

**KARINA CHACUR SCHRAML
MANUELA PAOLI FERNANDES**

**ESTUDO DA MIGRAÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA ENTRE AMBIENTES
INTERLIGADOS**

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do
Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica.

São Paulo
2003

KARINA CHACUR SCHRAML
MANUELA PAOLI FERNANDES

**ESTUDO DA MIGRAÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA ENTRE AMBIENTES
INTERLIGADOS**

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do
Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Professor Orientador:
Prof. Dr. Antonio Luís C. Mariani

Co-Orientador:
Raul Bolliger Jr

São Paulo

2003

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a ajuda e contribuição da Powermatic, que gentilmente nos cedeu os dutos utilizados no trabalho, e também agradecer aos Serviços Gerais da Escola Politécnica da USP, em especial ao Bahia, ao Ricardo e ao Valdivino, que nos ajudaram muito na construção do módulo experimental.

RESUMO

Para ambientes contíguos interligados, entre os quais a umidade absoluta da mistura ar-vapor tem valores diferentes, há fluxo de vapor d'água em sentido independente do fluxo de ar.

O objetivo deste trabalho é projetar, construir e testar um módulo de ensaio para simulação de ambientes contíguos, em que serão obtidas relações semi-empíricas características ao processo de migração de vapor, "barreiras" que se opõem ao fluxo de vapor e variações nos valores da umidade absoluta no fluxo de vapor.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.	METODOLOGIA	13
4.1	MÉTODO EXPERIMENTAL.....	13
4.2	PROJETO DO MÓDULO DE ENSAIO.....	13
4.2.1	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS	13
4.2.2	PLANEJAMENTO DE ENSAIOS	17
4.2.3	FABRICAÇÃO DA CÂMARA 2.....	18
4.3	INSTRUMENTAÇÃO.....	20
4.4	PROCEDIMENTO E APARATO EXPERIMENTAL	21
5.	DADOS MEDIDOS E RESULTADOS.....	26
5.1	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	26
5.1.1	VAZÃO DOS VAPORIZADORES	26
5.1.2	MIGRAÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA COM VELOCIDADE DO AR NULA.....	26
5.1.3	ENSAIOS COM VENTILADOR	28
5.2	VALORES MEDIDOS E RESULTADOS CALCULADOS.....	29
5.2.1	ENSAIOS DO VAPORIZADOR	30

5.2.1.1	VAPORIZADOR MENOR – ENSAIO 1	30
5.2.1.2	VAPORIZADOR MENOR – ENSAIO 2	30
5.2.1.3	VAPORIZADOR MAIOR – ENSAIO 1	31
5.2.2	ENSAIOS DE MIGRAÇÃO.....	31
5.2.2.1	ENSAIO 1	32
5.2.2.2	ENSAIO 2	32
5.2.2.3	ENSAIO 3	34
5.2.2.4	ENSAIO 4	36
5.2.2.5	ENSAIO 5	38
5.2.2.6	ENSAIO 6	40
5.2.2.7	ENSAIO 7	42
5.2.2.8	ENSAIO 8	44
5.2.2.9	ENSAIO 9	46
5.3	ANÁLISE DE RESULTADOS	48
6.	CONCLUSÕES.....	50
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS.....		55
ANEXO 1 – DESENHOS DA CÂMARA 2		56
ANEXO 2 – LISTA DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DA CÂMARA 2		62
ANEXO 3 – PLANILHAS COM DADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS		63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Módulo de ensaio.....	19
Figura 2 – Câmara 2.....	19
Figura 3 – Duto visto pela câmara 2	20
Figura 4 – Interior da câmara 1.....	22
Figura 5 – Detalhe TBS e TBU câmara 1	23
Figura 6 – Interior da câmara 2	23
Figura 7 – Cotovelo	23
Figura 8 – Tela	24
Figura 9 – Croqui do aparato experimental.....	25
Figura 10 – Carta psicrométrica	27
Figura 11 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 1.....	33
Figura 12 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 2.....	35
Figura 13 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 3.....	37
Figura 14 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 4.....	39
Figura 15 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 5.....	41
Figura 16 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 6.....	43
Figura 17 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 7.....	45
Figura 18 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 8.....	47
Figura 19 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 do ensaio 9.....	49
Figura 20 – Curva $M\omega$ x DG.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de diferença de umidade.....	9
Tabela 2 – Fatores de Conversão de unidades.....	11
Tabela 3 - Ensaios a serem realizados.....	17
Tabela 4 – Instrumentos a serem utilizados.....	20

LISTA DE SÍMBOLOS

- TBS** Temperatura de bulbo seco
- TBU** Temperatura de úmido
- DP** Ponto de orvalho
- v** Volume específico
- ω** Umidade absoluta ou específica
- UR** Umidade relativa
- h** Entalpia
- V** Velocidade do ar
- P_m** Pressão da mistura
- P_v** Pressão parcial do vapor
- P_a** Pressão parcial do ar seco
- P** Pressão parcial do gás em questão
- Vol** Volume ocupado pela mistura
- m** Massa do gás em questão
- R** Constante do gás
- T** Temperatura absoluta da mistura
- m_v** Massa de vapor d'água
- m_a** Massa de ar seco
- P_g** Pressão de saturação do vapor à mesma temperatura

- A** Área da seção transversal do duto
- K** Constante experimental correspondente à velocidade do vapor para diferença de umidade absoluta de 35 grains/lb
- C** Fator constante de transformação de ft^3 para lb
- D** Comprimento da abertura
- ΔG** ($\Delta \omega$) Diferença de umidade absoluta entre os dois ambientes
- F** Fator de diferença de umidade da tabela 1
- M_ω** Taxa de migração de umidade através de abertura
- ρ_{ar}** Densidade do ar
- Q** Vazão volumétrica
- \dot{m}** Vazão mássica
- t** Tempo

1. INTRODUÇÃO

Existem situações em que a umidade absoluta possui valores diferentes entre dois ambientes adjacentes interligados. Estes casos ocorrem na indústria, em processos em que a umidade deve ser rigidamente controlada, de forma que o sucesso ou falha do processo está intimamente ligado a esse controle, visto que pode haver migração de vapor d'água entre os dois ambientes. Os casos a seguir exemplificam estas situações.

Produção de alimentos

Diversos alimentos, tais como batatas fritas industrializadas, cereais matinais ou biscoitos, apresentam alta afinidade por água quando expostos a umidades relativas muito altas. Como no processo de manufatura esses alimentos são mantidos a altas temperaturas, seria de se esperar que a umidade neles existente fosse reduzida. Entretanto, uma vez que esses alimentos, depois de prontos, permanecem em ambiente úmido, eles acabarão, por sua vez, absorvendo vapor d'água do ar.

Apesar da qualidade do alimento não ser afetada, sua consistência muda de modo a não ficar muito apetitosa.

Fabricação de produtos farmacológicos

A presença excessiva de uma quantidade específica de umidade no processamento de medicamentos pode ser a principal causa do crescimento de culturas de certos organismos, como fungos, por exemplo. Outro problema, que pode ser aqui citado, é o fato de alguns tipos de produtos possuírem afinidade por umidade, podendo perder sua qualidade quando expostos a ambientes muito úmidos.

Indústrias Químicas

Um dos maiores problemas relativos à umidade nesse tipo de indústria é o fato de substâncias químicas formadas por grânulos muito finos, tais como talco, poderem se agregar na presença da umidade. Em adição a esse inconveniente, algumas substâncias químicas se decompõem ou reagem na presença de vapor d'água, tornando o produto final diferente do que era esperado.

Controle de Umidade em Armazéns

O controle da umidade em armazéns deve ser feito para que não seja possível a proliferação de fungos, mofo, corrosões, etc, que são indesejados no armazenamento de mercadorias.

Controle de Umidade em Salas de Operação de Máquinas

O controle da umidade é de extrema importância no que diz respeito à manutenção e equipamentos mecânicos ou elétricos. Um bom exemplo é a manutenção de sistemas de linhas telefônicas, onde milhares de dispositivos de conexão estão sujeitos a entrar em contato quando expostos a umidades excessivas, além do risco de corrosão dos pontos de contato.

Controle de Umidade em Salas de Embalagem de Equipamentos

Freqüentemente o próprio equipamento que é usado para embalar mercadorias não funciona de maneira eficiente quando o ar que está em torno dele estiver úmido. Típicos exemplos são empacotadoras de doces, medicamentos e talco.

Secagem de Produtos Orgânicos

Esse tipo de produto apresenta um alto grau de afinidade pela água, de forma que a água é absorvida por ele permanentemente, não sendo possível removê-la através de aquecimento. Assim sendo, o problema pode ser resolvido tornando o ar dos ambientes seco e frio, de tal forma que o vapor d'água não seja absorvido por esses produtos.

Secagem de Produtos Inorgânicos

A umidade nesse tipo de procedimento é mais fácil de ser controlada, pois os produtos inorgânicos podem ser desumidificados tendo o calor como agente para a secagem.

Dentro deste contexto, é necessário que existam ferramentas para a medição e estimativa das condições termo-higrométricas dos ambientes anteriormente descritos, assim como da possível migração de vapor entre eles. Assim sendo, o foco do presente trabalho é desenvolver um sistema que permita o estudo de variadas situações, nas quais existam diferenças de condição termo-higrométrica entre dois ambientes interligados e, finalmente, propor barreiras para controlar a migração de vapor d'água entre eles.

O sistema a ser desenvolvido consiste em duas câmaras experimentais interligadas, nas quais serão simuladas situações semelhantes às anteriormente descritas. Com a utilização de conceitos e equações da psicrometria, será possível caracterizar os ambientes estudados através da medição de três parâmetros independentes, no caso TBS (temperatura de bulbo seco), TBU (temperatura de bulbo úmido) ou UR (umidade relativa), mantida a pressão constante, que será aproximadamente a atmosférica.

Com isso, poder-se-á estabelecer diferentes estados termo-higrométricos em cada câmara, de modo que se possa estudar a migração de vapor d'água entre os dois ambientes contíguos.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho consistem em constatar a migração de vapor entre dois ambientes contíguos interligados cujas umidades absolutas têm valores diferentes, além de propor barreiras à migração de vapor d'água e comprovar a existência de um fluxo de vapor no sentido da maior para a menor pressão de vapor, independentemente do sentido do fluxo de ar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma importante referência bibliográfica foi o texto da Bry-Air (1995).

Uma das causas da migração de vapor d'água é a incompleta vedação oferecida pelos materiais, ou seja, estes são em sua maioria porosos até um certo grau. Entretanto este tópico não é o foco do presente estudo, que visa analisar o fluxo de vapor que ocorre da região de maior para a de menor pressão de vapor através de aberturas.

Quando se trata da instalação de um ambiente com umidade controlada, certas medidas de precaução devem ser tomadas. O controle satisfatório da umidade depende de variáveis, como, por exemplo, a freqüência de abertura de uma porta, e que devem ser estudadas para cada tipo de instalação.

Seguem as precauções a serem tomadas.

- As barreiras de vapor devem ser contínuas.
- As juntas devem estar o mais próximas e vedadas possível.
- As barreiras interiores ao ambiente devem ser colocadas somente quando o ar do ambiente tiver sido completamente seco.
- É recomendável a construção de uma antecâmara para situações em que uma porta deve ser aberta.

Outra fonte bibliográfica adotada foi o texto de Bolliger Jr e Mariani (1997). Esse texto, juntamente com o de Van Wylen, Sonntag e Borgnakke (1998) esclareceu conceitos de psicrometria e métodos de resfriamento, aquecimento, umidificação e desumidificação de ambientes.

Um ambiente é caracterizado pelas seguintes condições termo-higrométricas: temperaturas de bulbo seco e úmido, ponto de orvalho, volume específico, umidades absoluta e relativa, entalpia e pressão. Esses parâmetros, juntamente com a velocidade do ar são relevantes, por exemplo, para a determinação das condições de conforto térmico de um ambiente e das adequadas a alguns processos industriais.

O ar atmosférico é denominado na psicrometria “ar úmido”, pois é composto da mistura de ar seco e vapor d’água, de tal forma que ambos os componentes apresentam, pela lei de Dalton, a mesma temperatura e ocupam o mesmo volume. Entretanto, suas pressões e massas são distintas, sendo que a pressão da mistura é dada por:

$$P_m = P_v + P_a \quad (1)$$

Ambos os gases se comportam como gases perfeitos, podendo assim ser utilizada a equação de Clapeyron para a determinação P_v e P_a :

$$P \cdot Vol = m \cdot R \cdot T \quad (2)$$

As propriedades de mistura ar-vapor d’água são dadas em forma gráfica nas cartas psicrométricas. Estas, por sua vez, são construídas para uma dada pressão atmosférica, que é relacionada à altitude característica de um determinado local. Para definir, na carta, um estado psicrométrico, são necessárias duas outras grandezas entre as condições termo-higrométricas anteriormente relacionadas.

As temperaturas de bulbo seco e úmido, juntamente com as umidades absoluta e relativa serão de extrema importância para o presente estudo, sendo adequada uma caracterização destas.

A temperatura de bulbo seco está relacionada ao calor sensível do ar, pois a transferência de calor se dá apenas em forma de mudança de temperatura. Já a temperatura de bulbo úmido está relacionada também ao calor latente, pois parte do calor existente no ambiente que circunda a mecha é utilizado para evaporar a água desta.

A umidade absoluta ou específica de uma mistura de ar-vapor é definida como sendo a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco. Assim sendo, define-se ω pela equação abaixo:

$$\omega = m_v/m_a = 0,622 \cdot P_v/P_a \quad (3)$$

A umidade relativa é definida como sendo a relação entre a fração molar do vapor na mistura e a fração molar do vapor numa mistura saturada à mesma temperatura e pressão total. Uma expressão que relaciona UR e ω pode ser estabelecida:

$$UR = \omega \cdot P_a / 0,622 \cdot P_g \quad (4)$$

Apesar de na avaliação das condições ambientes serem utilizadas as propriedades da mistura ar-vapor, o ar seco e o vapor d'água se comportam isoladamente, atuando de forma independente. Isso faz com que exista a migração de vapor d'água no sentido decrescente das pressões de vapor, independentemente pressão da mistura.

