 0,15 m, da marca Munters®, com proteção de tinta betuminosa na face externa (Figuras 23 e 24). Adotou-se essa espessura por ser aquela usualmente empregada no arrefecimento térmico de instalações para produção animal, em geral.



Figura 23 – Painéis com argila expandida e placas de celulose usadas como testemunha.



Figura 24 – Painel de celulose instalado no túnel de vento para teste.

3.1.4. Medições e sistema de aquisição de dados

Todas as medições foram realizadas para quatro diferentes aberturas do regulador de vazão do protótipo. Esse procedimento visou à obtenção dos valores de velocidade do ar, pressão estática, corrente elétrica no motor, tensão, temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar externo, temperatura e umidade relativa do ar interno, para diferentes vazões, desde a menor até a maior abertura do regulador de vazão (Figuras 25 e 26).



Figura 25 – Regulador de vazão do protótipo – Detalhe 1.



Figura 26 – Regulador de vazão – Detalhe 2.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente externo próximo ao painel e no interior do túnel de vento foram obtidos por meio de um sistema automático de aquisição de dados, tendo como plataforma um microcomputador (Figura 27).

Nessa configuração, uma placa de aquisição de dados (CYDAS 1620HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT) de 16 canais de entrada analógica, com 16 bits, foi instalada em um microcomputador.

Além da placa principal, foi utilizada uma placa de expansão CYEXP32 (Figura 28), para amplificação dos sinais provenientes dos termopares do tipo T (Cobre-constantan). Os canais analógicos foram conectados aos sensores responsáveis pelo monitoramento do ambiente físico (Figura 29).

Nessa configuração, uma placa de aquisição de dados (CYDAS 1620HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT) de 16 canais de entrada analógica, com 16 bits, foi instalada em um microcomputador.

Além da placa principal, foi utilizada uma placa de expansão CYEXP32 (Figura 28), para amplificação dos sinais provenientes dos termopares do tipo T (Cobre-constantan). Os canais analógicos foram conectados aos sensores responsáveis pelo monitoramento do ambiente físico (Figura 29).

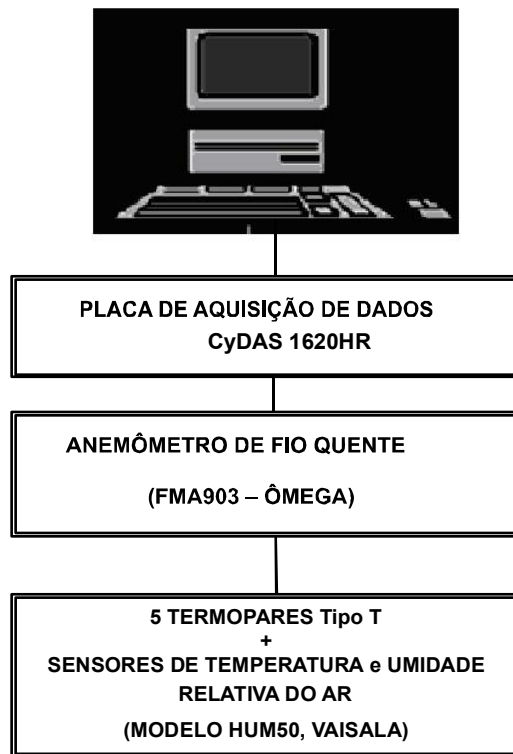


Figura 27 – Esquema do sistema de aquisição de dados utilizado na pesquisa.

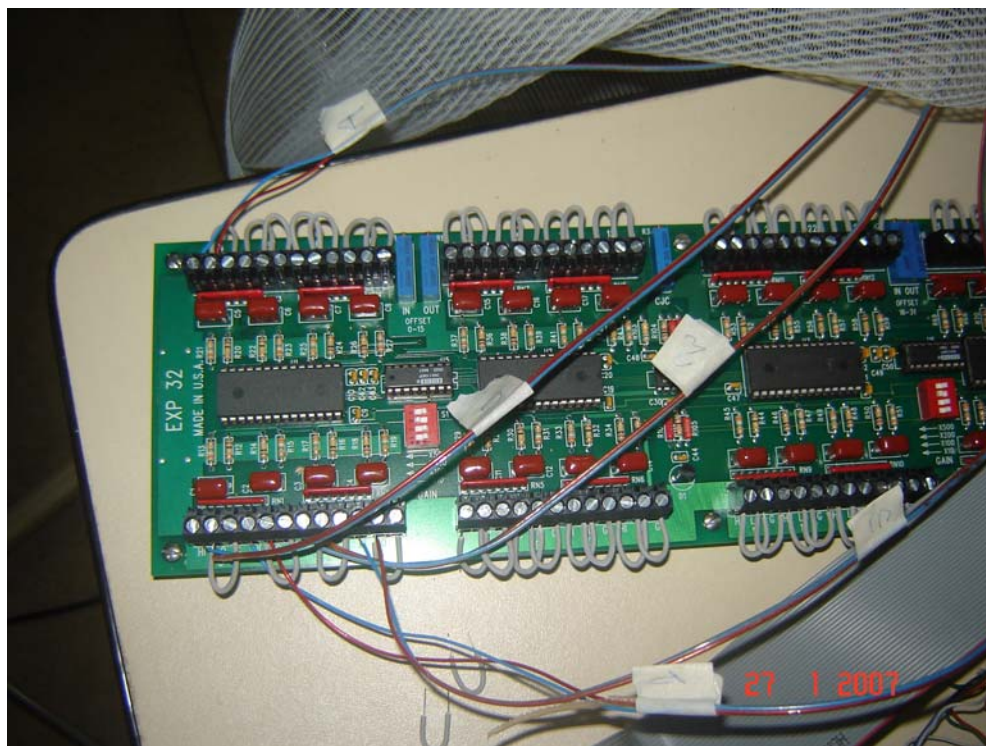


Figura 28 – Placa de expansão CYEXP32.



Figura 29 – Placa de aquisição de dados - CYDAS 1620HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT, e placa de expansão CYEXP32.

A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um instrumento que combina dois sensores independentes, sendo um para temperatura e outro para umidade relativa do ar (modelo HUM50Y, VAISALA, Woburn, MA) (Figura 30). Além desses sensores, termopares do tipo “T” foram instalados no interior do túnel, para leitura das temperaturas.



Figura 30 – Sensor utilizado para leitura das temperaturas e umidades relativas do ar – modelo HUM50Y, VAISALA.

Uma estrutura retangular foi usada como dispositivo para estabelecer pontos de leitura das velocidades do ar próximo ao painel, tendo como características: dimensões de 1,23 x 0,93 m, com cantoneiras de abas de 150 mm, reticuladas com fios de alumínio, formando 110 pontos de observação. Essa estrutura foi instalada próxima às placas evaporativas. Dessa forma, as velocidades do ar foram medidas posicionando o aparelho medidor no centro geométrico de 20 pontos, determinando-se a velocidade média do ar por cada repetição, antes de sua passagem pela placa porosa. Para essas leituras foi utilizado um anemômetro de fio quente (modelo FMA-903-I, OMEGA, Stanford) (Figura 31).



Figura 31 – Anemômetro de fio quente, modelo FMA-903-I, OMEGA, Stanford.

3.1.5. Procedimento experimental

Para a realização dos testes experimentais fez-se a interação entre três fatores influenciadores no processo de resfriamento adiabático evaporativo: tipo de argila expandida, espessura do painel e vazão do ar.

Foram utilizados dois tipos de argila expandida (cinasita), equivalentes às britas 1 e 2, denotadas como granulometria 1 (G_1) e granulometria 2 (G_2), respectivamente.

Foram escolhidas três espessuras de painéis para os testes: 6,0 cm (E_1), 8,5 cm (E_2) e 10,0 cm (E_3).

Cada abertura do regulador de vazão foi denominada de V_1 , V_2 , V_3 e V_4 , sendo V_1 as menores e V_4 as maiores vazões e velocidades do ar, durante o experimento.

Dessa forma, com duas granulometrias, três espessuras e quatro vazões, formaram-se 24 conjuntos de medidas para os testes; para cada conjunto foram feitas três séries de repetições. No Quadro 3 é apresentado, na última coluna, cada conjunto formado.