Foram ainda estudadas equações, que podem substituir o uso da carta relacionando as variáveis psicrométricas entre si, além de dar maior exatidão aos resultados obtidos. Estas são a seguir apresentadas:

- Pressão atmosférica em função da altitude local:

$$P = 101,3250 \cdot (1 - 2,2560 \cdot 10^{-5} \cdot \text{altitude})^{5,2560} \quad (5)$$

- Pressão de vapor d'água saturado no intervalo de 0°C a 50°C:

$$P_v = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4 + C_5 \cdot T^5 + C_6 \cdot T^6 \quad (6)$$

Onde:

$$C_0 = 0,611217421$$

$$C_1 = 0,0444268992$$

$$C_2 = 1,42440863 \cdot 10^{-3}$$

$$C_3 = 2,70506969 \cdot 10^{-5}$$

$$C_4 = 2,77940283 \cdot 10^{-7}$$

$$C_5 = 2,6287086 \cdot 10^{-9}$$

$$C_6 = 1,07210619 \cdot 10^{-12}$$

- Umidade específica em função de TBS e UR

$$\omega(\text{UR}, \text{TBS}) = \frac{0,662 \cdot (\text{UR}/100) \cdot P_v(\text{TBS})}{P - (\text{UR}/100) \cdot P_v(\text{TBS})} \quad (7)$$

- Umidade específica em função de TBS e TBU

$$\omega(\text{TBU}) = \frac{0,662 \cdot P_v(\text{TBU})}{P - P_v(\text{TBU})} \quad (8a)$$

$$\omega(\text{TBS}, \text{TBU}) = \frac{(2501 - 2,3810 \cdot \text{TBU}) \cdot \omega(\text{TBU}) - (\text{TBS} - \text{TBU}) \cdot 1,0048}{2501 + 1,8050 \cdot \text{TBS} - 4,1868 \cdot \text{TBU}} \quad (8b)$$

Nas referências Bry-Air (1995) e Bolliger Jr e Mariani (1997) há uma equação que estabelece um modelo matemático para avaliar a migração de vapor entre dois ambientes contíguos interligados por abertura fixa e com umidades absolutas diferentes.

$$\frac{A * K}{C * D} * \Delta G * F = M_\omega \quad (9)$$

Onde:

- A = área da seção transversal da passagem em pés²;
- K = 300 pés/h = constante experimental correspondente à velocidade do vapor para diferença de umidade absoluta de 35 grãos/lb;

- $C = 14 \text{ pés}^3/\text{lb}$ = fator constante de transformação de pés³ para lb;
- D = Comprimento da abertura em pés;
- ΔG = diferença de umidade absoluta entre os dois ambientes em grãos/lb;
- F = Fator de diferença de umidade da tabela 1;
- M_ω = taxa de migração de umidade através de abertura, em grãos/h.

$\Delta\omega$ (grãos/lb)	$\Delta\omega$ (kg _{vapor} /kg _{ar seco})	F
35	0,0050	1,00
40	0,0057	1,11
50	0,0071	1,35
60	0,0086	1,58
70	0,0100	1,82
80	0,0114	2,05
90	0,0129	2,29
100	0,0143	2,52
110	0,0157	2,76
120	0,0171	2,99

Tabela 1 – Fator de diferença de umidade

O ambiente de referência utilizado em Bry-Air (1995) supõe que as superfícies que envolvem o espaço interno sejam de alvenaria de tijolo comum de 8 polegadas de espessura (0,20 m), sem proteção impermeabilizante e que a diferença de umidade específica externa-interna seja de 35 grãos por libra de ar seco ou seja de 5E-05 kg de vapor d'água por kg de ar seco.

Para a utilização da equação (9) no presente estudo, é conveniente que suas unidades estejam no SI. Os dados e equações propostos foram analisados e transformados para esse sistema de unidades, utilizando as equações e fatores de ASHRAE (2001), conforme segue.

Grandeza	Unidades adotadas na equação original	Unidades adotadas na nova equação	Fator Multiplicativo de Conversão
D	pés	m	0,3048
A	pés ²	m ²	0,0929
m	grãos	kg	0,0648 . 10 ⁻³
	lb	kg	0,4536
t	h	s	1/3600
C	pés ³ /lb	m ³ /kg	0,0624
K	pés/h	m/s	8,467 . 10 ⁻⁵

Tabela 2 – Fatores de Conversão de unidades

Assim sendo, pôde-se escrever equação seguir:

$$\begin{aligned}
 M_o &= \frac{\frac{A}{0,09290} * 300}{14 * \frac{D}{0,3048}} * \Delta G * \frac{453,6}{0,0648} * F \\
 &\therefore \\
 M_o &= 492142 * \frac{A}{D} * \Delta G * F \quad (10)
 \end{aligned}$$

Onde,

- $[492142] = (\text{grãos} * \text{kg}_{\text{ar seco}}) / (\text{m} * \text{kg}_{\text{ar seco}} * \text{hora})$

Entretanto, a equação (10) apresenta m_{ω} com unidade em grãos/hora, tornando-se assim necessária sua conversão para o SI. Para tanto, foi utilizada a tabela 2 novamente. Logo, tem-se a equação (11).

$$M_{\omega} = 8,86 * 10^{-3} * \frac{A}{D} * \Delta G * F \quad (11)$$

Onde,

- $[M_{\omega}] = \text{kg/s};$
- $[A] = \text{m}^2;$
- $[D] = \text{m};$
- $[\Delta G] = \text{kg/kg}.$
- $[8,86 * 10^{-3}] = \text{kg}_{\text{ar seco}} / (\text{m} * \text{s})$

Ainda do texto de Bolliger Jr e Mariani (1997) foi extraída uma equação (12), já no SI. O objetivo da dedução acima foi verificar a equivalência das equações (9) e (12).

$$M_{\omega} = V * A / 0,83 * \Delta G * F \quad (12)$$

Onde 0,83 é dado em m^3/kg e V é calculado pela equação (13) e F pela equação (14).

$$V = (27,882/D)/3600 \quad (13)$$

$$F = 164 * \Delta G + 0,18 \quad (14)$$

Substituindo-se a equação (13) em (12), chega-se à equação (15):

$$M_{\text{v}} = 9,331 \cdot 10^{-3} \cdot A/D \cdot \Delta G \cdot F \quad (15)$$

Onde,

- $[9,331 \cdot 10^{-3}] = \text{kg}_{\text{ar seco}} / (\text{m}^* \text{s})$

A diferença entre as equações (11) e (15), que é de aproximadamente 5%, pode ser explicada pela aproximação nas conversões das unidades. Portanto, utilizar-se-á, daqui por diante, as equações (12), (13) e (14) para o cálculo da migração de umidade, cujas variáveis devem ser utilizadas nas seguintes unidades:

- $[M_{\text{v}}] = \text{kg/s};$
- $[A] = \text{m}^2;$
- $[V] = \text{m/s};$
- $[D] = \text{m};$
- $[\Delta G] = \text{kg/kg}.$

Assim sendo, o comprimento da abertura pode ser relacionado à quantidade de vapor que migra entre as duas câmaras. Quando a abertura é o único obstáculo à migração de vapor d'água, a equação (5) rege o problema.

4. METODOLOGIA

4.1 Método Experimental

O método experimental do presente estudo consiste no estudo da migração de vapor através de dois ambientes representados por duas câmaras adjacentes, nas quais são criadas condições termo-higrométricas distintas, caracterizadas por diferentes valores de umidade absoluta. Estas câmaras possuem uma interligação que representa dutos de ventilação, os quais podem ser, em processos industriais, possíveis veículos de migração de vapor.

A primeira câmara tem sua umidade aumentada por meio de vaporizadores de água. Ambas as câmaras têm sua temperatura aumentada por meio de aquecedor de ar. Isso é feito para que se tenha um afastamento das condições ambientais da linha de saturação do ar. A saturação provoca condensação e prejudica a migração, como comprovado experimentalmente.

4.2 Projeto do módulo de Ensaio

4.2.1 Definição de Parâmetros

O estudo estabelece diferentes condições para os ensaios e avaliação da migração de vapor de água, que será referido apenas por vapor. Em um dos casos os ensaios são realizados sem a presença de um fluxo de ar entre as câmaras, enquanto que em outra situação existe um ventilador que provoca movimentação de ar entre as câmaras e o meio externo.

Para ensaios com ventilador, foi calculado quanto vapor é consumido pelo exaustor. Considerando-se:

- $\rho_{ar} = 1,165 \text{ kg/m}^3$;
- $Vol_{câmara\ 1} = 7,74 \text{ m}^3$;

$$m_{ar\ seco} = \rho_{ar} * Vol_{câmara\ 1} = 9 \text{ kg}_{ar\ seco} \quad (16)$$

Também adotou-se uma umidade absoluta de referência de 0,030 kg/kg, para efeitos de cálculo da vazão mássica de vapor. Além disso, a velocidade média do ar no duto do ventilador foi estimada em 1,0 m/s, o que acarreta em uma vazão volumétrica de 0,01 m³/s. Logo:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{vapor}} &= m_{\text{ar seco}} * \omega_1 * Q = 9 * 0,30 * 0,01 \\ \therefore \quad \dot{m}_{\text{vapor}} &= 3,5 * 10^{-3} \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Para o caso descrito, é necessário o uso de dois vaporizadores, para atender à vazão de vapor associada ao ar que sai pelo exaustor. Isto foi previsto, medindo-se as vazões do vaporizador. O vaporizador menor, que foi usado sozinho nos ensaios sem ventilador, apresentou uma vazão de aproximadamente 0,4 kg/h, enquanto o vaporizador maior apresentou uma vazão de aproximadamente 1,1 kg/h.

As condições ambientes são determinadas por meio de higrômetro e medidores de temperatura. Anemômetros são utilizados para a medição da velocidade do ar. As medições devem ser contínuas, sendo assim possível a observação da variação da umidade absoluta. Para tanto, medem-se as temperaturas de bulbo seco e úmido e a umidade relativa. A umidade absoluta é estabelecida a partir de equações da psicrometria.

O módulo de ensaio é composto por duas câmaras e um ventilador que opera como exaustor. A câmara 1, já existente no laboratório é feita de madeira e impermeabilizada com cola vinílica e seladora. Suas dimensões são de 2,20 m x 2,20 m x 1,60 m, e é acoplada ao ventilador. A câmara 2 é aqui projetada e seus desenhos encontram-se no anexo 1.

O projeto da câmara 2 consiste na determinação de seu volume total, na estipulação de portas e outras aberturas cabíveis, bem como de todo o estudo dos materiais necessários para a sua fabricação, que deve ser adequada à utilização nos ensaios. Além disso, a câmara poderá ser utilizada também em outros projetos, devendo ser respeitadas algumas restrições, como janelas adicionais e volume.

Para calcular o volume necessário para a câmara 2, levou-se em conta, primeiramente, o tempo de troca de todo o volume de ar da câmara, ou seja, para que se consiga fazer as medições, respeitando a restrição de regime permanente, o ar total da câmara não poderia ser trocado em um intervalo de tempo muito curto. Porém, de acordo com as especificações de um trabalho desenvolvido paralelamente a este, utilizando a mesma câmara, o volume necessário é de aproximadamente $6,00 \text{ m}^3$, de tal forma que foi apenas necessário adequar a forma da câmara ao espaço disponível no laboratório, bem como ao tamanho das chapas de madeira disponíveis no mercado. Após alguma discussão, foram definidas as dimensões da câmara como $2,20 \text{ m} \times 2,20 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$, chegando a um volume final de $5,80 \text{ m}^3$.

Adotou-se para a velocidade média do ar na passagem entre as duas câmaras o valor máximo de $1,0 \text{ m/s}$. A área da seção transversal da interligação deve ser grande o suficiente para que a sonda de medição do anemômetro, com o qual vai ser medida a velocidade do ar no duto, não influencie no escoamento de ar. A área é de $0,01 \text{ m}^2$, pois atende a esses quesitos.

A partir desses fatores, foi calculado o tempo de troca de todo o ar da câmara 2 através da equação (17).

$$Q = \text{Vol}/t = V \cdot A \quad (17)$$

Onde:

- $[Q] = \text{m}^3/\text{s};$
- $[\text{Vol}] = \text{m}^3;$
- $[t] = \text{s};$
- $[V] = \text{m/s};$
- $[A] = \text{m}^2.$

O tempo de troca apurado foi de 580 s, que é adequado para que sejam feitas as medições necessárias nas condições anteriormente apresentadas. Assim sendo, mostraram-se coerentes com os propósitos do estudo a área de 0,01 m² que havia sido estimada, bem como as dimensões propostas para a câmara.

Há ainda a necessidade de uma passagem de ar entre a câmara 2 e o ambiente externo, para que possa haver entrada de ar. Esta passagem deve ter também a área de 0,01 m² para facilitar a manutenção de regime permanente de escoamento.

O projeto do duto entre as câmaras levou em consideração o planejamento de ensaios e o tamanho e formato da câmara. Além disso, como o duto deveria ter comprimento variável, levou-se também em conta o método de aumento ou diminuição do mesmo, bem como a vedação em todos os possíveis métodos. Foi também considerada a semelhança do sistema com a realidade em ambientes industriais.

Definiu-se que, para que houvesse semelhança entre o experimento e a realidade, o duto deveria simular um duto de ar condicionado ou ventilação, que têm normalmente seção transversal retangular ou quadrada. Como a área de passagem de ar deste relatório, deveria ser de 0,01 m², o mais conveniente é que a seção do duto fosse quadrada, com aresta de 0,1 m.

Para a questão de variação do comprimento do duto, as possibilidades pensadas foram encaixe por diferentes espessuras na parede, duto único com diversas janelas que poderiam ser abertas ou fechadas e dutos múltiplos flangeados. A última alternativa foi a escolhida, sendo que entre os dutos há vedação com borracha.

Definiu-se então que o duto deveria ter a possibilidade de ter comprimentos de 0,5 m a 2,0 m de trecho reto, podendo ser ainda complementado com cotovelos em suas extremidades. Para melhor estruturação do mesmo e melhor vedação das câmaras ao seu redor, um trecho com 0,5 m de comprimento fica fixo na interligação das câmaras e os outros trechos podem ser anexados a ele. Entre o duto fixo e as paredes das câmaras foi utilizada silicone para fazer a vedação. Isso é ilustrado pela figura 3.

4.2.2 Planejamento de Ensaios

O presente tópico orienta os ensaios planejados para analisar restrições à migração de vapor. Nele é apresentada a tabela 2 com todos os experimentos cabíveis ao estudo. Os dados experimentais são analisados a partir de planilhas de cálculo que comportam os dados armazenados por computador via medição remota.

Na tabela 3, constam todos os comprimentos de dutos ensaiados e outras proposições de obstáculos, como cotovelo e tela na extremidade do duto.

Barreira adicional	Q (m^3/s)	$L = 0,50\ m$ m_∞ (kg/s)	$L = 0,70\ m$ m_∞ (kg/s)
Duto simples	0,00		
	0,01		
Com 1 cotovelo	0,00		
	0,01		
com tela	0,00		
	0,01		
Com lixa de rugosidade 1	0,00		
	0,01		
Com placa perfurada	0,00		
	0,01		

Tabela 3: Ensaios planejados

Os ensaios são realizados primeiramente com um trecho de duto reto, sendo posteriormente complementados com diferentes tipos de barreiras ao fluxo de vapor. A influência de cada uma delas é comparada à do duto reto livre. Os resultados também são avaliados em relação à velocidade do ar, sendo esta nula num primeiro momento para os ensaios com cada tipo de barreira. Num segundo momento, os ensaios são repetidos, contando, entretanto, com uma velocidade do ar de aproximadamente 1,0 m/s no duto que interliga as câmaras. Em todos os casos deve ser tomado cuidado para que as condições de medição sejam em regime permanente.

As barreiras à migração de vapor são reavaliadas ao longo da experimentação, a partir da análise parcial de resultados.

4.2.3 Fabricação da Câmara 2

Com o intuito de impedir que as medições sejam irreais, foram tomadas algumas medidas na construção da câmara, a fim de evitar que haja fluxo de vapor e/ou ar por outros lugares que não os dutos e janelas com esse fim. Assim sendo, as paredes da câmara são impermeabilizadas com cola branca vinílica e as frestas resultantes da construção são vedadas com massa poliéster. A massa poliéster tem coloração acinzentada, e pode ser visualizada na figura 2, foto tirada em etapa anterior à pintura externa da câmara 2.

A partir das considerações anteriores, foram gerados os desenhos de fabricação e a tabela de seleção de materiais que se encontram nos anexos 1 e 2. Nesses desenhos é apresentada também uma janela adicional, que só será aberta na ocasião em que o trabalho paralelo a este for iniciado.

A seguir são apresentadas as figuras 1 e 2, que ilustram o módulo de ensaio e as câmaras utilizadas, enquanto a figura 3 ilustra o duto que interliga as câmaras de ensaio.



Figura 1 – Módulo de ensaio: câmaras 1 e 2



Figura 2 - Câmara 2.



Figura 3 – Duto visto pela câmara 2.

4.3 Instrumentação

Tendo em vista os ambientes a serem estudados, já descritos anteriormente, seguem abaixo os instrumentos de medição que serão utilizados na caracterização das variáveis de interesse associadas às condições ambientes.

Grandeza	Instrumento	Faixa de Operação	Resolução
Velocidade do ar	Anemômetro de fio quente	0,2 a 20m/s	0,1m/s
Temperatura de bulbo seco	Termômetro de resistência com sonda Pt100Ω	-199,9º C a 850º C	0,1ºC
Temperatura de bulbo úmido	Termômetro de resistência com mecha com sonda tipo Pt100Ω	-199,9º C a 850º C	0,1ºC
Umidade relativa do ar	Termo-higrômetro	0°C a 60°C 10% a 95% UR	0,1°C 0,1% UR

Tabela 4 - Instrumentos a serem utilizados.

4.4 Procedimento e Aparato Experimental

Para a realização dos ensaios foi definido o procedimento experimental a seguir especificado.

- Escolher pela tabela 3 o ensaio a ser realizado.
- Instalar o obstáculo à migração de vapor especificado para o ensaio em questão, caso pertinente.
- Colocar a tampa do duto em sua extremidade na câmara 2.
- Instalar a instrumentação da tabela 4 de maneira adequada à realização dos ensaios.
- A instrumentação a ser utilizada será:

Câmara 1:

1. TBS: Termômetro de resistência
2. TBU: Termômetro de resistência com mecha de algodão embebida em água destilada, com reservatório de água destilada.

Câmara 2:

1. UR: Termo-higrômetro
2. TBS: Termômetro de resistência.

Duto entre as câmaras:

1. Var: anemômetro de fio quente.
- Conectar os instrumentos aos computadores.
 - Preparar o vaporizador, colocando água, bicarbonato de sódio e alocá-lo na câmara

- Ligar vaporizador, aquecedores e programas de recepção de dados da instrumentação de ambas as câmaras.
- Fechar a câmara 1.
- Ligar o exaustor com a válvula de controle de vazão totalmente fechada, quando pertinente.
- Aguardar até a câmara 1 chegar à condição de (TBS, TBU) que caracteriza a umidade absoluta requerida para o ensaio.
- Abrir a tampa do duto.
- Fechar a porta da câmara 2.
- Abrir a válvula de controle do exaustor, até a vazão desejada, quando pertinente.

A seguir, nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8 são ilustrados os interiores das câmaras em sua montagem experimental.



Figura 4 – Interior da câmara 1



Figura 5 – Detalhe: TBS e TBU – Câmara 1



Figura 6 – Interior da câmara 2



Figura 7 – Cotovelo



Figura 8 - Tela

O aparato utilizado foi:

- Programa de computador para aquisição e registro de dados – Lutron 101 e cabos de conexão instrumento-computador.
- Micro-computador Pentium II.
- Mocha e reservatório de água destilada para a montagem do medidor de temperatura de bulbo úmido.
- Ventilador com vazão de $45\text{m}^3/\text{min}$ e diferencial de pressão de 900 mmca.
- Barreiras para contenção de fluxo de vapor d'água entre as câmaras.
- 2 Vaporizadores, sendo o menor com potência de 550 W e o maior com 1400 W.
- 2 aquecedores de ar com potência de 1000 W.

Os equipamentos acima descritos, juntamente com a instrumentação já citada têm sua disposição esquematizada na figura 9.

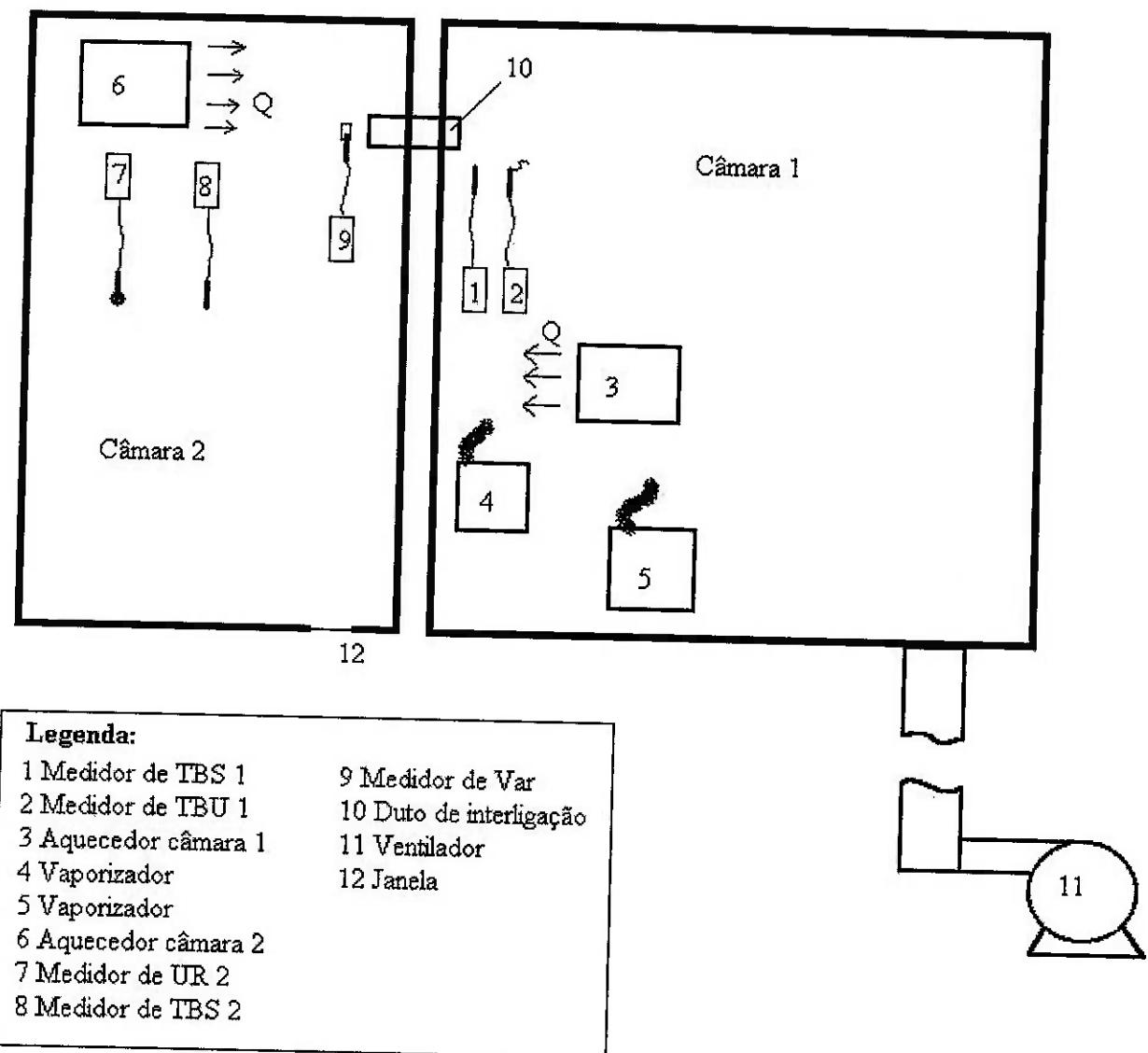


Figura 9 – Croqui do aparato experimental

5. DADOS MEDIDOS E RESULTADOS

5.1 Descrição dos Experimentos

Inicialmente, foram feitos ensaios preliminares para testar a instrumentação e o aparato experimental.

5.1.1 Vazão dos Vaporizadores

Os vaporizadores tiveram sua vazão de vapor d'água medida em função da quantidade de água consumida ou evaporada. Seu recipiente foi enchido com uma quantidade exata de água medida por meio de bêquer, e foi adicionado bicarbonato de sódio numa quantidade fixa de 5 g.

A seguir, ligava-se o vaporizador em questão e media-se, após um determinado período de tempo, a quantidade de água que havia sobrado no recipiente. A diferença corresponde ao vapor que havia sido gerado naquele intervalo de tempo. Com isso, obteve-se a vazão mássica de vapor de cada equipamento.

5.1.2 Migração de Vapor d'Água sem Velocidade do Ar Induzida

Primeiramente foram realizados ensaios visando analisar a migração de vapor d'água estabelecendo somente uma diferença de umidade absoluta entre as duas câmaras, sem velocidade induzida pelo acionamento do ventilador. Portanto, utilizou-se somente o vaporizador menor na câmara 1, sem o uso de aquecedores. Estes ensaios tiveram seus resultados invalidados devido ao fato de se atingir a condição de saturação no interior da câmara 1. Quando o ar passava pelo duto, que se encontrava em uma temperatura mais baixa, havia condensação, o que impedia o vapor de migrar. Isto é explicitado pela carta psicrométrica apresentada na figura 10.

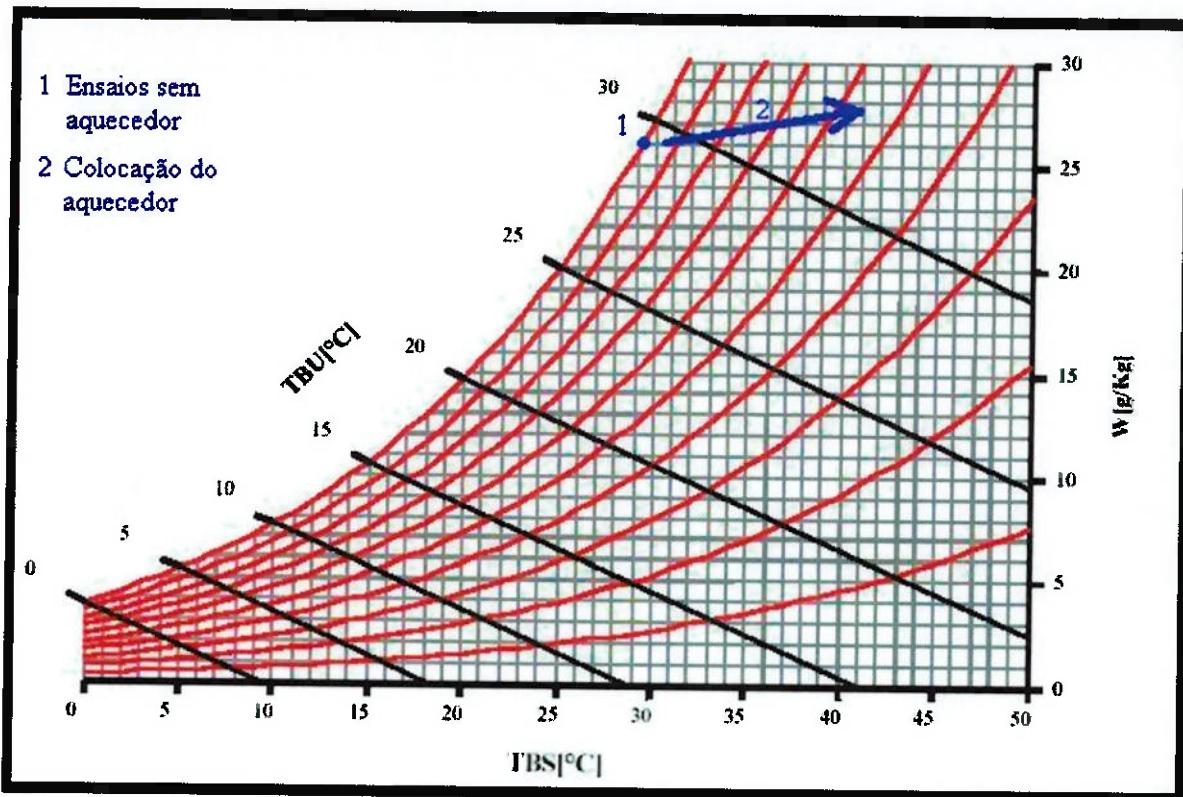


Figura 10 – Carta Psicrométrica

Na carta psicrométrica da figura 10, o ponto 1 representa um exemplo dos estados da câmara 1 ao se realizarem os primeiros ensaios. Como se pode observar, quando TBS era reduzida na passagem pelo duto, ocorria condensação, e o vapor não migrava, sem atingir a câmara 2.

Para solucionar esse problema, foram colocados aquecedores nas duas câmaras. A seta apresentada pelo número 2 na figura 10 representa o aumento de temperatura sem aumento de geração de vapor causado pelo aquecedor da câmara 1. A leve inclinação da seta se deve ao fato de uma parte do vapor, que antes era condensada nas paredes da câmara, permanecer em estado gasoso, aumentando assim a umidade absoluta do ambiente. Essa solução provoca um afastamento da condição ambiente inicial da câmara 1 da linha de saturação. A câmara 2 também foi aquecida, visando que a temperatura do ar em seu interior também subisse, para que não houvesse uma mudança brusca na temperatura da mistura ar-vapor proveniente da câmara 1, evitando desta forma que a linha de saturação fosse encontrada, ocorrendo condensação.

Solucionado o problema, foram realizados ensaios com diferentes condições iniciais e também com os obstáculos anteriormente propostos.

5.1.3 Ensaios com Ventilador

O último tipo de ensaio visou comprovar o sentido independente da migração de vapor com relação ao fluxo de ar. Para tanto, criou-se uma condição de umidade absoluta alta no interior da câmara 1, utilizando-se os dois vaporizadores especificados. No momento em que se abriu a tampa do duto, foi aberta também a válvula controladora de vazão do ar do ventilador. Essa vazão foi controlada de modo que a velocidade do ar no duto de interligação entre as câmaras não ultrapassasse 1,0 m/s, pois isso evitaria que o ar do interior das câmaras fosse trocado muito rapidamente. Imprimiram-se baixas velocidades ao ar por meio de controle de vazão do ventilador e gerou-se vapor em quantidade suficientemente grande para que fossem estabelecidas condições próximas à de regime permanente. Com isso, foi verificada a migração de vapor d'água em sentido oposto ao fluxo principal de ar seco.

5.2 Valores Medidos e Resultados Calculados

A seguir serão descritos os resultados experimentais obtidos. No item 5.2.1 são apresentados os resultados das medições de vazão dos vaporizadores, enquanto no item 5.2.2 estão os resultados dos ensaios de migração de vapor.

As condições de regime permanente são observadas nos gráficos, pois para sua construção foram considerados somente os pontos em que se observava que os aumentos das umidades absolutas das câmaras apresentavam taxas constantes.