A placa de celulose utilizada como testemunha foi submetida a quatro vazões diferentes. Como ela é de apenas uma espessura, foram criados os conjuntos: Celulose V_1 , Celulose V_2 , Celulose V_3 e Celulose V_4 . Para cada conjunto, realizaram-se três repetições em cada etapa da pesquisa.

Diante do exposto, foram formados e testados 28 conjuntos, em que cada um apresentava uma inter-relação entre argila expandida (granulometria 1 ou 2), espessuras (1, 2 ou 3) e vazão (1, 2, 3 ou 4).

Para obtenção de modelos estatísticos, fez-se a relação entre todos os fatores entre si, obtendo equações ajustadas.

Os dados foram analisados por meio de análise de regressão linear múltipla. Foi considerada como dependente a variável Eficiência de resfriamento do painel (ϵ) e, como independentes, as seguintes variáveis: Espessura do painel (E) e Velocidade do ar externo (V).

Os modelos utilizados foram pré-definidos em função dos fatores influenciadores. Os parâmetros adotados para obtenção das equações foram definidos em função dos dados coletados, da seguinte forma: granulometrias 1 e 2; espessuras dos painéis: 6,0, 8,5 e 10,0 cm; e para as velocidades utilizaram-se os valores médios medidos para cada abertura do regulador de vazão.

Os modelos foram escolhidos com base na significância da regressão, utilizando-se o teste t de Student em níveis de 1 e 5% de probabilidade no coeficiente de determinação. Para a análise estatística e obtenção dos modelos estatísticos dos resultados, utilizou-se o programa SAEG (Sistemas de Análises Estatísticas e Genéticas), versão 8.0, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa.

Quadro 3 – Conjuntos de painéis formados para os testes

Nº	Argila Expandida	Espessura	Vazão	Conjunto
1	Granulometria 1	Espessura 1	Vazão 1	G1 E1 V1
2	Granulometria 1	Espessura 1	Vazão 2	G1 E1 V2
3	Granulometria 1	Espessura 1	Vazão 3	G1 E1 V3
4	Granulometria 1	Espessura 1	Vazão 4	G1 E1 V4
5	Granulometria 1	Espessura 2	Vazão 1	G1 E2 V1
6	Granulometria 1	Espessura 2	Vazão 2	G1 E2 V2
7	Granulometria 1	Espessura 2	Vazão 3	G1 E2 V3
8	Granulometria 1	Espessura 2	Vazão 4	G1 E2 V4
9	Granulometria 1	Espessura 3	Vazão 1	G1 E3 V1
10	Granulometria 1	Espessura 3	Vazão 2	G1 E3 V2
11	Granulometria 1	Espessura 3	Vazão 3	G1 E3 V3
12	Granulometria 1	Espessura 3	Vazão 4	G1 E3 V4
13	Granulometria 2	Espessura 1	Vazão 1	G2 E1 V1
14	Granulometria 2	Espessura 1	Vazão 2	G2 E1 V2
15	Granulometria 2	Espessura 1	Vazão 3	G2 E1 V3
16	Granulometria 2	Espessura 1	Vazão 4	G2 E1 V4
17	Granulometria 2	Espessura 2	Vazão 1	G2 E2 V1
18	Granulometria 2	Espessura 2	Vazão 2	G2 E2 V2
19	Granulometria 2	Espessura 2	Vazão 3	G2 E2 V3
20	Granulometria 2	Espessura 2	Vazão 4	G2 E2 V4
21	Granulometria 2	Espessura 3	Vazão 1	G2 E3 V1
22	Granulometria 2	Espessura 3	Vazão 2	G2 E3 V2
23	Granulometria 2	Espessura 3	Vazão 3	G2 E3 V3
24	Granulometria 2	Espessura 3	Vazão 4	G2 E3 V4
25	Celulose		Vazão 1	Celulose V1
26	Celulose		Vazão 2	Celulose V2
27	Celulose		Vazão 3	Celulose V3
28	Celulose		Vazão 4	Celulose V4

3.2. Pressão estática

Para os testes realizados, fez-se um acompanhamento da pressão estática em três pontos do túnel. Esse procedimento teve o objetivo de verificar se os valores das pressões eram os mesmos, assegurando que o fluxo de ar permanecesse homogêneo e a vazão de ar fosse a mesma em todos os pontos dos painéis utilizados.

As leituras de pressão estática foram obtidas utilizando-se um micromanômetro, com medidas em mm H₂O e exatidão de $\pm 2\%$ mm H₂O, o qual foi acoplado a cada um dos tubos fixados nas faces da câmara, por meio de uma mangueira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Avaliação das eficiências dos painéis de argilas expandidas em relação ao painel de celulose

4.1.1. Eficiência de cada painel evaporativo para cada distinta abertura do regulador de vazão, granulometria e espessura

Os resultados médios das eficiências dos sistemas de resfriamento adiabáticos evaporativos alcançados por cada conjunto de fatores, como granulometria e espessura, para cada abertura do regulador de vazão, encontram-se ilustrados na (Figura 32). As Figuras 33 e 34 mostram resultados de eficiências de resfriamento adiabático evaporativo para as diferentes espessuras de painéis estudadas, comparativamente ao painel de celulose (testemunha).

Pode-se inferir, pela Figura 32, que o túnel de vento mostrou-se apto para o desenvolvimento da pesquisa, pois os resultados de eficiência de resfriamento alcançados pelo painel de celulose ficaram entre 75 e 80%. Esses valores estão muito próximos daqueles preconizados pela indústria fabricante, bem como dos valores obtidos para o mesmo material por Vigoderis (2002) quando testou a viabilidade do protótipo do túnel de vento em questão.

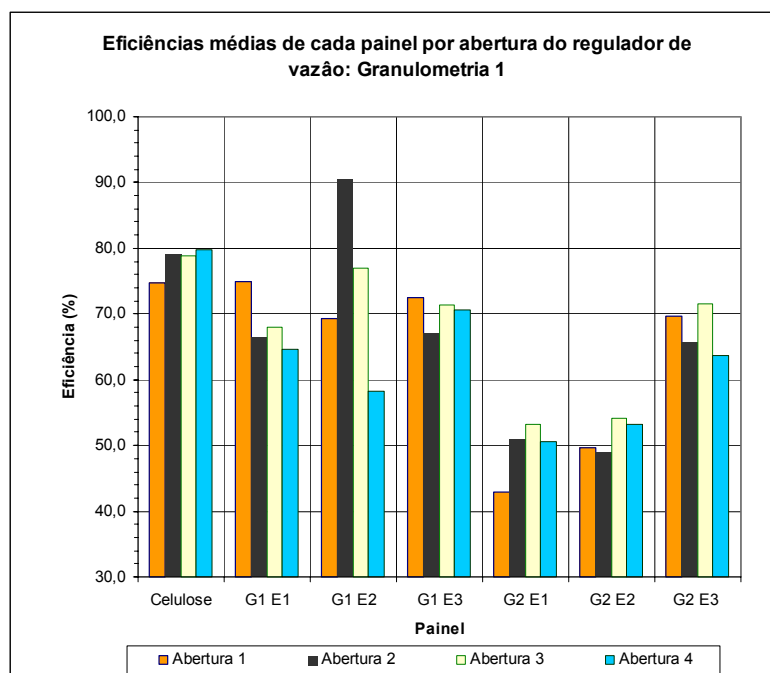


Figura 32 – Valores de eficiências médias em função das características de cada painel.

Verifica-se, também pela Figura 32, que, para todos os valores de vazão do ar obtidos dos painéis evaporativos com a granulometria 2, o tratamento que apresentou melhores valores de eficiência de resfriamento e, conseqüentemente, mais próximos aos obtidos no painel testemunha (painel de celulose) foi o painel com 10 cm de espessura.

Contudo, a Figura 32 também mostra que os painéis com granulometria 2 foram bem inferiores, em média, na eficiência de resfriamento, comparativamente aos painéis de argila expandida de granulometria 1 e aos de celulose (testemunha).