No detalhamento dos ensaios apresentados a seguir, foram especificadas as condições iniciais bem como os resultados de taxa de migração de vapor experimentais, M_{ω} experimental, e obtidos pela equação proposta por Bry-Air (1995), M_{ω} teórico.

Os valores de ω_1 e ω_2 são calculados a partir de TBS, TBU e UR pelas equações (3), (6), (7) e (8).

Para os cálculos de M_{ω} experimental, utiliza-se a equação (18), a seguir apresentada, enquanto para M_{ω} teórico utilizam-se as equações (14) e (15).

$$M_{\omega} \text{ experimental} = (\omega_2 \text{ final} - \omega_2 \text{ inicial de regime permanente}) / \Delta t \quad (18)$$

5.2.1 Ensaios do Vaporizador

5.2.1.1 Vaporizador Menor – Ensaio 1

Condições iniciais:

$$\text{Vol água} = 1,00 \text{ L}$$

$$m_{\text{bicarbonato}} = 5 \text{ g}$$

Condições finais:

$$\Delta t = 36 \text{ min} = 2160 \text{ s}$$

$$\text{Vol água} = 0,94 \text{ L}$$

Para a medição da vazão do vaporizador pode-se utilizar a equação (17), sendo que Vol deve ser a diferença de volumes de início e fim do experimento. Portanto:

$$\text{Vol} = 1,00 - 0,94 = 0,06 \text{ L}$$

$$Q = 0,06 / 2160 = 2,78 * 10^{-5} \text{ L/s}$$

Considerando-se $\rho_{\text{água}} = 1 \text{ kg/L}$, tem-se:

$$\dot{m} = \rho * Q = 2,78 * 10^{-5} \text{ kg/s} = 0,10 \text{ kg/h}$$

5.2.1.2 Vaporizador Menor – Ensaio 2

Condições iniciais:

$$\text{Vol água} = 2,00 \text{ L}$$

$$m_{\text{bicarbonato}} = 5 \text{ g}$$

Condições finais:

$$\Delta t = 95 \text{ min} = 5700 \text{ s}$$

$$\text{Vol água} = 1,35 \text{ L}$$

Utilizando-se o mesmo princípio do ensaio 1, tem-se:

$$\text{Vol} = 2,00 - 1,35 = 0,65 \text{ L}$$

$$Q = 0,65 / 5700 = 1,14 * 10^{-4} \text{ L/s}$$

Considerando-se $\rho_{água} = 1 \text{ kg/L}$, tem-se:

$$\dot{m} = \rho * Q = 1,14 * 10^{-4} \text{ kg/s} = 0,41 \text{ kg/h}$$

5.2.1.3 Vaporizador Maior – Ensaio 1

Condições iniciais:

$$\text{Vol água} = 4,00 \text{ L}$$

$$m_{bicarbonato} = 5 \text{ g}$$

Condições finais:

$$\Delta t = 48 \text{ min} = 2880 \text{ s}$$

$$\text{Vol água} = 3,15 \text{ L}$$

Utilizando-se o mesmo princípio dos ensaios anteriores, tem-se:

$$\text{Vol} = 4,00 - 3,15 = 0,85 \text{ L}$$

$$Q = 0,85 / 2880 = 2,95 * 10^{-4} \text{ L/s}$$

Considerando-se $\rho_{água} = 1 \text{ kg/L}$, tem-se:

$$\dot{m} = \rho * Q = 2,95 * 10^{-4} \text{ kg/s} = 1,05 \text{ kg/h}$$

5.2.2 Ensaios de Migração

5.2.2.1 Ensaio 1

No ensaio 1, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado sem obstáculos à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:
 - TBS 1 = 39,2 °C;
 - TBU 1 = 32,0 °C;
 - $\omega_1 = 0,03054 \text{ kg/kg}$;

- Câmara 2:
 - TBS 2 = 36,8 °C;
 - UR 2 = 53,4 %;
 - $\omega_2 = 0,02311 \text{ kg/kg}$;

$\Delta G = 0,00743 \text{ kg/kg}$.

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega} \text{ experimental} = 2,150768 \times 10^{-6} \text{ kg/kg}$$

$$M_{\omega} \text{ teórico} = 1,71507628 \times 10^{-6} \text{ kg/kg}$$

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 11.

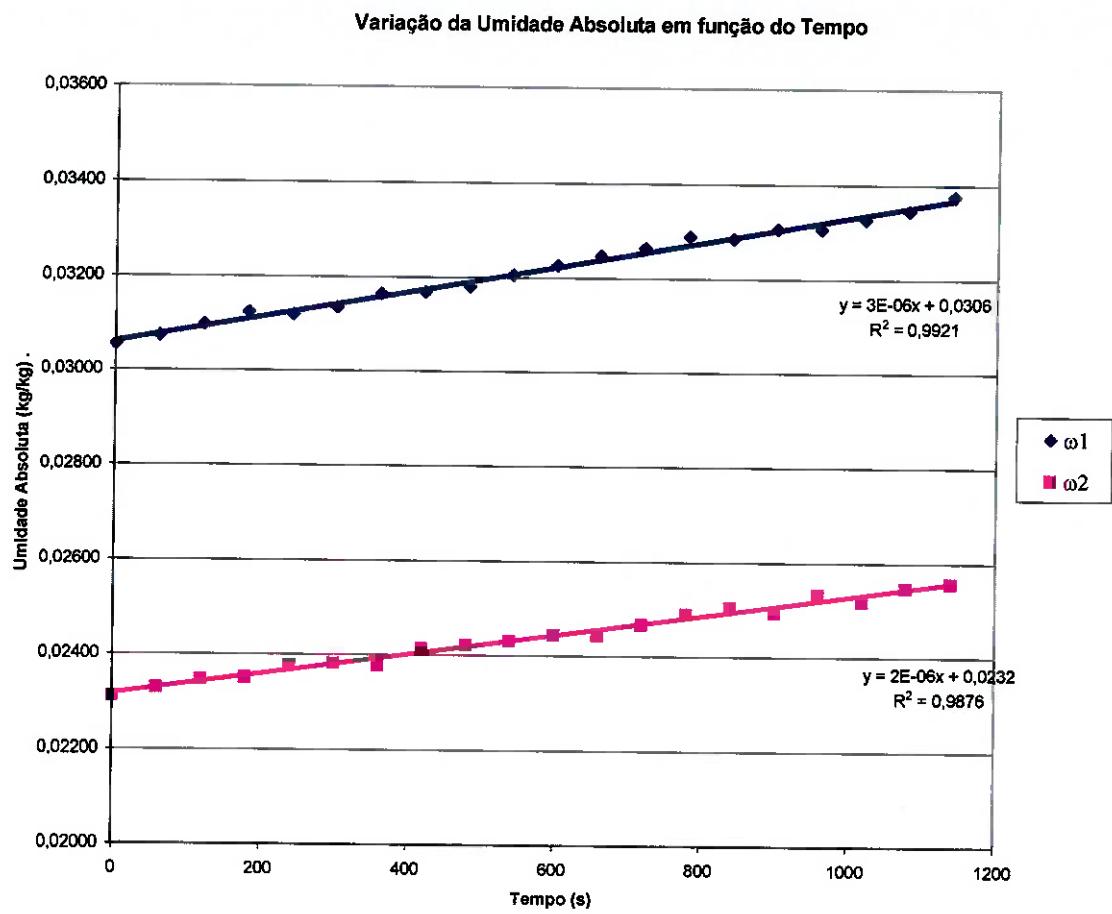


Figura 11 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 1.

5.2.2.2 Ensaio 2

No ensaio 2, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado sem obstáculos à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:
 - TBS 1 = 38,1 °C;
 - TBU 1 = 33,0 °C;
 - $\omega_1 = 0,03350 \text{ kg/kg}$;
- Câmara 2:
 - TBS 2 = 36,1 °C;
 - UR 2 = 56,3 %;
 - $\omega_2 = 0,02346 \text{ kg/kg}$;

$$\Delta G = 0,01005 \text{ kg/kg.}$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega} \text{ experimental} = 2,177947 \times 10^{-6} \text{ kg/kg}$$

$$M_{\omega} \text{ teórico} = 3,123822 \times 10^{-6} \text{ kg/kg}$$

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 12.

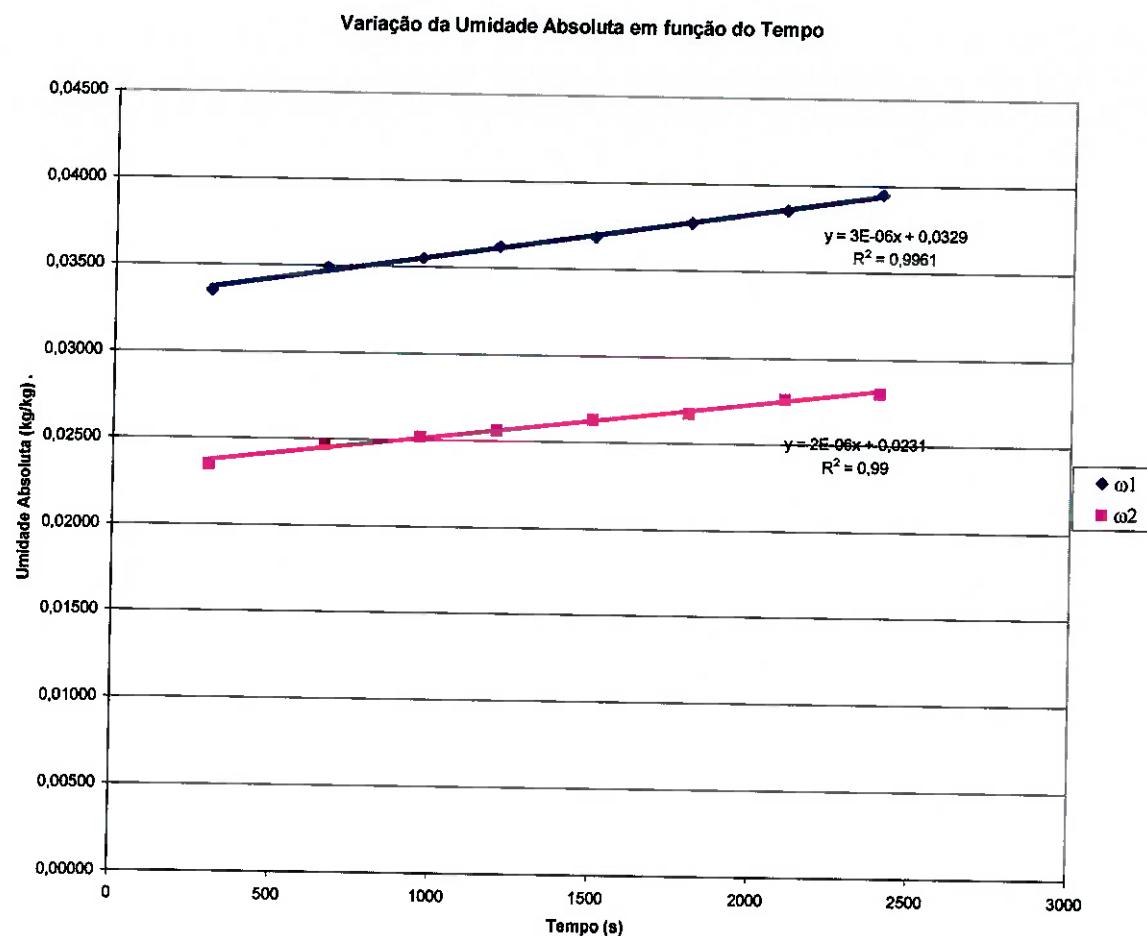


Figura 12 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 2.

5.2.2.3 Ensaio 3

No ensaio 3, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado sem obstáculos à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

$$TBS\ 1 = 34,2\ ^\circ C;$$

$$TBU\ 1 = 29,6\ ^\circ C;$$

$$\omega_1 = 0,02718\ kg/kg;$$

- Câmara 2:

$$TBS\ 2 = 32,2\ ^\circ C;$$

$$UR\ 2 = 62,4\ %;$$

$$\omega_2 = 0,02084\ kg/kg;$$

$$\Delta G = 0,00633\ kg/kg.$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega} \text{ experimental} = 1,971466 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

$$M_{\omega} \text{ teórico} = 1,249522 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 13.

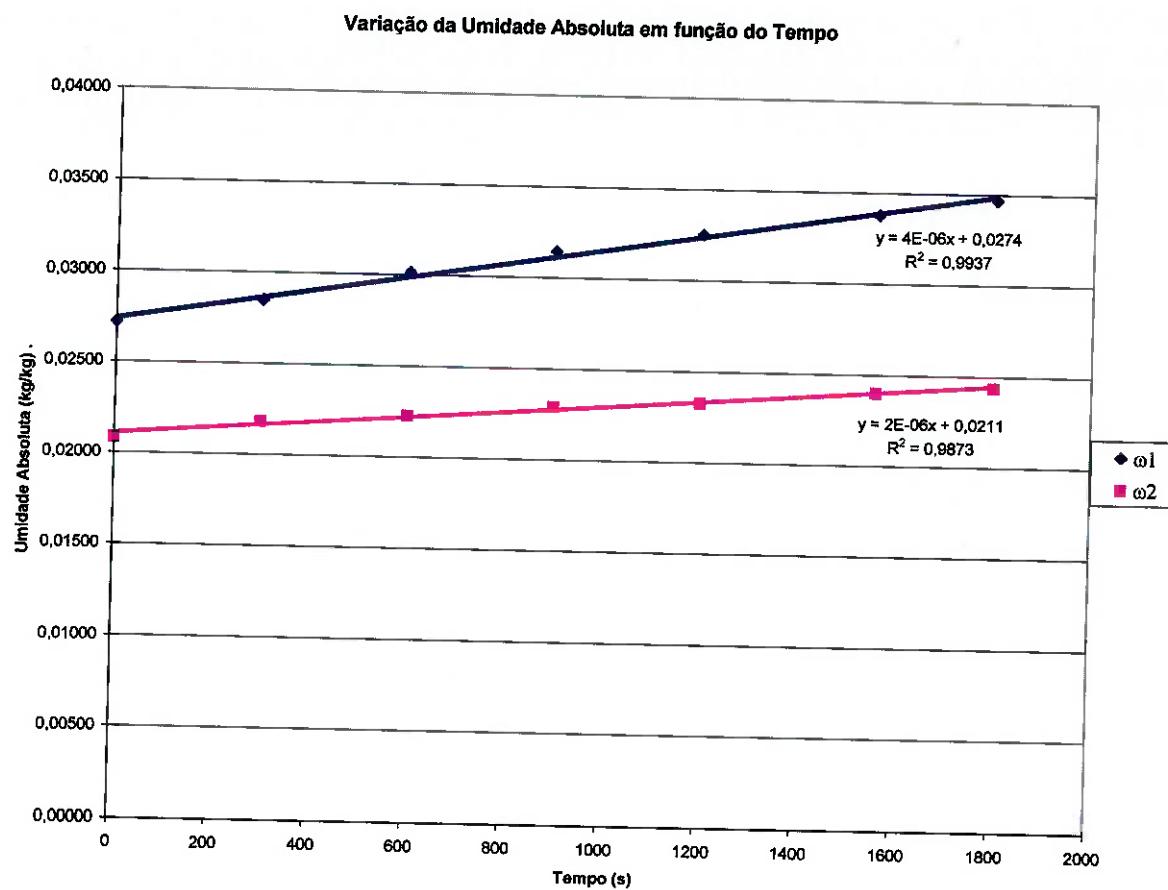


Figura 13 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 3.

5.2.2.4 Ensaio 4

No ensaio 4, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado sem obstáculos à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

$$TBS\ 1 = 39,5\ ^\circ C;$$

$$TBU\ 1 = 35,1\ ^\circ C;$$

$$\omega_1 = 0,03852\ kg/kg;$$

- Câmara 2:

$$TBS\ 2 = 36,8\ ^\circ C;$$

$$UR\ 2 = 47,0\ %;$$

$$\omega_2 = 0,02025\ kg/kg;$$

$$\Delta G = 0,01827\ kg/kg.$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega\ experimental} = 2,557689 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

$$M_{\omega\ teórico} = 1,027881 \times 10^{-5}\ kg/kg$$

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 14.

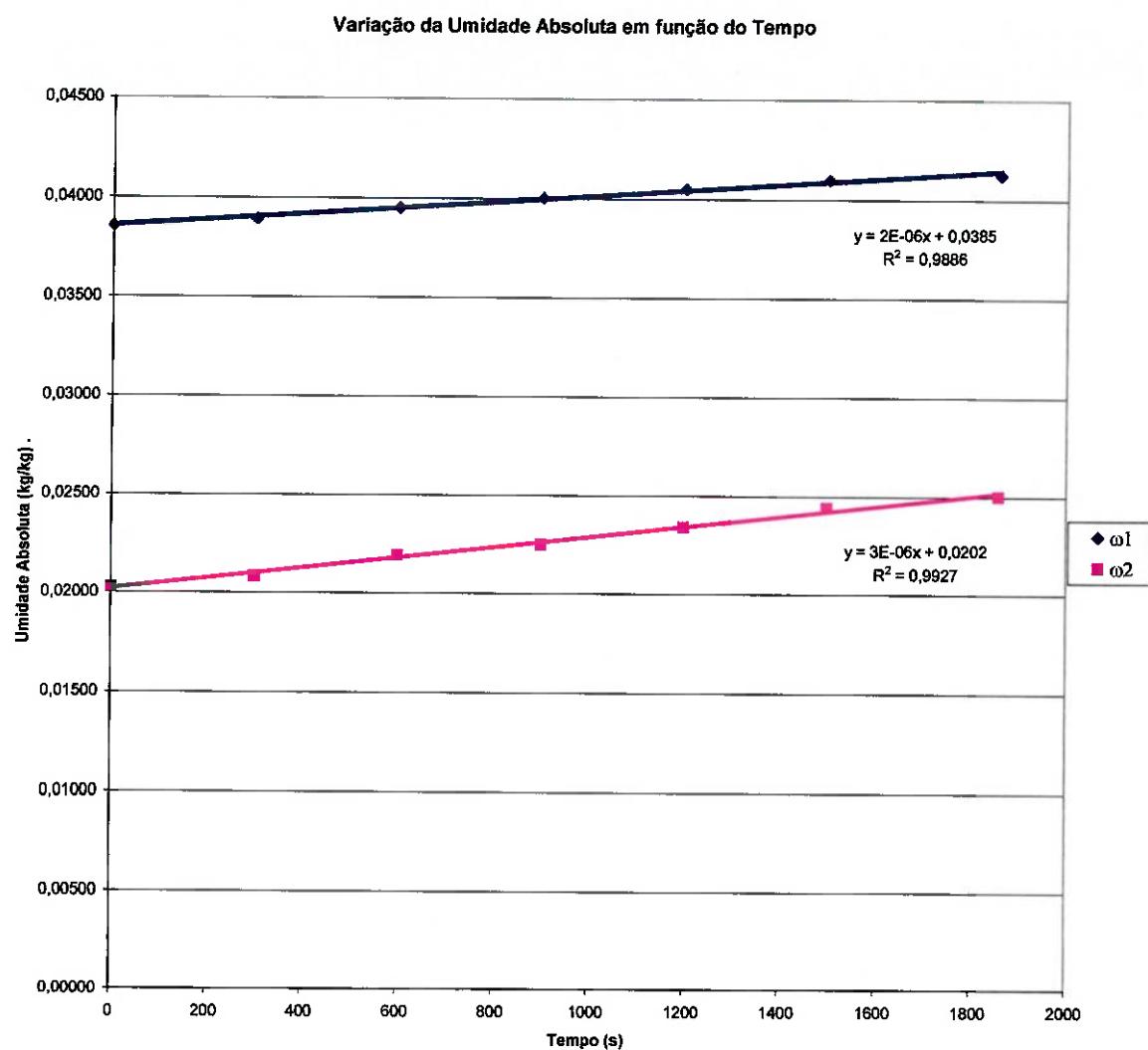


Figura 14 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 4.

5.2.2.5 Ensaio 5

No ensaio 5, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado com uma tela de malha fina como obstáculo à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

$$TBS\ 1 = 38,3\ ^\circ C;$$

$$TBU\ 1 = 32,7\ ^\circ C;$$

$$\omega_1 = 0,03266\ kg/kg;$$

- Câmara 2:

$$TBS\ 2 = 37,1\ ^\circ C;$$

$$UR\ 2 = 49,5\ %;$$

$$\omega_2 = 0,02172\ kg/kg;$$

$$\Delta G = 0,00813\ kg/kg.$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_\omega \text{ experimental} = 1,749097 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

$$M_\omega \text{ teórico} = 3,695767 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

O valor de M_ω teórico foi determinado para o presente ensaio utilizando-se a equação (15), embora esta não tenha sido proposta para casos em que, na interligação entre os ambientes, haja presença de telas.

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 15.

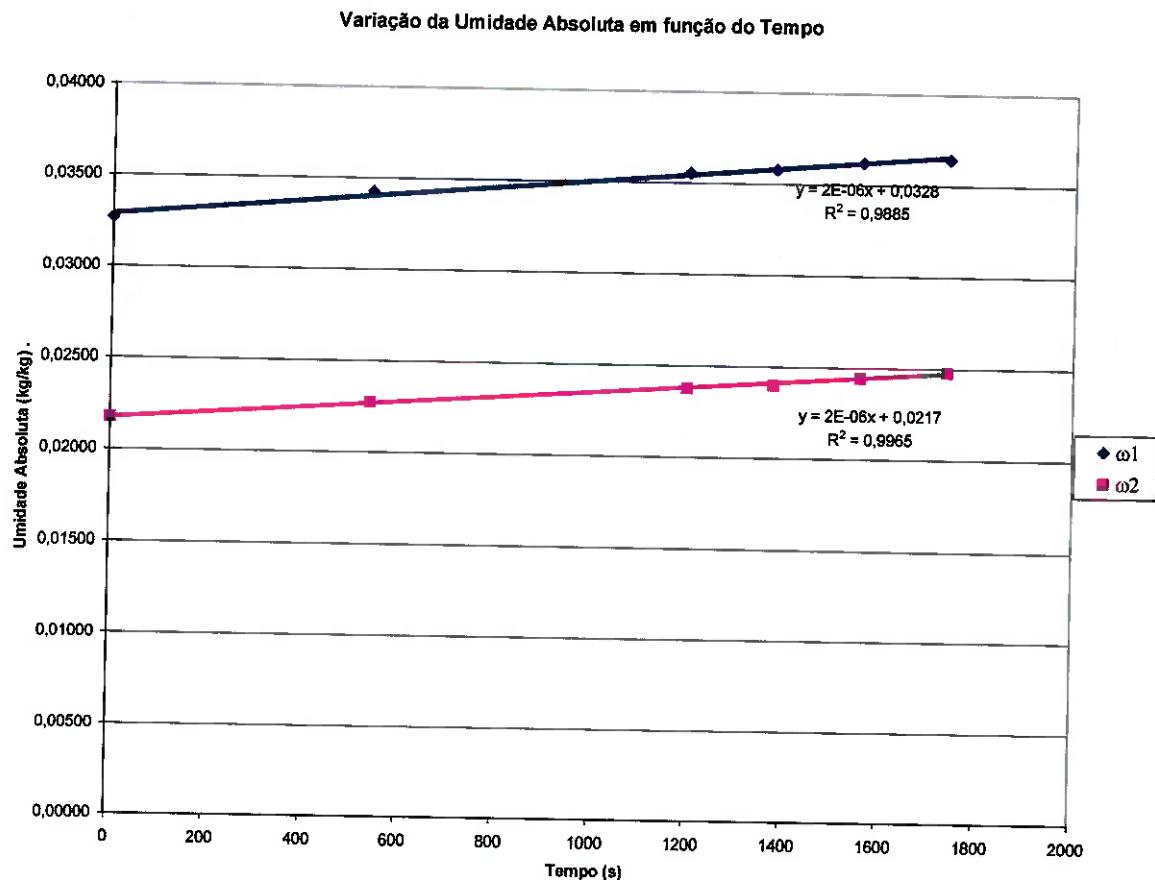


Figura 15 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 5.

5.2.2.6 Ensaio 6

No ensaio 6, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado com uma tela de malha fina como obstáculo à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

$$TBS\ 1 = 41,0\ ^\circ C;$$

$$TBU\ 1 = 36,4\ ^\circ C;$$

$$\omega_1 = 0,04163\ kg/kg;$$

- Câmara 2:

$$TBS\ 2 = 37,6\ ^\circ C;$$

$$UR\ 2 = 48,7\ %;$$

$$\omega_2 = 0,02197\ kg/kg;$$

$$\Delta G = 0,01965\ kg/kg.$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega\ experimental} = 1,871132 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

$$M_{\omega\ teórico} = 1,188979 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

O valor de $M_{\omega\ teórico}$ foi determinado para o presente ensaio utilizando-se a equação (15), embora esta não tenha sido proposta para casos em que, na interligação entre os ambientes, haja presença de telas.

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 16.

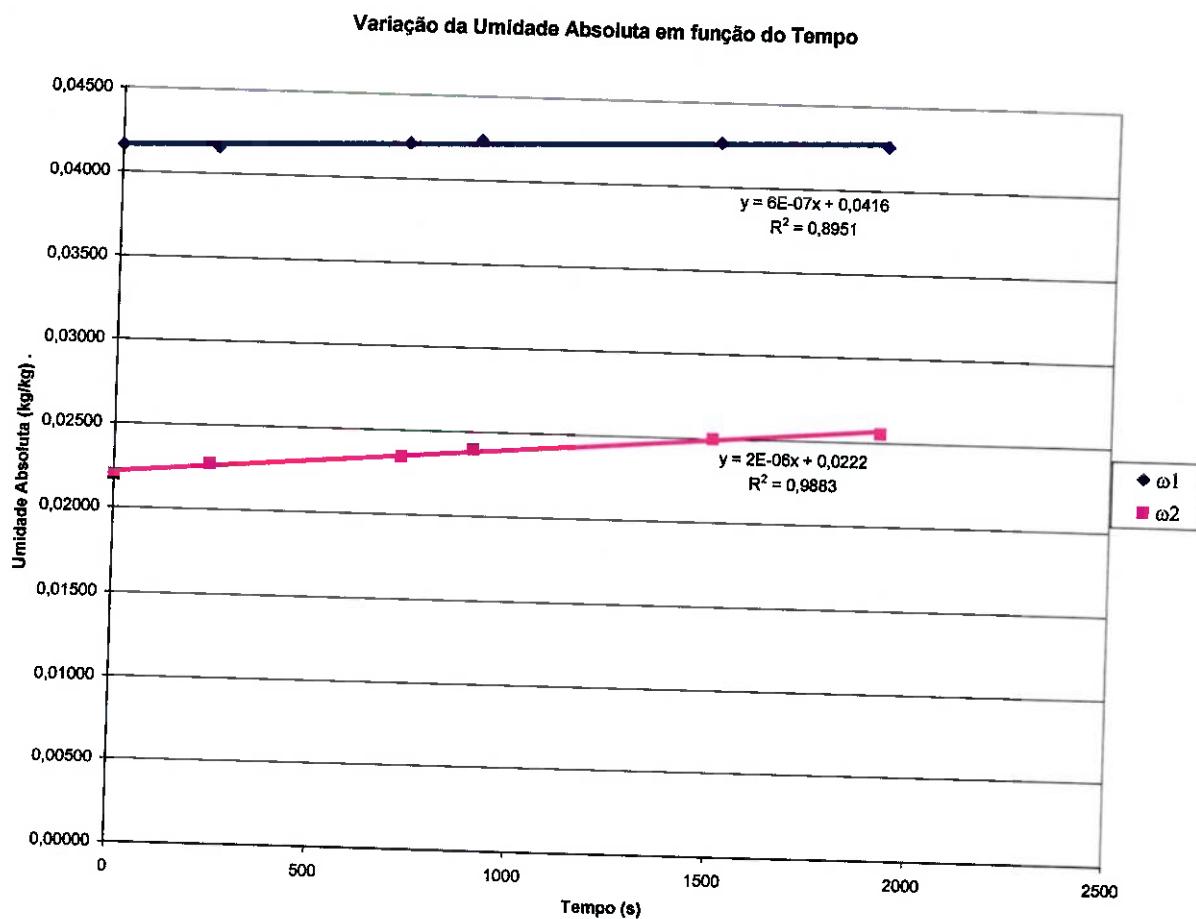


Figura 16 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 6.

5.2.2.7 Ensaio 7

No ensaio 7, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado com uma tela de malha fina como obstáculo à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

$$TBS\ 1 = 41,5\ ^\circ C;$$

$$TBU\ 1 = 36,8\ ^\circ C;$$

$$\omega_1 = 0,04261\ kg/kg;$$

- Câmara 2:

$$TBS\ 2 = 38,0\ ^\circ C;$$

$$UR\ 2 = 47,6\ %;$$

$$\omega_2 = 0,02194\ kg/kg;$$

$$\Delta G = 0,02067\ kg/kg.$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_\omega \text{ experimental} = 1,922970 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

$$M_\omega \text{ teórico} = 1,314298 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

O valor de M_ω teórico foi determinado para o presente ensaio utilizando-se a equação (15), embora esta não tenha sido proposta para casos em que, na interligação entre os ambientes, haja presença de telas.

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 17.