Notou-se, também, que para os conjuntos “G1 E1” e “G1 E3” apresentados no gráfico da Figura 32, isto é, para painéis com as espessuras de 6 e 10 cm, foram obtidas eficiências de resfriamento do ar entre 65 e 75%. Observou-se que, ao se utilizar o painel de espessura de 8,5 cm (G1), as eficiências alcançadas foram maiores do que aquelas obtidas com os painéis de 6,0 e 10,0 cm, sugerindo que a espessura intermediária do painel poroso é a que possibilita melhor eficiência de resfriamento do sistema. Esse resultado, possivelmente, ocorre pelo fato de que a espessura intermediária possibilita maior tempo de contato entre

o ar não saturado a ser resfriado e a água presente no painel, intensificando a evaporação da água e umedecimento do ar, ou seja, há trocas de calor e massa entre ambos, com conseqüente perda de calor de ambos. Já para o painel de maior espessura (10,0 cm), a intensidade de evaporação pode ser reduzida em razão da maior obstrução à passagem do ar. Assim, embora o tempo de contato do ar e água possa ser maior, o volume de ar a ser resfriado se reduz, alterando negativamente a eficiência do sistema, de acordo com o mencionado por Wiersma e Stott (1983), Tinôco (1988) e Watt e Brown (1997).

Quando se realizou o experimento com argila expandida na granulometria 2 (mais grossa), os resultados foram diferentes. Nesse caso, os painéis com espessura maior (10 cm), em média, apresentaram valores de eficiência de resfriamento maiores que os obtidos em painéis de 6 e 8,5 cm de espessura. Assim, infere-se que, sendo a granulometria maior, maior também é a porosidade, facilitando a passagem do ar quando comparado com as granulometrias menores. Dessa forma, para resguardar um maior contato entre o ar e a água, torna-se necessário maior espessura do painel evaporativo.

Comparativamente, o ensaio realizado com painéis de argila expandida de granulometria 1, menor, nas espessuras de 6 e 8,5 cm apresentaram valores de eficiência evaporativa (entre 70 e 80%) melhores dos que os obtidos (cerca de 50%) na granulometria 2, maior, respectivamente para as mesmas espessuras de painéis. Subentende-se que, para espessuras de painéis inferiores a 8,5 cm, granulometrias menores conferem maior eficiência de resfriamento por reterem o ar por mais tempo no painel (devido à maior resistência à sua passagem). Esse fato possibilitaria maior eficiência no sistema adiabático de troca de calor e massa entre ar e água e conseqüente resfriamento da temperatura de ambos. Esses resultados estão de acordo com Wiersma e Stott (1983).

Todos esses resultados demonstram que a eficiência de arrefecimento térmico promovida pelos sistemas de resfriamento adiabático evaporativo do ar depende da espessura do painel, bem como da granulometria da argila expandida e da vazão do ar (TINÔCO, 1996; VIGODERIS, 2002).

As interações ocorridas neste experimento estão detalhadas nas Figuras 33 e 34, as quais mostram resultados de eficiências de resfriamento adiabático evaporativo para as diferentes espessuras de painéis estudadas e o painel de celulose (testemunha).

4.1.2. Eficiência de cada painel evaporativo para distintas espessuras e velocidades do ar, com argila expandida na granulometria 1

Constata-se pela Figura 33 que, à exceção do ensaio realizado na menor velocidade do ar (abertura 1), os painéis de celulose apresentaram maior eficiência de resfriamento comparativamente aos de argila expandida de granulometria menor (6,0 cm) submetidos às maiores taxas de vazão do ar. Isso pode ser explicado pelo fato de a celulose ser um material pré-fabricado, que utiliza 100% de ar externo, sendo este ar constantemente filtrado (90% de eficiência para partículas de até 10 micra) pelo processo de lavagem contínua. Assim, o ar, ao passar pelo painel de celulose, encontra um arranjo geométrico interno constante, resultando em um caminho mais uniforme em relação ao painel de argila expandida; conseqüentemente, tem-se menor perda de carga e melhores resultados de eficiência de resfriamento, de acordo com Camargo (2003).

Quanto à espessura do painel de argila de 8,5 cm, a superioridade da celulose sobre a argila, em termos de eficiência de resfriamento, ocorreu para as vazões 1, 3 e 4. Para a vazão 2, o painel de argila expandida conferiu maior eficiência de arrefecimento térmico, comparativamente à celulose e a todos os demais tratamentos. Infere-se mais uma vez que a explicação para esse fato tem uma relação direta com o tempo de contato do ar com a água do painel, bem como com a vazão do ar a ser admitido por intervalo de tempo no sistema. Esses resultados estão de acordo com os de Wiersma e Stott (1983).

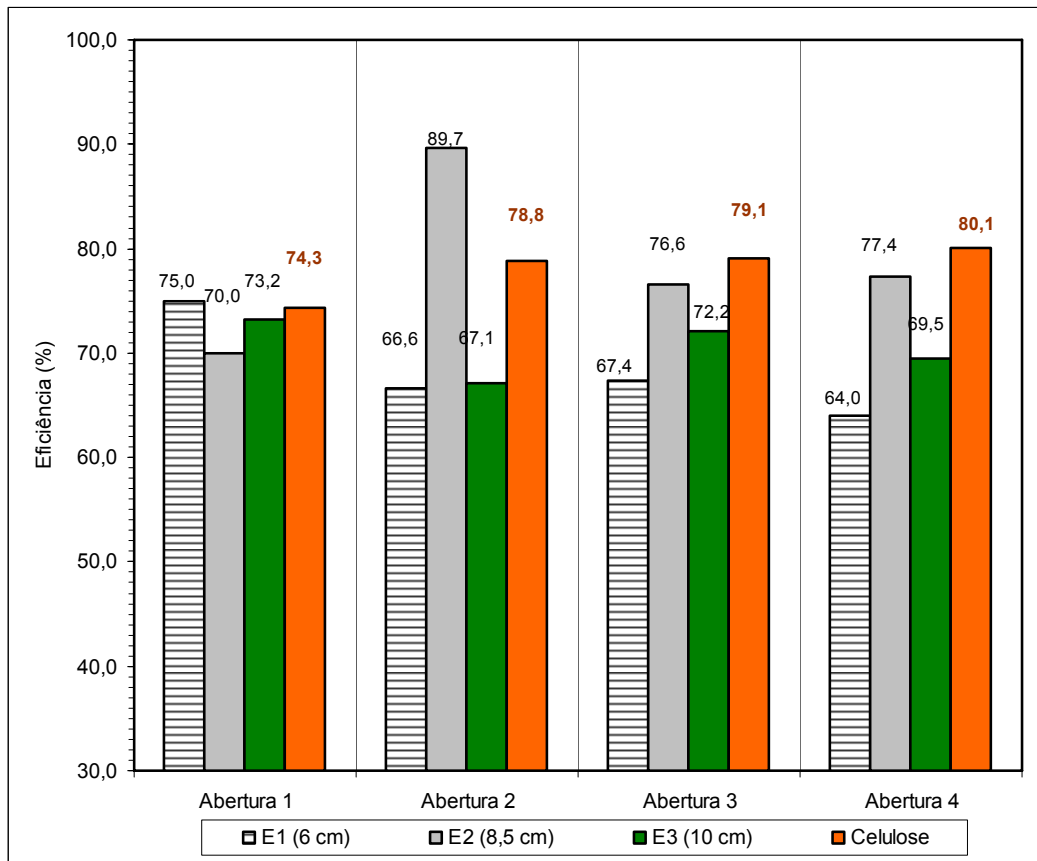


Figura 33 – Valores de eficiência para as espessuras de 6,0, 8,5 e 10,0 cm, a cada abertura do regulador de vazão – granulometria 1.

4.1.3. Eficiência de cada painel evaporativo para distintas espessuras e velocidades do ar, com argila expandida na granulometria 2

A Figura 34 mostra a diferença entre as eficiências dos painéis de cinasita, por granulometria, a cada abertura do regulador de vazão.

Em relação à Figura 33, a Figura 34 mostra que, na troca da granulometria 1 para a 2, há, para uma mesma vazão de ar, uma média de eficiência de resfriamento menor das placas de cinasita. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que granulometrias maiores facilitam o fluxo do ar através dos painéis e possibilitam maior contato entre o ar e água, facilitando, assim, a troca de calor e massa entre ambos, com conseqüente perda de calor de ambos e melhoria na eficiência de resfriamento.

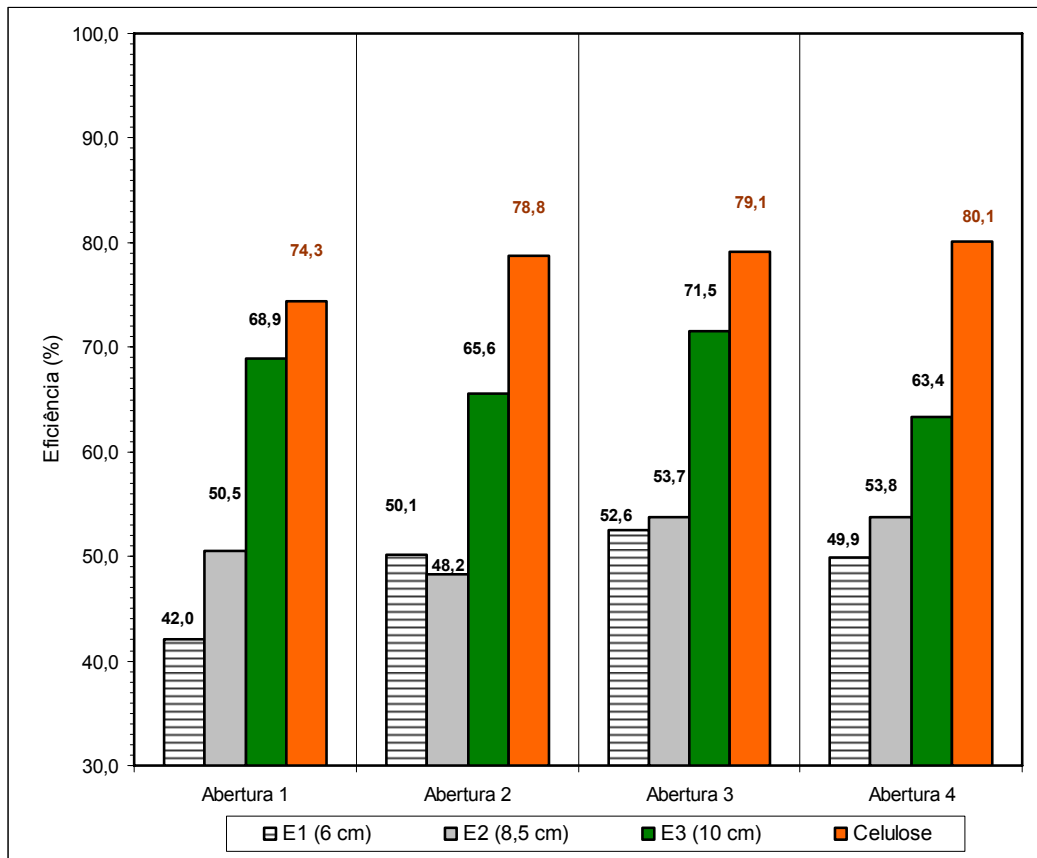


Figura 34 – Valores de eficiência para as espessuras de 6,0, 8,5 e 10,0 cm, a cada abertura do regulador de vazão – granulometria 2.

Na Figura 35 é mostrado um gráfico da relação da eficiência média de cada conjunto (granulometria + espessura) da argila expandida em relação à eficiência do painel de celulose, deixando clara a vantagem dos painéis confeccionados com cinasita de granulometria 1 sobre os confeccionados com argila de granulometria 2. Nessa figura também se observa que as eficiências mais próximas ao painel de celulose são oriundas dos painéis com cinasita de granulometria 1, o que demonstra os melhores resultados para espessuras de painel de 8,5 cm. Valores de espessura maiores ou menores que 8,5 cm prejudicam a eficiência de resfriamento de painéis com granulometria 1.

A Figura 35 mostra que, para o caso dos painéis de cinasita com granulometria 2, a eficiência máxima deve ser conseguida com espessuras superiores a 10,0 cm, considerando que a curva de granulometria 2 mostra a ascensão das eficiências à medida que se aumenta a espessura.

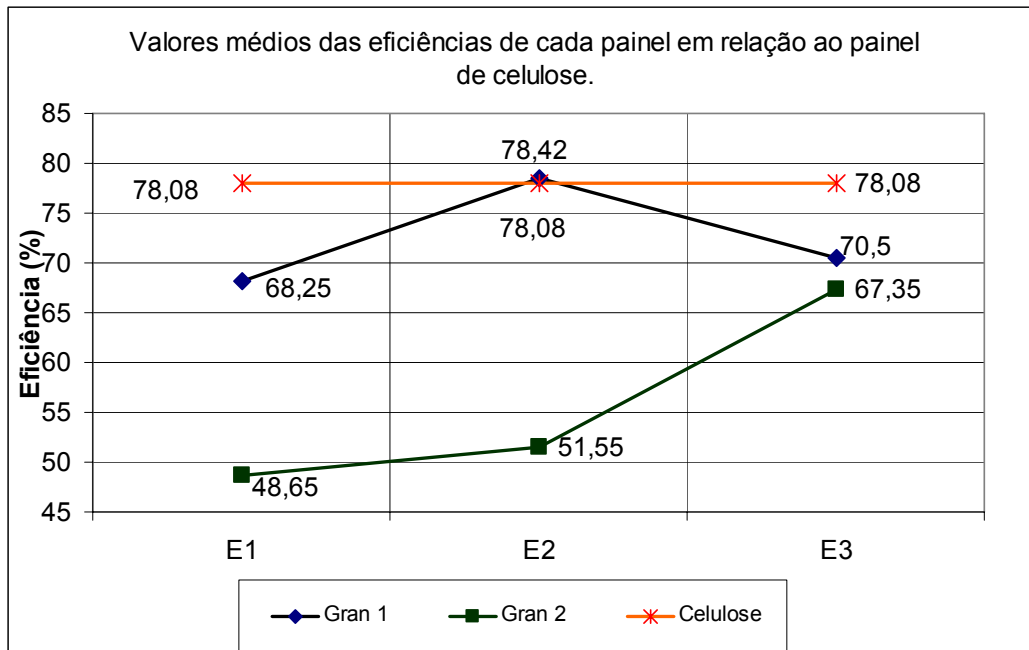


Figura 35 – Gráfico dos valores médios das eficiências de cada painel nas diversas vazões, em relação ao painel de celulose.

4.2. Avaliação estatística dos painéis de argila expandida

Os valores médios de velocidade média do ar próximo ao painel, vazão mássica do ar, pressão estática no interior do túnel e eficiência de resfriamento do ar, para os painéis de argila expandida nas granulometrias 1 e 2; e para o painel de celulose são apresentados na Tabela 1.

Pode-se observar Tabela 1 que, à medida que se aumenta a abertura do regulador de vazão, a taxa de ventilação, a vazão mássica do ar e a pressão estática são aumentadas, conforme esperado. Simultaneamente, a eficiência do conjunto diminui com o aumento destas, visto que o contato do ar com a superfície úmida ocorre mais rapidamente. Comportamento semelhante foi observado por Vigoderis (2002).

Tabela 1 – Médias de velocidade média no painel (V), vazão mássica (\dot{m}), pressão estática (Pe) e eficiência do resfriamento adiabático evaporativo (ε) para as espessuras em centímetros de 6,0, 8,5 e 10,0, para as granulometrias 1 e 2 e celulose

Espessura	Abertura	V	\dot{m}	Pe	ε
(cm)		(m/s)	(kg/s)	(Pa)	(%)
Painéis de argila expandida em granulometria 1					
6,0	1	0,62	0,92	76,2	75,0
	2	1,01	1,49	91,6	66,6
	3	1,11	1,64	96,6	67,4
	4	1,13	1,67	110,7	64,0
8,5	1	0,54	0,54	94,8	70,0
	2	0,92	0,92	119,9	89,7
	3	1,06	1,06	129,9	76,6
	4	1,09	1,09	137,4	77,4
10,0	1	0,53	0,78	101,1	73,2
	2	0,82	1,21	134,8	67,1
	3	0,91	1,42	148,7	72,2
	4	0,98	1,85	156,4	69,5
Painéis de argila expandida em granulometria 2					
6,0	1	0,59	0,87	67,9	42,0
	2	0,89	1,31	83,3	50,1
	3	1,15	1,70	87,8	52,6
	4	1,18	1,75	100,7	49,9
8,5	1	0,57	0,84	86,2	50,5
	2	0,94	1,39	109,0	48,2
	3	1,00	1,48	118,0	53,7
	4	1,13	1,67	125,0	53,8
10,0	1	0,57	0,84	86,2	50,5
	2	0,94	1,39	109,0	48,2
	3	1,00	1,48	118,0	53,7
	4	1,13	1,67	125,0	53,8
Painel de celulose					
	1	0,65	0,62	5,1	74,7
	2	0,99	1,01	7,0	79,0
	3	1,27	1,11	9,7	78,9
	4	1,35	1,13	9,8	79,7

Também foi observado que, para todos os painéis de argila expandida analisados, a pressão estática apresentou valores bem maiores, quando relacionados ao painel de celulose; isso se deve ao fato de o painel de celulose apresentar uma estrutura com desenhos geométricos cruzados e homogêneos, com aberturas sinuosas que facilitam a interação entre a água e o ar, sem, contudo, obstruir a passagem deste último. O mesmo não acontece com os painéis de argila expandida, que, por serem constituídos de grânulos soltos e de formas muito irregulares, em razão do acamamento natural do material nos próprios painéis, levam a apresentar porosidade bem menor, dificultando o fluxo de ar, o que resulta em conseqüente aumento da perda de carga. Esses resultados estão de acordo com as observações de Camargo (2003).