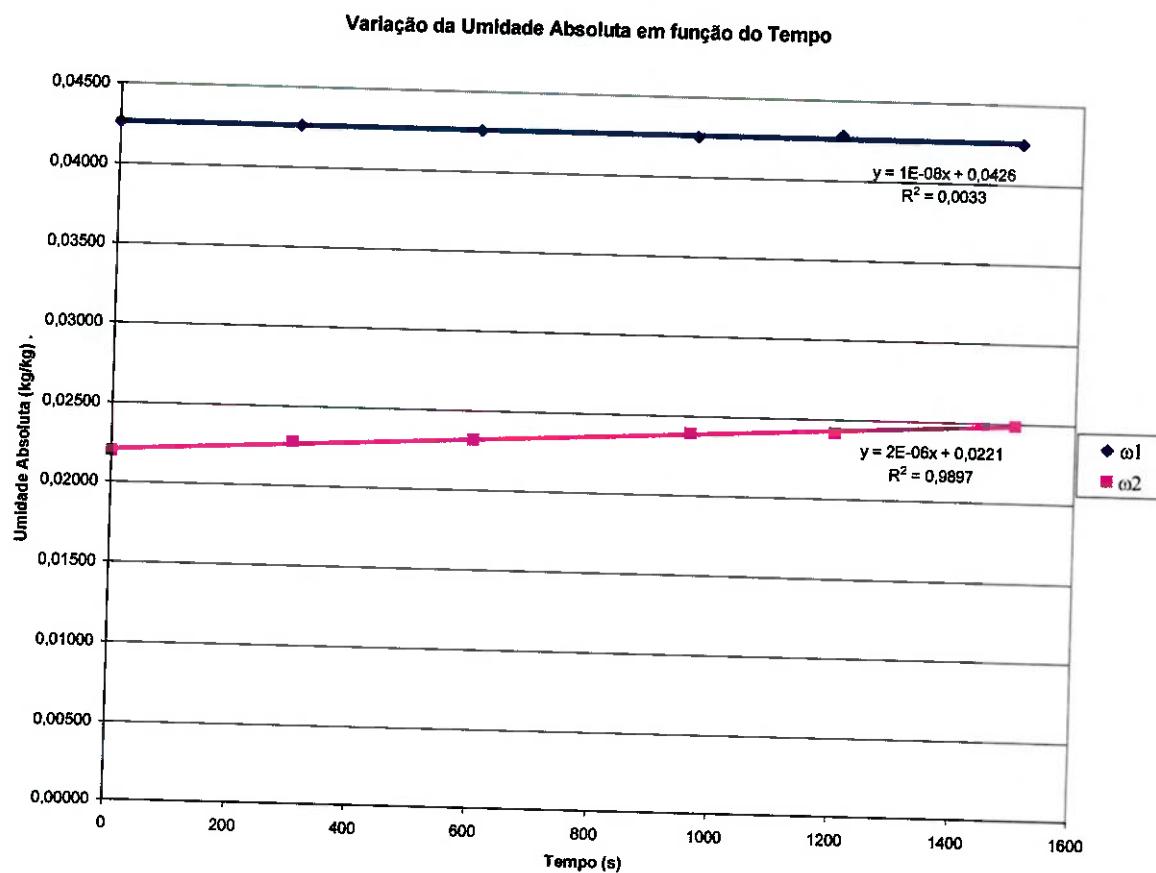


Figura 17 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 7.

5.2.2.8 Ensaio 8

No ensaio 8, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado com um cotovelo como obstáculo à migração de vapor.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

TBS 1 = 39,2 °C;

TBU 1 = 31,9 °C;

$\omega_1 = 0,03029 \text{ kg/kg}$;

- Câmara 2:

TBS 2 = 35,3 °C;

UR 2 = 56,8 %;

$\omega_2 = 0,02262 \text{ kg/kg}$;

$\Delta G = 0,00768 \text{ kg/kg}$.

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega} \text{ experimental} = 2,555635 \times 10^{-6} \text{ kg/kg}$$

$$M_{\omega} \text{ teórico} = 1,829580 \times 10^{-6} \text{ kg/kg}$$

O valor de M_{ω} teórico foi determinado para o presente ensaio utilizando-se a equação (15), embora esta não tenha sido proposta para casos em que, na interligação entre os ambientes, haja presença de cotovelos.

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 18.

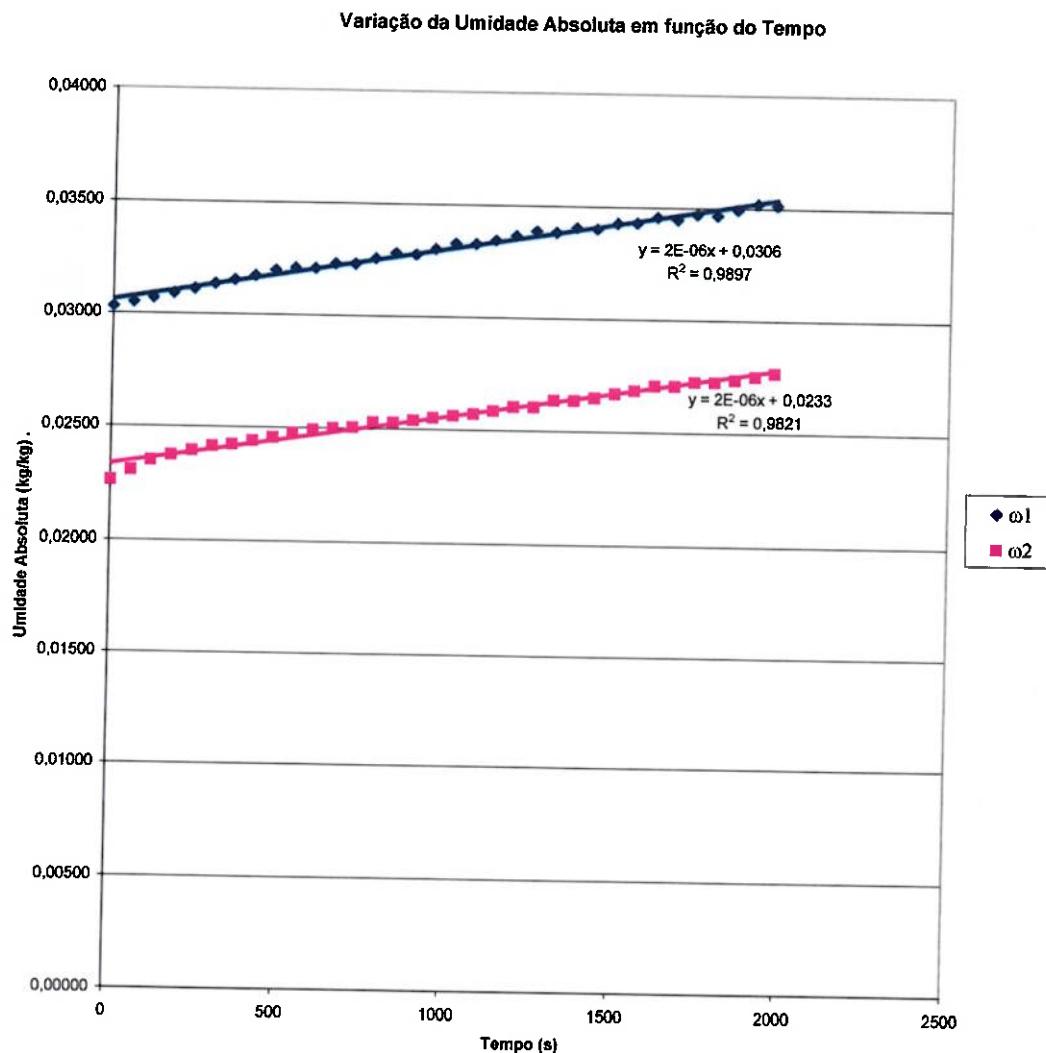


Figura 18 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 8.

5.2.2.9 Ensaio 9

No ensaio 8, o duto de interligação entre as câmaras tem comprimento de 0,50 m, sendo utilizado o ventilador com velocidade de aproximadamente 1,0 m/s.

Dados iniciais:

- Câmara 1:

$$TBS\ 1 = 39,2\ ^\circ C;$$

$$TBU\ 1 = 31,9\ ^\circ C;$$

$$\omega_1 = 0,03029\ kg/kg;$$

- Câmara 2:

$$TBS\ 2 = 35,3\ ^\circ C;$$

$$UR\ 2 = 56,8\ %;$$

$$\omega_2 = 0,02262\ kg/kg;$$

$$\Delta G = 0,00768\ kg/kg.$$

Os resultados de taxa de migração de vapor conseguidos a partir desses dados são:

$$M_{\omega} \text{ experimental} = 2,555635 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

$$M_{\omega} \text{ teórico} = 1,829580 \times 10^{-6}\ kg/kg$$

O valor de M_{ω} teórico foi determinado para o presente ensaio utilizando-se a equação (15), embora esta não tenha sido proposta para casos em que, na interligação entre os ambientes, haja movimentação do ar provocada por ventilador.

Ainda para esses dados iniciais, o resultado obtido é representado de forma gráfica pela figura 19.

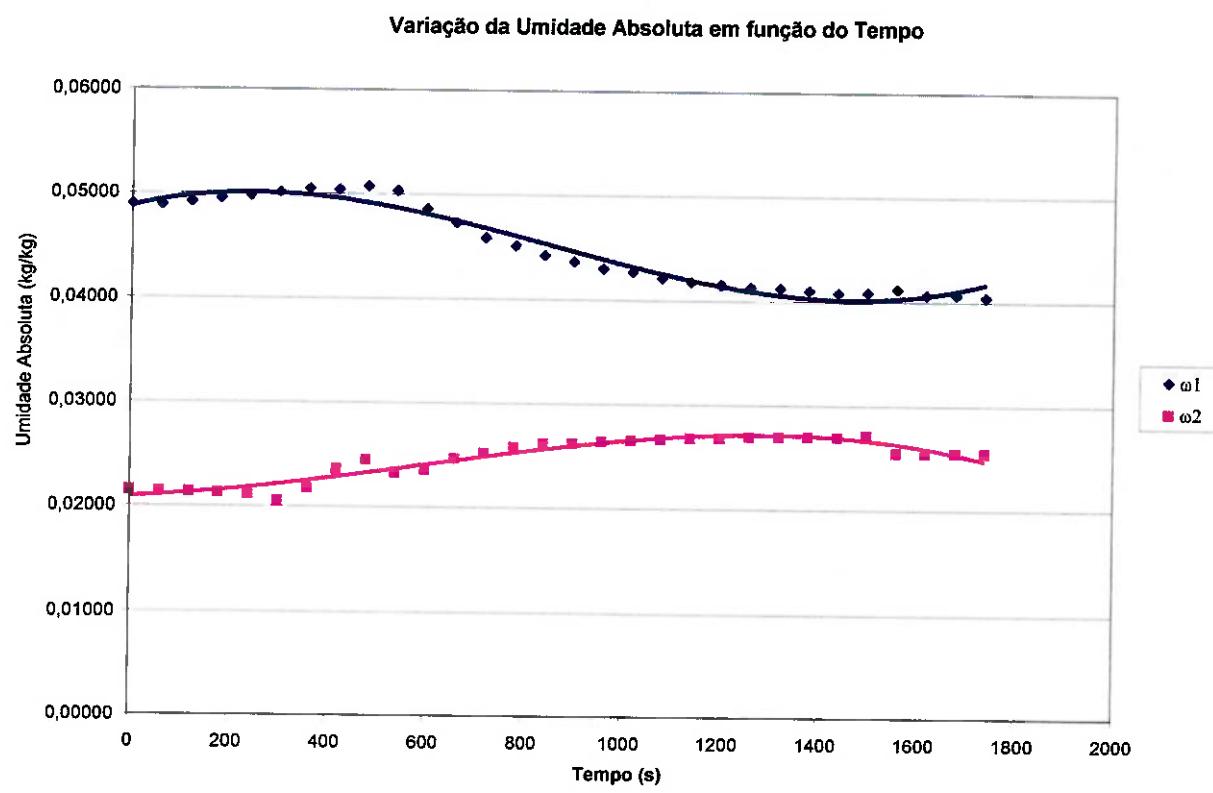


Figura 19 – Curvas de variação de ω_1 e ω_2 em função do tempo no ensaio 9.

5.3 Análise de Resultados

Os resultados conseguidos mostram que a tela de malha fina é eficiente no seu papel de obstáculo à migração de vapor. O cotovelo, entretanto, mostrou-se ineficiente como barreira.

O gráfico da figura 20 mostra os resultados de Taxa de Migração (M_0) x Diferença de Umidade Absoluta entre as Câmaras (ΔG), pois isso é necessário para que as avaliações sejam independentes do valor inicial de diferença de umidades absolutas.

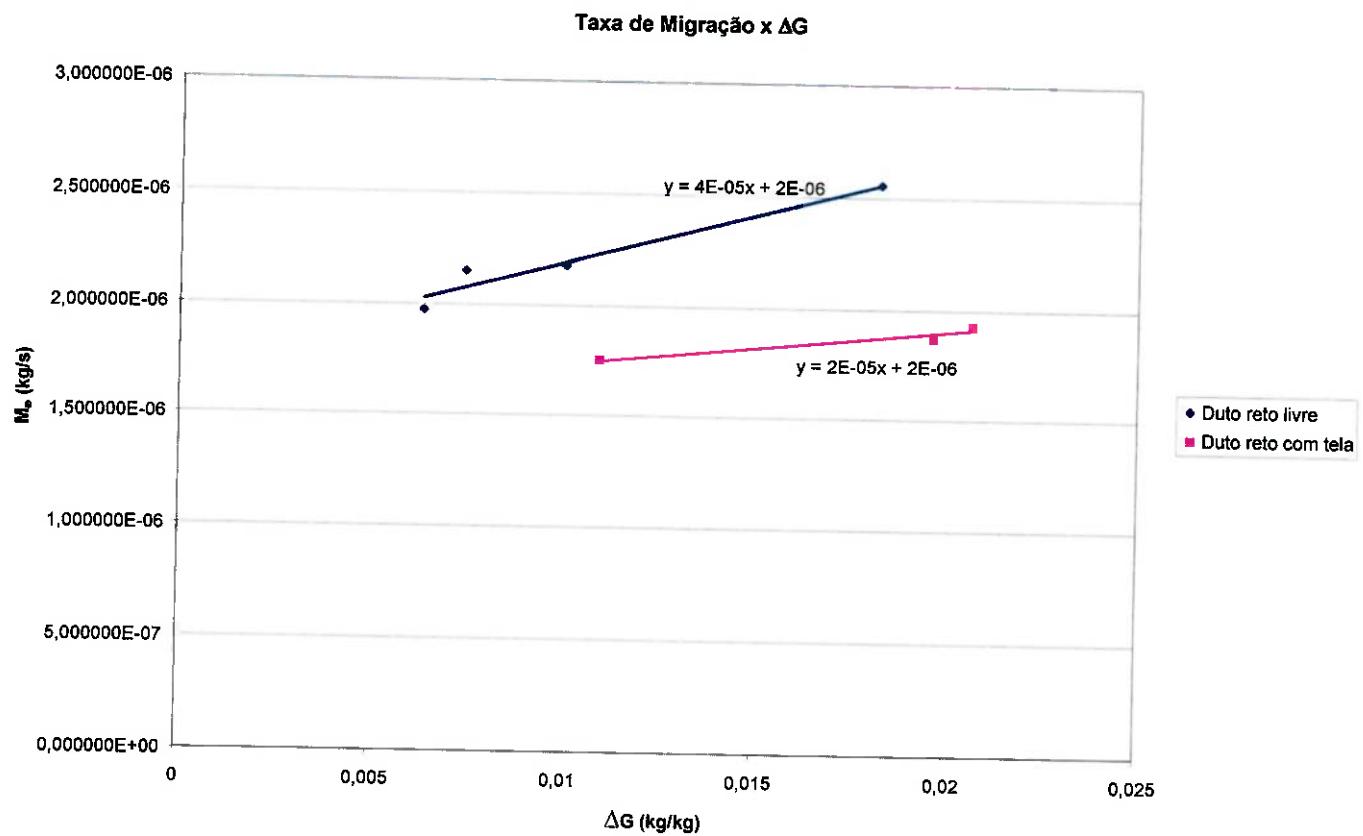


Figura 20 – Curvas M_{ϕ} x ΔG

Os coeficientes de utilização para as barreiras são calculados utilizando-se a equação da reta média do duto reto livre, a equação (19).

$$M_{\omega} = 4 \cdot 10^{-5} * \Delta G + 2 \cdot 10^{-6} \quad (19)$$

Os valores de ΔG obtidos nos ensaios com barreiras são utilizados na equação 19 para o cálculo de M_{ω} em uma simulação de um caso em que houvesse somente um duto reto livre. Com isso, pode-se comparar os valores calculados para dutos retos livres e os valores obtidos experimentalmente para dutos com telas, cotovelos ou fluxo de ar em sentido contrário ao de vapor, podendo-se assim avaliar a eficiência de cada uma dessas barreiras.