Considerando o interesse deste trabalho em comparar os resultados experimentais obtidos com painéis de argila expandida de várias espessuras com aqueles obtidos com painéis de celulose, foram analisadas as relações entre as médias das amostras de velocidades do ar nos painéis de argila expandida (granulometrias 1 e 2) e o painel de celulose.

Neste trabalho, foram medidas as eficiências médias dos painéis de celulose e de argila expandida com diferentes parâmetros de espessuras, granulometrias e vazões. Para comparar essas eficiências, partiu-se da hipótese de que as eficiências médias desses dois materiais são iguais. Como hipótese alternativa, admitiu-se que as médias entre eles são diferentes.

Para comparar as médias das eficiências entre os painéis, usou-se o teste t de Student em nível de significância de 5%. A Tabela 2 mostra os resultados, relacionando as espessuras e a abertura do regulador de vazão com as médias de eficiências de cinasita e de celulose.

Tabela 2 – Valores médios de eficiência dos painéis de cinasita e de celulose por abertura do regulador de vazão e espessura – valores de t calculados pelo teste t de Student

Granulometria	Abertura	Espessura	Eficiência cinasita	Eficiência Celulose	t _{calc}
		(cm)	(%)	(%)	
1	1	6,0	75	74,7	0,09
		8,5	69,9	74,7	-1,38
		10,0	73	74,7	-0,39
	2	6,0	66,6	79	-6,89*
		8,5	89,3	79	2,38
		10,0	67,1	79	-1,47
	3	6,0	67,4	78,9	-8,29*
		8,5	76,5	78,9	-0,92
		10,0	72,2	78,9	-3,70*
	4	6,0	64	79,7	-5,12*
		8,5	77,5	79,7	-1,00
		10,0	69,7	79,7	-3,98*
2	1	6,0	42	74,7	-9,60*
		8,5	50,7	74,7	-8,42*
		10,0	74,7	74,7	0
	2	6,0	50,1	79	-17,31*
		8,5	48,3	79	-9,78*
		10,0	78,8	79	-0,07
	3	6,0	52,6	78,9	-13,18*
		8,5	53,5	78,9	-9,40*
		10,0	79,1	78,9	0,09
	4	6,0	49,9	79,7	-5,99*
		8,5	53,8	79,7	-13,35*
		10,0	80,1	79,7	0,27

*: significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Com base na Tabela 2 pode-se observar que:

- Na primeira abertura do regulador de vazão (menor velocidade do ar estudada para esse caso), na argila expandida com granulometria 1 e nas três espessuras analisadas, aceita-se a hipótese nula, ou seja, há evidências de que as eficiências são iguais às do painel de celulose; já para os painéis com argila de granulometria 2, apenas aquele com a espessura de 10 cm foi igual.

- Nas segunda, terceira e quarta aberturas os resultados foram similares, isto é, os painéis de cinasita com granulometria 1 apresentaram evidências de que as eficiências médias são iguais às do painel de celulose para a espessura de 8,5 cm; já para os painéis com argila de granulometria 2, apenas com a espessura aquele de 10 cm foi igual.

4.3. Estudo da relação entre a variação da umidade relativa do ar e a variação da sua temperatura

A partir das equações ajustadas da Tabela 3, obtiveram-se curvas da relação entre a variação da umidade relativa e a da temperatura do ar; essas equações estão representadas graficamente na Figura 36.

Pelos coeficientes angulares dos modelos apresentados na Tabela 3 pode-se concluir que aqueles com maior módulo correspondem a uma maior variação de umidade relativa do ar em relação à variação de temperatura do ar. Assim, para o painel com espessura de 6,0 cm e granulometria 1, a cada 1,0 °C de temperatura reduzida, a umidade relativa do ar aumenta em 4,09%. Para o painel com espessura de 8,5 cm e granulometria 1, a cada 1,0 °C de redução da temperatura, a umidade relativa do ar aumenta em 6,42%, e assim sucessivamente para os outros painéis.

Tabela 3 – Equações de regressão ajustadas para a variação da umidade relativa do ar em função da variação da temperatura, para cada conjunto (espessura e granulometria)

Conjunto	Equação ajustada	R ²
G1 E1	$\Delta U = - 4,09* \Delta t + 6,23$	0,96
G1 E2	$\Delta U = - 6,42* \Delta t - 0,55$	0,92
G1 E3	$\Delta U = - 6,99* \Delta t - 0,76$	0,99
G2 E1	$\Delta U = - 1,79* \Delta t + 13,00$	0,89
G2 E2	$\Delta U = - 6,08* \Delta t + 2,30$	0,88
G2 E3	$\Delta U = - 3,10* \Delta t + 10,19$	0,73

*: significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

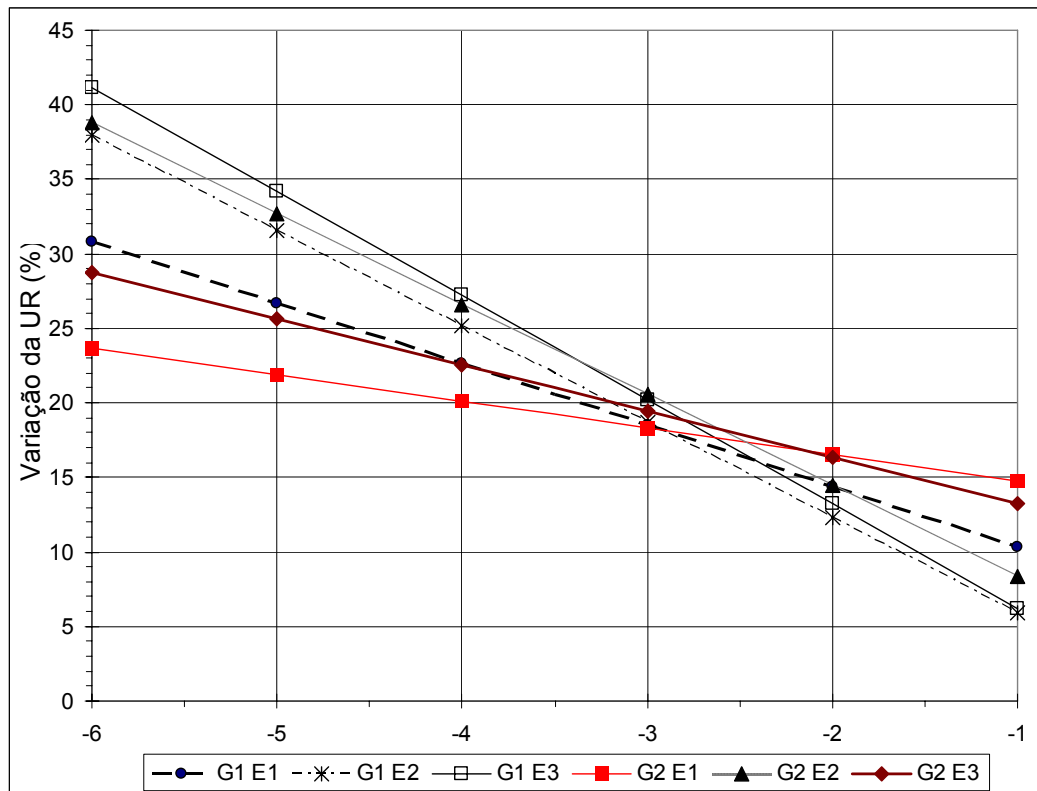


Figura 36 – Valores de variação da umidade relativa do ar do resfriamento adiabático evaporativo em função da variação da temperatura do ar.