O valor de M_{ω} para ensaios com cotovelo foi muito próximo ao valor obtido pela equação 19 para duto reto livre. A seguir, o cálculo é feito com o valor de ΔG do ensaio 8.

Cotovelo: $\Delta G = 0,00768 \text{ kg/kg}$

$$M_{\omega} = 2,307 E - 06 \text{ kg/s}$$

Como se pode observar no item 5.2.2.8, o valor de M_{ω} experimental do cotovelo é aproximadamente o mesmo, se consideradas as incertezas desse método. Portanto, sua aplicação como obstáculo à migração de vapor está descartada.

Para o caso da tela, a eficiência na redução da migração de vapor foi comprovada, sendo que o coeficiente é calculado a partir da equação (19), comparando-se M_{ω} equivalente a um ensaio sem tela com M_{ω} de um ensaio com tela, conseguido a partir da reta média do duto com tela, a equação (20). Isso é feito para um valor de ΔG que esteja no intervalo para o qual foram feitas as equações (19) e (20).

$$M_{\omega} = 2 \cdot 10^{-5} * \Delta G + 2 \cdot 10^{-6} \quad (20)$$

Tela: $\Delta G = 0,012 \text{ kg/kg}$

$$M_{\omega \text{ duto livre}} = 2,48 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$$

$$M_{\omega} \text{ duto com tela} = 2,24 * 10^{-6} \text{ kg/s}$$

$$\text{Fator Tela} = M_{\omega} \text{ duto com tela} / M_{\omega} \text{ duto livre} = 2,24 * 10^{-6} / 2,48 * 10^{-6} = 0,90$$

Os resultados analisados mostram que o valor de migração utilizando-se uma tela de malha fina como obstáculo ao fluxo de vapor diminui em 10 % a migração, ou seja, o fator 0,90 deve ser multiplicado aos resultados esperados para a migração em um duto reto livre.

Para o ensaio realizado com ventilador a metodologia de comparação de resultados foi análoga à realizada com o ensaio com presença do cotovelo. Logo, o fator multiplicativo dos resultados esperados para M_{ω} , referente à utilização do ventilador, é 0,098. Deste modo, o fluxo de ar em sentido contrário à migração de vapor reduz em aproximadamente 91,2 % o fluxo esperado de vapor d'água.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo tem como uma de suas metas provar que para ambientes contíguos interligados, entre os quais a umidade absoluta da mistura ar-vapor tem valores diferentes, há fluxo de vapor d'água em sentido independente do fluxo de ar. Para tanto, foram primeiramente realizados ensaios sem a utilização do ventilador, que visavam estabelecer parâmetros numéricos para a migração do vapor entre as duas câmaras e compará-los com os obtidos em modelos anteriormente propostos.

Entretanto, inicialmente foram propostas condições iniciais para a câmara 1 que previam um estado o mais próximo possível da saturação para a mistura ar-vapor d'água, a fim de se obter uma diferença de umidade absoluta que possibilitasse a migração de vapor entre as duas câmaras. Nessas condições não foi observada a migração de vapor, devido ao fato de o vapor se condensar ao entrar em contato com o duto em uma temperatura mais baixa. Logo, a partir desses ensaios iniciais concluiu-se que a mistura ar-vapor a ser estudada deveria estar afastada da curva de saturação.

Assim sendo, os ensaios seguintes foram realizados com a presença de aquecedores em ambas as câmaras, fato que permitiu que se obtivesse uma diferença de umidade absoluta necessária para a migração de vapor d'água sem que houvesse a saturação da mistura ar-vapor na câmara 1, bem como o constatação do fluxo de vapor da câmara 1 para a 2.

Outra meta do presente estudo baseava-se na obtenção de relações semi-empíricas características ao processo de migração de vapor entre dois ambientes adjacentes. A partir de ensaios realizados com dutos de 0,50 m de comprimento interligando as duas câmaras, sem a influência do fluxo de ar, foi possível obter-se uma equação que relaciona a diferença de umidades absolutas entre as câmaras e o valor da taxa de migração de vapor. Essa equação é representada a seguir:

$$M_o = 4 \cdot 10^{-5} * \Delta G + 2 \cdot 10^{-6}$$

Essa equação permitiu a conclusão de que a taxa de migração de vapor é linearmente dependente da diferença de umidade absoluta entre dois ambientes contíguos.

Esse estudo analisou o uso de barreiras ao fluxo de vapor. Foram estudados dois tipos de acessórios, que foram acoplados ao trecho de duto reto que interligava as câmaras: um cotovelo e uma tela de malha fina.

Foi comprovado, através da comparação de resultados obtidos para situações com e sem o cotovelo, que este não é uma barreira eficiente ao fluxo de vapor, pois, apesar de sua presença, os resultados de M_w são muito próximos daqueles obtidos com duto reto livre.

Os valores obtidos com aplicação da tela de malha fina no duto reto apresentaram uma redução no valor da taxa de migração de vapor de 10%, de onde se pode concluir que este acessório é eficiente na restrição do fluxo de vapor d'água.

Finalmente a partir de ensaios realizados também com dutos de 0,50 m de comprimento interligando as duas câmaras, mas nesse momento com a presença de fluxo de ar em sentido contrário a migração de vapor, foi possível comprovar a tese de que o vapor d'água migra em sentido independente do sentido do ar. No entanto, observou-se que nesse caso a migração de vapor é reduzida em aproximadamente 90% concluindo-se que o fluxo de ar é uma forma de conter o fluxo de vapor. Portanto, a melhor maneira estudada de conter o fluxo de vapor entre ambientes contíguos interligados é o fluxo de ar em sentido contrário ao anterior.

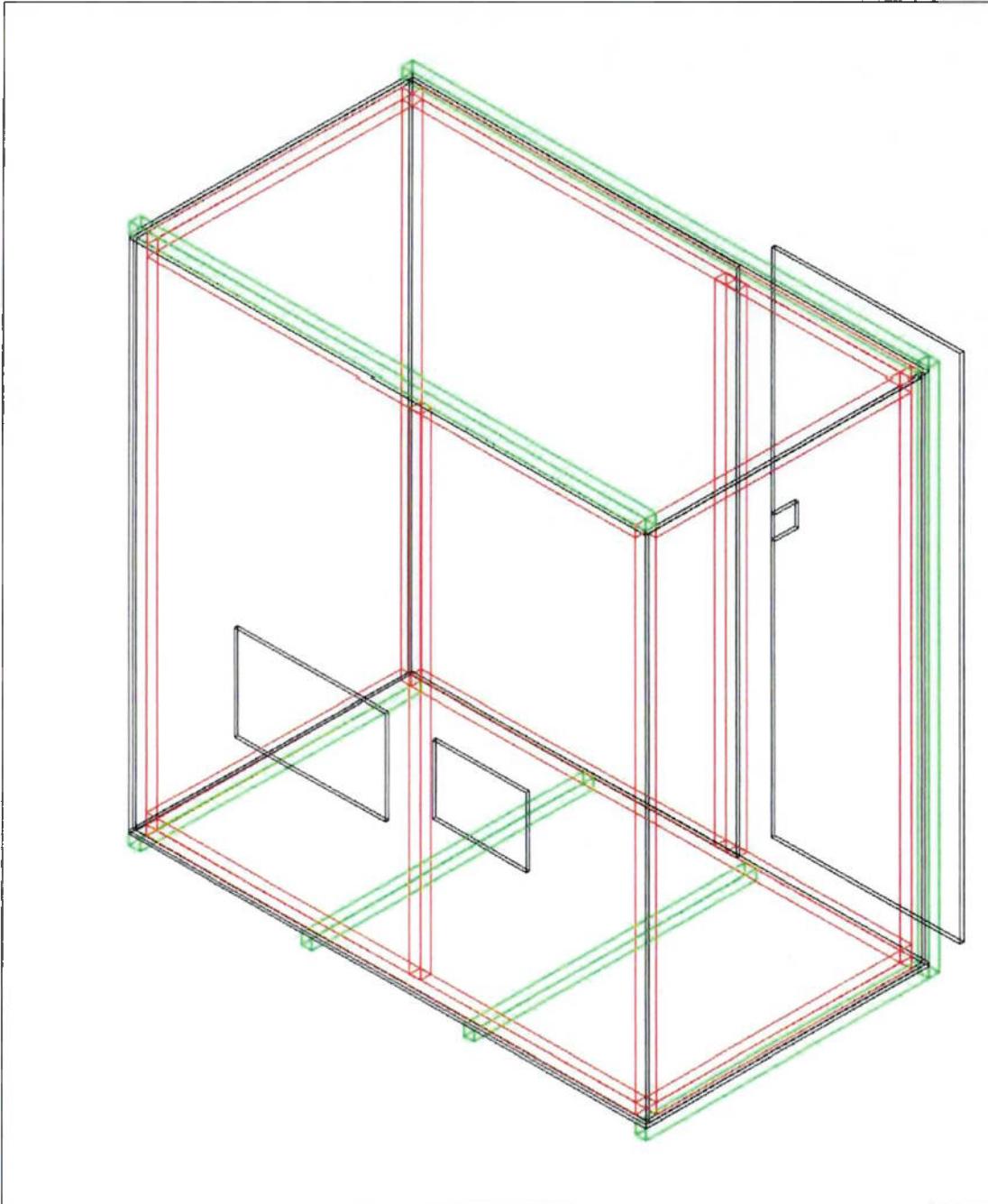
A diferença entre os resultados obtidos experimentalmente e os calculados através das equações de Bry-Air (1995) pode ser explicada pela desigualdade das condições de ensaio. Os ensaios que originaram as equações de Bry-Air (1995) foram realizados em um ambiente padrão de paredes de alvenaria não impermeabilizadas e considerando uma diferença de umidade fixa em 5 g de vapor por 1 kg de ar seco. Já no presente estudo, os ensaios foram realizados em ambientes de madeira impermeabilizados, e sem manter uma diferença de umidade absoluta fixa entre as duas câmaras de ensaio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bry-Air Inc. **Applications Engineering Manual**. Ohio, EUA, 1995.
- [2] Bolliger Jr, R.; Mariani, A. L. C. **Programa SMACNA de Educação Continuada em Tratamento de Ar**. SMACNA. São Paulo, 1997.
- [3] Van Willen, G.J.; Sonntag R.E.; Borgnakke, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1998.
- [4] ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **Fundamentals**. Atlanta, 2001.
- [5] _____. **HVAC Applications**. Atlanta, 1999.
- [6] _____. **HVAC Systems and Equipment**. Atlanta, 2000.
- [7] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10085 - Medição de Temperatura em Condicionamento de Ar**. Rio de Janeiro, 1987.

ANEXOS

Anexo 1 – Desenhos da Câmara 2

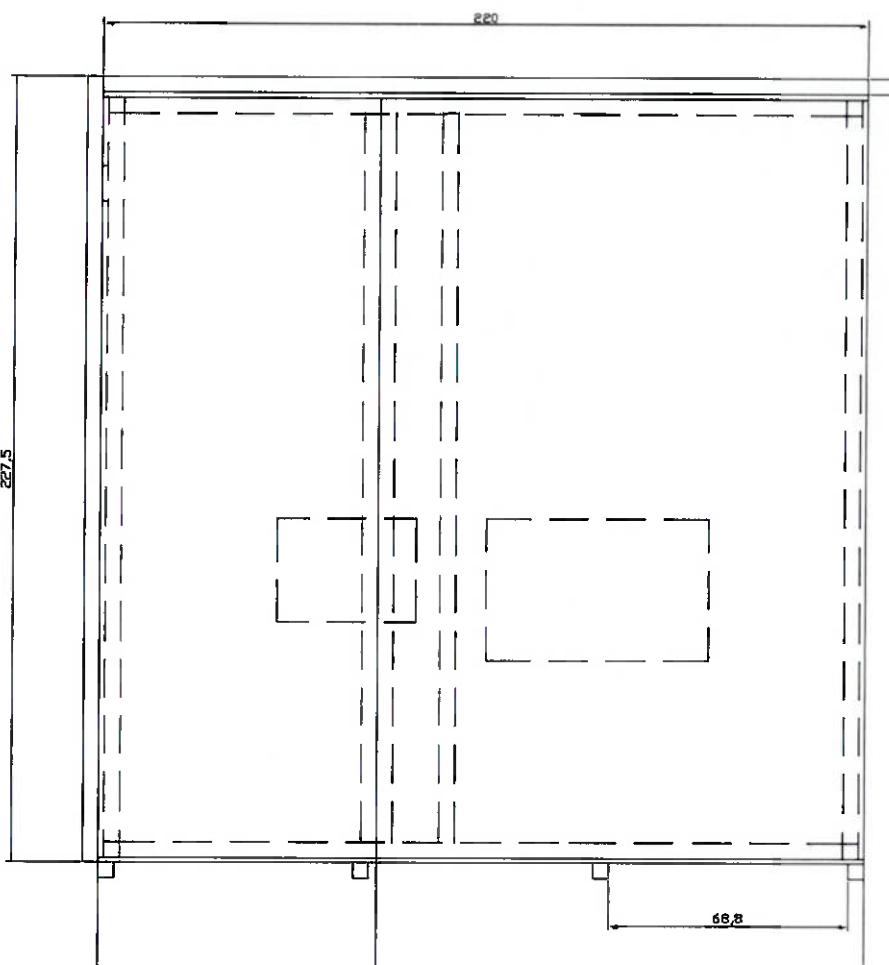
1	2	3	4																				
RevNo	Revision note	Date	Signature Checked																				
A																							
B																							
C																							
D																							
E																							
F																							
																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Itemref</th> <th style="width: 15%;">Quantity</th> <th colspan="2" style="width: 50%;">Vista Isométrica</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">Article No./Reference</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Designed by FLAVIO</td> <td></td> <td>Checked by KARINA</td> <td>Approved by - date MANUELA</td> <td>File name CAMARATF</td> <td>Date 07/10/2003</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Scale N/A</td> </tr> </tbody> </table>						Itemref	Quantity	Vista Isométrica		Article No./Reference		Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003					Scale N/A	
Itemref	Quantity	Vista Isométrica		Article No./Reference																			
Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003																		
				Scale N/A																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="width: 50%;">PME2599</td> <td colspan="2" style="width: 30%;">CÂMARA</td> <td style="width: 20%; text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td style="width: 25%; text-align: right;">1</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">1</td> <td style="width: 25%; text-align: left;">Edition 1</td> <td style="width: 25%; text-align: left;">Sheet 1</td> <td></td> </tr> </table>						PME2599		CÂMARA		1	1	1	Edition 1	Sheet 1									
PME2599		CÂMARA		1																			
1	1	Edition 1	Sheet 1																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; text-align: right;">1</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">1</td> <td style="width: 25%; text-align: left;">4</td> </tr> </table>						1	1	4															
1	1	4																					