4.4. Determinação da espessura ideal para um painel com argila expandida

Os dados médios de velocidade média do ar (V), temperatura externa média do ar (T_e), temperatura de bulbo molhado (T_u), temperatura no interior do túnel (T_i), umidade relativa do ar no exterior (UR_e) e umidade relativa no interior do túnel de vento (UR_i) encontram-se na Tabela 4 para a granulometria 1 e na Tabela 5 para a granulometria 2. Com base nesses valores, foi possível determinar as equações ajustadas por regressão linear múltipla e, conseqüentemente, a espessura ideal para o resfriamento adiabático evaporativo com painéis com argila expandida.

Tabela 4 – Valores médios de eficiência de resfriamento do ar (ϵ), espessura do painel de argila expandida (E), velocidade média do ar (V), temperatura externa média do ar (T_e), temperatura de bulbo molhado (T_u), temperatura no interior do túnel (T_i), umidade relativa do ar no exterior (U_{re}) e umidade relativa no interior do túnel (U_{ri}) – granulometria 1

ϵ	E	V	T_e	T_u	T_i	U_{re}	U_{ri}
(%)	(cm)	(m/s)	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
76,15	6	0,62	28,1	21,93	23,4	59	85
77,44	6	0,6	28,6	22,01	23,5	57	84
70,95	6	0,63	28,1	21,76	23,6	58	83
65,17	6	1,27	27	21,63	23,5	63	84
68,44	6	0,88	27,3	21,89	23,6	63	84
65,99	6	0,89	27,5	21,74	23,7	61	84
66,93	6	1,1	27,9	21,92	23,9	60	82
69,82	6	1,04	28	21,84	23,7	59	82
65,02	6	1,19	27,1	21,72	23,6	63	83
58,49	6	1,2	26,3	21,17	23,3	64	83
70,03	6	0,92	27,3	21,73	23,4	62	84
63,31	6	1,28	27	21,63	23,6	63	83
65,91	8,5	0,55	25,2	19,89	21,7	62	86
74,63	8,5	0,5	25,6	20,24	21,6	62	87
69,04	8,5	0,58	25,5	20,00	21,7	61	86
81,25	8,5	0,93	25,5	19,84	20,9	60	88
87,09	8,5	0,94	26,1	20,36	21,1	60	90
98,06	8,5	0,9	27,7	21,07	21,2	56	90
70,21	8,5	0,95	26,6	18,77	21,1	48	88
79,37	8,5	1,17	27,6	19,03	20,8	45	89
79,42	8,5	1,06	27,9	19,09	20,9	44	89
80,19	8,5	1,18	28,7	19,72	21,5	44	87
78,50	8,5	1,07	28,1	19,06	21	43	86
73,34	8,5	1	27	19,09	21,2	48	87
73,90	10	0,56	27,6	20,29	22,2	52	90
79,56	10	0,49	27,8	20,64	22,1	53	92
65,60	10	0,55	27,8	20,64	23,1	53	87
87,21	10	0,88	27,2	21,93	22,6	52	87
62,83	10	0,73	26,8	19,80	22,4	53	88
54,77	10	0,87	26,4	19,46	22,6	53	88
71,32	10	0,94	26,1	21,61	22,9	68	90
75,97	10	0,86	26,2	21,86	22,9	69	91
69,22	10	0,92	26,1	21,77	23,1	69	91
72,25	10	0,96	25,9	21,89	23	71	90
64,70	10	1,05	26	21,83	23,3	70	90
72,45	10	0,93	25,9	22,04	23,1	72	92

Tabela 5 – Valores médios de eficiência de resfriamento do ar (ϵ), espessura do painel de argila expandida (E), velocidade média do ar (V), temperatura externa média do ar (T_e), temperatura de bulbo molhado (T_u), temperatura no interior do túnel (T_i), umidade relativa do ar no exterior (UR_e) e umidade relativa no interior do túnel (UR_i) – granulometria 2

ϵ	E	V	T_e	T_u	T_i	UR_e	UR_i
(%)	(cm)	(m/s)	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
40,73	6	0,58	25,2	20,04	23,1	63	80
38,88	6	0,59	25,1	19,96	23,1	63	80
46,11	6	0,61	25,4	20,06	22,94	62	80
50,14	6	0,9	25,8	20,42	23,1	62	79
49,36	6	0,8	26,2	20,45	23,36	60	78
50,57	6	0,96	26,2	20,45	23,29	60	79
48,69	6	1,22	26,5	20,22	23,44	57	76
52,07	6	1,01	26,4	20,62	23,39	60	77
57,12	6	1,21	26,6	20,63	23,19	59	78
48,66	6	1,11	26,2	20,45	23,4	60	77
50,25	6	1,21	26,8	20,47	23,62	57	76
50,25	6	1,22	26,8	20,47	23,62	57	76
51,75	8,5	0,58	27,7	21,07	24,27	56	80
50,96	8,5	0,6	27,5	20,73	24,05	55	78
48,74	8,5	0,52	27,1	20,39	23,83	55	79
42,96	8,5	0,95	26,7	20,88	24,2	60	79
48,26	8,5	0,95	26,7	21,04	23,97	61	80
53,80	8,5	0,93	26,9	21,38	23,93	62	81
48,63	8,5	0,99	26,4	21,26	23,9	64	82
53,13	8,5	1,1	26,7	21,52	23,95	64	82
59,02	8,5	0,91	27,2	21,64	23,92	62	81
57,27	8,5	1,07	28,1	21,06	24,07	54	78
50,71	8,5	1,19	27,3	21,07	24,14	58	80
52,79	8,5	1,13	27,1	21,23	24	60	81
64,15	10	0,63	24	19,43	21,07	66	86
68,54	10	0,49	24,5	19,73	21,23	65	86
73,51	10	0,58	25,2	20,04	21,41	63	86
72,67	10	0,98	25,5	20,00	21,5	61	84
66,02	10	0,99	24,9	20,23	21,82	66	85
55,86	10	0,86	24,2	19,90	21,8	68	85
67,58	10	1,1	25,1	20,26	21,83	65	85
77,28	10	0,99	25,8	20,57	21,76	63	85
69,31	10	0,98	25,4	20,22	21,81	63	84
64,31	10	1,09	24,8	20,00	21,71	65	84
63,60	10	1,1	25	20,17	21,93	65	84
62,23	10	1,11	24,8	20,00	21,81	65	84

Na Tabela 6 são apresentadas as equações de regressão linear múltiplas da variável dependente ϵ (eficiência de resfriamento do ar) em função da espessura E, da velocidade V para as granulometrias 1 e 2, da TE (temperatura do ar externo), da TU (temperatura de bulbo molhado), TI (temperatura interna) e URi (umidade relativa interna do ar), acompanhadas pelos respectivos coeficientes de determinação.

Com base nas equações da Tabela 6, foi possível a construção de gráficos da eficiência de resfriamento do ar em função da espessura. Dessa forma, foi possível determinar a espessura do painel de cada granulometria considerada ideal para o emprego otimizado do resfriamento adiabático evaporativo através de painéis com argila expandida. As Figuras 37 e 38 mostram gráficos construídos a partir dessas equações.

Na Tabela 6, pode-se constatar que apenas os painéis de argila expandida com granulometria 1 proporcionaram equações ajustadas. Entretanto, os painéis com argila de granulometria 2 usados neste experimento foram insuficientes para determinar a espessura ideal de um painel com esse material alternativo.

Por meio das equações ajustadas apresentadas na Tabela 6 e dos gráficos das Figuras 37 e 38, determinou-se a espessura ideal dos painéis de argila expandida. O valor calculado é de aproximadamente 8,0 cm para a granulometria 1.

Tabela 6 – Equações de regressão linear múltiplas ajustadas de eficiência de resfriamento do ar em função da espessura E e velocidade V para as granulometrias 1 e 2 e respectivos coeficientes de determinação

Granulometria	Equações Ajustadas	R ²
1	$\epsilon = - 133,12 + 41,81 *E - 2,63 *E^2 + 128,54 *V - 80,77 *V^2$	0,80
2	$\epsilon = 151,48 - 32,24 *E + 2,30 *E^2 + 14,68 *V - 5,85 * V^2$	0,77

*: significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

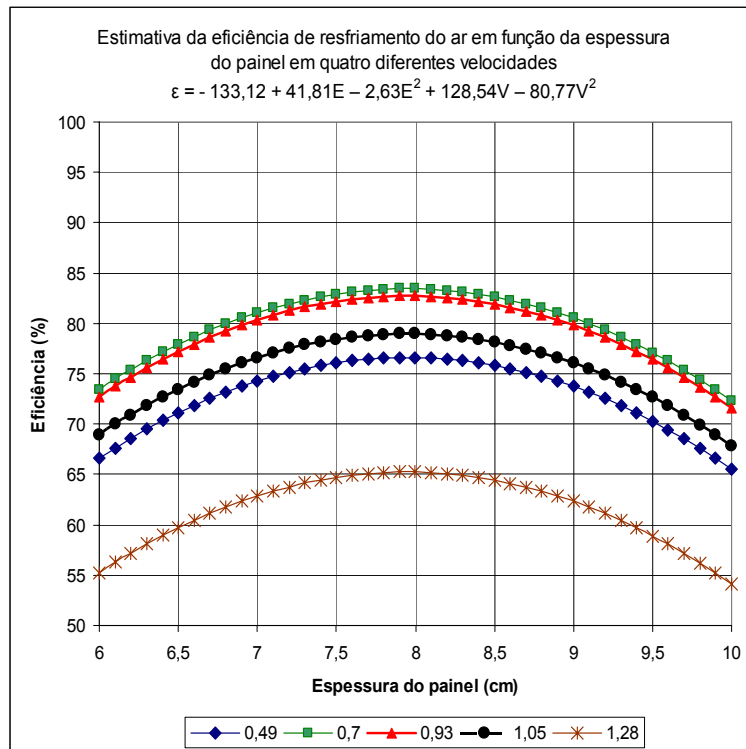


Figura 37 – Variação da eficiência de resfriamento do ar em função da espessura do painel com argila expandida (granulometria 1) para cada velocidade do ar adotada no experimento.

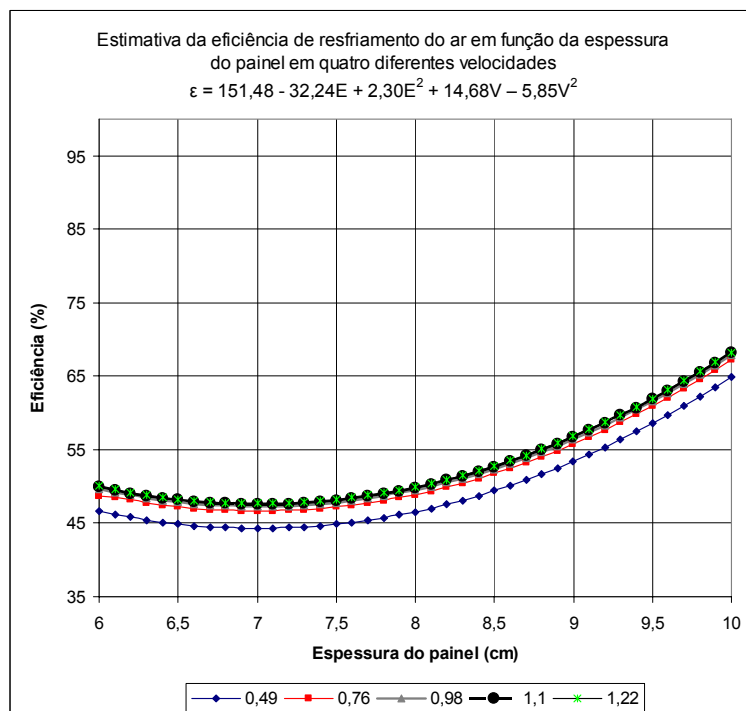


Figura 38 – Variação da eficiência de resfriamento do ar em função da espessura do painel com argila expandida (granulometria 2) para cada velocidade do ar adotada no experimento.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

1. O túnel de vento projetado e adaptado por Vigoderis (2002), com base no protótipo de Liao e Chiu (2002), mostrou-se adequado à avaliação técnica dos painéis de argila expandida para resfriamento do ar ambiente.
2. Foram encontrados melhores valores de eficiência de resfriamento do ar para os painéis evaporativos confeccionados com argila expandida na granulometria 1 (referência à brita 1) em relação a granulometria 2 (referência à brita 2), para todas as espessuras de painéis adotadas (6,0, 8,5 e 10,0 cm).
3. Todos os painéis evaporativos confeccionados em argila expandida de granulometria 1, nas espessuras de 6,0, 8,5 e 10,0 cm, mostraram resultados de eficiência de resfriamento adiabático evaporativo do ar compatíveis com os obtidos utilizando-se painéis de celulose.

4. Em se tratando dos painéis de argila expandida com granulometria 2, a melhor eficiência de resfriamento do ar foi observado no painel evaporativo de 10 cm.
5. Os painéis com argila expandida na granulometria 1 e espessura ideal calculada de 8,0 cm foram identificados como os que possibilitam melhor eficiência de resfriamento adiabático evaporativo do ar, com a velocidade do ar compreendida entre 0,49 e 1,05 m/s.
6. Para os painéis formados com argila expandida na granulometria 2, observou-se que a melhor eficiência foi encontrada no painel de 10 cm (maior espessura adotada). Dessa forma, sugerem-se experimentos para testes com espessuras na faixa acima de 9,0 cm, determinando-se, assim, a espessura adequada para essa granulometria.

REFERÊNCIAS

- ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. **A arte de controle do estresse calórico em aves**. Concórdia, Sc: Embrapa Suínos e Aves, 2000a. p.1-2. (Comunicado Técnico, 264)
- ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. **Ventilação na avicultura de corte**. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2000b. 50p.
- ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. **Resfriamento de aviário: caracterização dos sistemas de resfriamento evaporativo (adiabático)**. Embrapa Suínos e Aves, 2005. p.1-2. (Comunicado Técnico: 264)
- ALLENDE, K.A.; FREITAS, I.M.; DARWISH, F.A.I. Otimização da produção do concreto celular espumoso orgânico com adição de cinasita ou rejeito plástico e areia. In: SIMPEP, 22., 2005. **Anais...** Bauru – SP: 2005.
- ARADAS, M.E.C. **Avaliação do controle do ambiente em galpões de frango de corte criados em alta densidade**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- ARGIRIOU, A.; SANTAMOURIS, M. Natural cooling techniques. **Energy conservation in buildings**. SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. (Ed.). Athens, 1995. 183p.

- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook Applications**, SI Edition, 1995. chap.47.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook Systems and Equipment**, SI Edition, 1996. chap.19.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Fundamentals Handbook (SI)**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc., 1997. Chapter 8.
- BACCARI JUNIOR, F. **Manejo ambiental da vaca leiteira em climas quentes**. Londrina: UEL, 2001. 142p.
- BAÊTA, F.C.E.; SOUZA, C.F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1997. 246p.
- BOTTCHER, R.W.; BAUGHMAN, G.R.; GATES, R.S. Characterizing efficiency of misting systems for poultry. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.34, n.2, p.586-590, 1991.
- BRAVO, L.; ESPINOSA, C. **Arlita**. Barcelona – Espanha. Disponível em: <<http://www.cederaitana.com/habitatecologic/paneles/pon/text/arlitatxt>> . Acesso em: 18/12/2003.
- BOND, T. EL; NEUBAUER, C.F.; ITTNER, N.R. Radiation studies of painted shade materials. **Agricultural Engineering**, v.35, n.6, p.389-392, 1954.
- CAMARGO, J.R. **Análise de métodos para avaliar a viabilidade técnica de sistemas de resfriamento evaporativo aplicados ao condicionamento de ar para conforto**. 2000. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2000.
- CAMARGO, J.R.; EBINUMA, C.D.A. Mathematical model for direct and indirect evaporative cooling air conditioning systems. **Proceedings of the 9th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences**, ENCIT2002, Caxambu, MG, 2002.
- CAMARGO, J.R. **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar**. 2003. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP, 2003.

- CAMPOS, A.T.; KLOSOWSKI, E.S.; GASPARINO, E.; CAMPOS, A.T. Estudo do potencial de redução da temperatura do ar por meio do sistema de resfriamento adiabático evaporativo na região de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, n.5, p.1575-1581, 2002.
- CAROSI, G.A.B. **Resfriamento evaporativo**: estudo do potencial de sua aplicação no Brasil. 2006, 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2006.
- CASTRO, W.P.; PIMENTA, J.M.D. Modelagem e simulação de painéis evaporativos diretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 10. **Anais...** Rio de Janeiro – RJ, 2004.
- CORTEZ, L.A.B.; HONÓRIO, S.L.; MORETTI, C.L. **Resfriamento de frutas e hortaliças**. Brasília – DF: Embrapa Hortaliças, 2002. 428p.(Embrapa Informação Tecnológica, 2002).
- COSTA, E.C. **Ventilação**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 256p.
- CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A. 2004. 318p.
- CROW, L.W. Weather data related to evaporative cooling. Research Report n.2223. **ASHRAE Transactions**, v.78, n.1, p.153-164, 1972.
- CURTIS, S.E. **Environmental management in animal agriculture**. Ames: The Iowa State University Press, 1983. 409p.
- DAI, Y.J.; SUMATHY, K. Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material. **Applied Thermal Engineering**, v.22, p.1417-1430, 2002.
- DOWDY, J.A.; KARABASH, N.S. Experimental determination of heat and mass transfer coefficients in rigid impregnated cellulose evaporative media. **ASHRAE Transactions**, v.93, p.382-395, 1987.
- ESMAY, M.L. **Principles of animal environment**. 2.ed. Westport: CT Abi, 1969. 325p.
- EVANS, J.M.; SCHILLER, S. **Diseño bioambiental y arquitetura solar**. Buenos Aires: EUDEBA, 1988. 187p.
- FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico**. 7.ed. São Paulo, SP: Studio Nobel, 2003. 243p.

- GEA, M.; HOYOS, D.; IRIARTE, A.; LESINO, G. Estudio de arcilla expandida como relleno de intercambiadores para esfriamiento evaporativo. **Avances em Energia Renovables y Médio ambiente**, v.7, n.2, 2003, Argentina, p.8-37 a 8-42. Disponível em: <www.asades.org.ar/averna/7-2003/art085.pdf>. Acesso em: 18/12/2003.
- GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.
- GIVONI, B. Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. **Energy and Buildings**, v.17, p.177-179, 1991.
- GLACIER-COR CELLULOSE EVAPORATIVE COOLING PADS. **Operation and maintenance manual**. Scottsdale, Arizona, 1999. (Catálogo do fabricante)
- HAHN, G.L. Bioclimatologia e instalações zootécnicas: aspectos teóricos e aplicados. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE BIOCLIMATOLOGIA ANIMAL, 2., 1993. Jaboticabal, **Boletim H148b**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. p.132-146.
- INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e massa. 3.ed. Rio de Janeiro: LCT, 1992. 455 p.
- LEAL, P.A.M. **Avaliação energética e exérgica de um sistema gerador de processos psicrométricos**. Campinas - SP: 1997. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campinas, Campinas – SP, 1997.
- LIAO, C.M.; CHIU, K.H. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in taiwan region. **Building and Environment**, v.37, p.177-187, 2002.
- MACLAINE-CROSS, I.L.; BANKS, P.J. A general theory of wet surface heat exchangers and its application to regenerative evaporative cooling, **Journal of Heat Transfer**, v.103, p.579-285, 1981.
- MARTELLO, L.S. **Diferentes recursos de climatização e sua influência na produção de leite, na termorregulação dos animais e no investimento das instalações**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Produtividade Animal) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2002.
- MOBERG, G.P. A model for assessing the impact of behavioral stress of domestic animals. **Journal of Animal Science**, v.65, p.1228-1265, 1987.

- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C.; HUNBELE, N.F. **Estatística aplicada à engenharia**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2004. p.177-188.
- NEVILIE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Editora PINI, 1997. 828 p.
- OLIVEIRA, A.M. **Climatização por resfriamento evaporativo: estudo teórico e experimental de protótipos**. 2007. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.
- PIMENTA, J.M.D.; CASTRO, W. P. Analysis of different applications of evaporative cooling systems. **Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering**, São Paulo – SP. COBEM 2003.
- PIRES, M.F.A.; VILELA, D.; VERNEQUE, R.S.; TEODORO, R.L. Reflexos do estresse térmico no comportamento das vacas em lactação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AMBIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE LEITE, Piracicaba, 1998. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1998b. p.68-102.
- RIVERO, R. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural**. 2.ed. Porto Alegre, RS: Luzzato Editores, 1986. 240 p.
- SARTOR, V.; BAÊTA, F.C.; FERREIRA, A.S.; CECON, P.R.; TINÔCO, I.F.F. Efeito de sistemas de resfriamento evaporativo nas respostas fisiológicas de matrizes lactantes e de suas leitegadas. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.4, p.1-13, 1999.
- SARTOR, V.; BAÊTA, F.C.; LUZ, M.L.; ORLANDO, R.C. Sistemas de resfriamento evaporativo e o desempenho de frangos de corte. **Scientia Agrícola**, v.58, n.1, p.17-20, 2001.
- SARTOR, V.; BAÊTA, F.C.; TINÔCO, I.F.F.; LUZ, M.L. Efeito do resfriamento evaporativo no desempenho de suínos em fase de terminação. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.11, n.58, p.1-4, 2003.
- SILVA, C.E. **Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistema de resfriamento adiabático do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel**. 2002, 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2002.
- SILVA, J.G. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. São Paulo, SP: Artliber Editora, 2003.

- SILVA, R.G. **Introdução à bioclimatologia animal**. São Paulo: Nobel, 2000., 286p.
- SOUZA, J.C. Conforto ambiental para aves – ponto de vista do produtor (frangos de corte) In: SIMPÓSIO GOIANO DE AVICULTURA, 2.,1996, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia, GO: 1996. p.61-62.
- SZOKOLAY, S.V. Thermal comfort and passive design. In: **Advances in solar energy**, v.2, p.257-296. Plenum Press, 1985.
- TIMMONS, M.B.; BAUGHMAN G., R.A plenum concept applied to evaporative pad cooling for broiler housing. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.42, n.2, p.1877-1881, 1984.
- TINÔCO, I.F.F.; FIGUEIREDO, J.L.A.; SANTOS, R.C.; PAULA, M.O.; PUGLIESI, 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**, v.6, n.1, p.147-150, 2002.
- TINÔCO, I.F.F. Critérios para o planejamento de instalações avícolas para aves de postura. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE AMBIÊNCIA E SISTEMAS DE PRODUÇÃO AVÍCOLA. **Anais...** Concórdia, SC: 1998.
- TINÔCO, I.F.F. **Resfriamento adiabático (evaporativo) na produção de frangos de corte**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 1988.
- TINÔCO, I.F.F. **Efeito de diferentes sistemas de acondicionamento de ambiente e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, em condições de verão e outono**. 1996, 173 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 1996.
- TINÔCO, I.F.F; RESENDE, P.L. **Produção de frango de corte em alta densidade**. Viçosa, MG: CPT, 1997. 20p.(Manual CPT - Centro de Produções Técnicas)
- VAQUERO, E.G. **Projeto e construção de alojamento para animais**. Lisboa, Portugal: Litexa, 1981. 237p.
- 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.

- VINE, E. Promoting emerging energy-efficiency technologies and practices by utilities in a restructured energy industry: a report from California. **Energy**, v.27, p.317-328, 2002.
- WATSON, D.; LABS, K. **Climatic design: energy-efficient building – principles and practices**. New York: McGraw-Hill, 1983. 280p.
- WATT, J.R.; BROWN, W.K. **Evaporative air conditioning handbook**. 3rd edition. Lilburn, 1997.
- WATT, J.R. Nationwide evaporative cooling is here! **ASHRAE Trans**, v.93, parte 1, p.1237-1251, 1987.
- WEST, J.W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.86, p.2131-2144, 2003.
- WIERSMA, F.; SHORT, T.H. Evaporative cooling. In: HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. (Ed.) **Ventilation of agricultural structures**, 2.ed. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1983. p.103-108.
- WIERSMA, F.; STOTT, F.M. **Response of dairy cattle to an evaporative cooled environment**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1974. p.88-95. (Proceedings of the Livestock Environment)
- YANAGI JUNIOR, T. **Inovações tecnológicas na bioclimatologia animal visando aumento da produção animal: relação bem estar animal x clima**. 2006. Artigo em hipertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2>