1	2	3	4
RevNo	Revision note	Date	Signature Checked

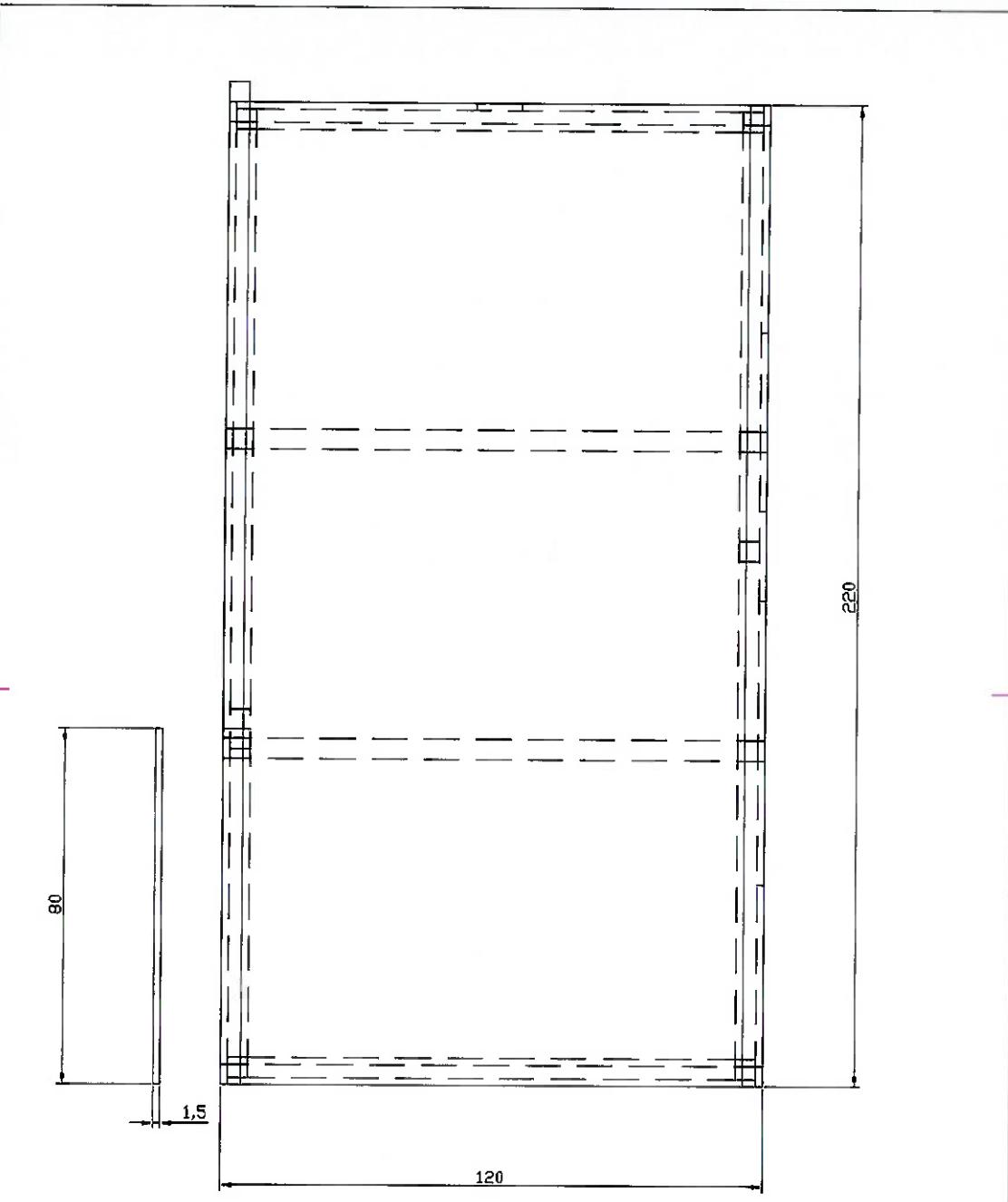
DSS

Itemref	Quantity	Vista frontal		medidas em cm		
Designed by FLAVIO	Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003	Scale N/A	
PME2599		CÂMARA				
		2	Edition 1	Sheet 1		

1	2	3	4																																				
RevNo	Revision note		Date	Signature																																			
				Checked																																			
A	B	C	D	E																																			
F	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Itemref</td> <td style="width: 25%;">Quantity</td> <td colspan="3">Vista lateral direita</td> <td colspan="2">medidas em cm</td> </tr> <tr> <td>Designed by FLAVIO</td> <td></td> <td>Checked by KARINA</td> <td>Approved by - date MANUELA</td> <td>File name CAMARATF</td> <td>Date 07/10/2003</td> <td>Scale N/A</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">PME2599</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">CÂMARA</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">Edition 1</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">Sheet 1</td> </tr> </table>				Itemref	Quantity	Vista lateral direita			medidas em cm		Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003	Scale N/A	PME2599			CÂMARA							4			Edition 1				4			Sheet 1
Itemref	Quantity	Vista lateral direita			medidas em cm																																		
Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003	Scale N/A																																	
PME2599			CÂMARA																																				
			4			Edition 1																																	
			4			Sheet 1																																	

1	RevNo	Revision note	2	3	4	Date	Signature	Checked																												
A								A																												
B			220					B																												
C								C																												
D								D																												
E								E																												
F								F																												
																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Itemref</th> <th style="width: 15%;">Quantity</th> <th colspan="3" style="width: 60%;">Vista traseira</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">medidas em cm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Designed by FLAVIO</td> <td></td> <td>Checked by KARINA</td> <td>Approved by - date MANUELA</td> <td>File name CAMARATF</td> <td>Date 07/10/2003</td> <td>Scale N/A</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">PME2599</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">CAMARA</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">Edition 1</td> <td style="text-align: center;">Sheet 1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>									Itemref	Quantity	Vista traseira			medidas em cm		Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003	Scale N/A	PME2599			CAMARA							3	Edition 1	Sheet 1	
Itemref	Quantity	Vista traseira			medidas em cm																															
Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003	Scale N/A																														
PME2599			CAMARA																																	
			3	Edition 1	Sheet 1																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">1</th> <th style="width: 25%;">2</th> <th style="width: 25%;">3</th> <th style="width: 25%;">4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>									1	2	3	4																								
1	2	3	4																																	

1	2	3	4
RevNo	Revision note	Date	Signature Checked



The technical drawing shows a large outer rectangle with a dashed inner line. The top horizontal side has a total length of 220, with a gap of 10 at each end. The left vertical side has a total length of 220, with a gap of 10 at the top and a small section labeled 80 below it. The right vertical side has a total length of 220, with a gap of 10 at the bottom. The bottom horizontal side has a total length of 120. There is a small protrusion of 1,5 on the left side of the bottom edge.

Itemref	Quantity	Vista superior			medidas em cm
Designed by FLAVIO		Checked by KARINA	Approved by - date MANUELA	File name CAMARATF	Date 07/10/2003
				CÁMARA	Scale N/A
		PME2599		5	Edition 1
					Sheet 1

1 2 3 4 5

Anexo 2 – Lista de materiais para construção da Câmara 2

Projeto Integrado - Trabalho de Formatura

Alunas: Karina Schraml e Manuela Fernandes - Estudo de Migração de Vapor

Aluno: Flávio Utumi - Ensaio de Equipamento de Ar Condicionado unitário

Relação de materiais / custos para Construção de Câmara para Ensaios

LISTA DE MATERIAIS	especificação	quantidade	unidade	unidade
parafuso francês c/ porca e arruela	d=8 mm L=90 mm	220		cada 100
barra roscada	$\phi = 8 \text{ mm}$; $l = 150\text{mm}$	4	m	barra com 1m
arruela	$\phi = 8 \text{ mm}$	24		cada 100
Porca com travamento	$\phi = 8 \text{ mm}$	24		cada 100
borracha para vedação	$t = 6 \text{ mm}$; $h = 35 \text{ mm}$	10	m	cada m
cola branca		10	kg	cada 5 kg
Tinta	esmalte sintético para madeira e metal cinza médio brilhante	1	galões	galão
Massa plástica		2	kg	700 g
Roda	unidirecional, parafusada, 4" FL414FFN	2		unidade + 5% IPI
seladora		2	galões	galão

Anexo 3 – Planilhas com dados dos ensaios realizados

Ensaio 1	Tempo	CAMARA 1						CAMARA 2						
		tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (K)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU)(kg/kg)	ω (kg/kg)	TBS (°C)	TBS (K)	UR (%)	Incerteza	Pv (TBS) (Pa)	ω (kg/kg)
10:22:21	0	39,2	312,20	32	305,00	4758,67	0,030368	0,03054	36,8	309,80	56,4%	53,4%	6213,02	0,023105
10:23:21	60	39,3	312,30	32,1	305,10	4785,65	0,030388	0,03074	36,9	309,90	56,5%	53,5%	6247,02	0,023281
10:24:21	120	39,3	312,30	32,2	305,20	4812,76	0,03409	0,03098	37,1	310,10	56,3%	53,3%	6315,48	0,023455
10:25:21	180	39,3	312,30	32,3	305,30	4840,00	0,03429	0,03123	37,1	310,10	56,4%	53,4%	6315,48	0,023500
10:26:21	240	39,4	312,40	32,3	305,30	4840,00	0,03429	0,03118	37,3	310,30	56,4%	53,4%	6384,59	0,023767
10:27:21	300	39,6	312,60	32,4	305,40	4867,38	0,03449	0,03134	37,4	310,40	56,2%	53,2%	6419,40	0,023809
10:28:21	360	39,5	312,50	32,5	305,50	4894,89	0,03470	0,03163	37,4	310,40	56,1%	53,1%	6419,40	0,023762
10:29:21	420	39,4	312,40	32,5	305,50	4894,89	0,03470	0,03168	37,6	310,60	56,3%	53,3%	6489,49	0,024126
10:30:21	480	39,7	312,70	32,6	305,60	4922,54	0,03491	0,03180	37,7	310,70	56,2%	53,2%	6524,79	0,024215
10:31:21	540	39,7	312,70	32,7	305,70	4950,32	0,03512	0,03205	37,9	310,90	55,8%	52,8%	6595,87	0,024293
10:32:21	600	39,8	312,80	32,8	305,80	4978,24	0,03533	0,03225	38	311,00	55,8%	52,8%	6631,67	0,024435
10:33:21	660	39,9	312,90	32,9	305,90	5006,29	0,03554	0,03246	38	311,00	55,8%	52,8%	6631,67	0,024435
10:34:21	720	40,1	313,10	33	306,00	5034,48	0,03575	0,03263	38,2	311,20	55,7%	52,7%	6703,76	0,024662
10:35:21	780	40,1	313,10	33,1	306,10	5062,81	0,03596	0,03289	38,4	311,40	55,6%	52,6%	6776,53	0,024892
10:36:21	840	40,2	313,20	33,1	306,10	5062,81	0,03596	0,03284	38,5	311,50	55,6%	52,6%	6813,17	0,025032
10:37:21	900	40,3	313,30	33,2	306,20	5091,28	0,03617	0,03305	38,4	311,40	55,7%	52,7%	6776,53	0,024941
10:38:21	960	40,3	313,30	33,2	306,20	5091,28	0,03617	0,03305	38,6	311,60	55,9%	52,9%	6849,99	0,025322
10:39:21	1020	40,4	313,40	33,3	306,30	5119,89	0,03639	0,03327	38,6	311,60	55,6%	52,6%	6849,99	0,025172
10:40:21	1080	40,6	313,60	33,4	306,40	5148,63	0,03661	0,03344	38,8	311,80	55,6%	52,6%	6924,12	0,025456
10:41:21	1140	40,5	313,50	33,5	306,50	5177,52	0,03682	0,03374	38,8	311,80	55,8%	52,8%	6924,12	0,025557

Ensaio 2

Tempo horário	CÂMARA 1					CÂMARA 2								
	tempo (s)	TBS (°C)	TBU (K)	TBU (°C)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU) (kg/kg)	TBS (kg)	TBS (°C)	TBU (K)	UR (%)	incerteza	Pv (TBS) (Pa)	ω (kg/kg)	
02:20	300	38,10	311,10	33,00	306,00	5034,48	0,03575	0,03350	309,10	59,3%	56,3%	5979,54	0,023457	
02:26	660	38,50	311,50	33,60	306,60	5206,54	0,03704	0,03488	310,40	58,0%	55,0%	6419,40	0,024646	
02:31	960	38,90	311,90	33,90	306,90	5294,47	0,03771	0,03550	311,10	57,1%	54,1%	6667,63	0,025202	
02:35	1200	39,10	312,10	34,20	307,20	5383,68	0,03838	0,03621	311,50	56,8%	53,8%	6813,17	0,025626	
02:40	1500	39,50	312,50	34,50	307,50	5474,19	0,03907	0,03685	312,10	56,5%	53,5%	7036,63	0,026349	
02:45	1800	40,00	313,00	34,90	307,90	5596,92	0,04000	0,03774	312,30	56,7%	53,7%	7112,51	0,026749	
02:50	2100	40,10	313,10	35,20	308,20	5690,53	0,04071	0,03853	312,90	56,7%	53,7%	7344,41	0,027660	
02:55	2400	40,50	313,50	35,60	308,60	5817,45	0,04168	0,03950	40,00	313,00	57,1%	54,1%	7383,69	0,028031

2,177947E-06

Ensaio 3

Tempo	CÂMARA 1				CÂMARA 2									
	horário	tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (°C)	TBU (K)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU) (kg/kg)	TBS (°C)	TBS (K)	UR (%)	Incerteza	Pv (TBS)(Pa)	ω (kg/kg)
11:20	0	34,20	307,20	29,60	302,60	4149,62	0,02917	0,02718	32,20	305,20	59,4%	62,4%	4812,76	0,020841
11:25	300	34,80	307,80	30,30	303,30	4319,83	0,03042	0,02847	33,50	306,50	57,6%	60,6%	5177,52	0,021806
11:30	600	35,80	308,80	31,20	304,20	4541,56	0,03211	0,03010	34,20	307,20	56,5%	59,5%	5383,68	0,022279
11:35	900	36,60	309,60	31,90	304,90	4731,82	0,03348	0,03143	35,00	308,00	55,5%	58,5%	5627,98	0,022922
11:40	1200	36,90	309,90	32,40	305,40	4867,38	0,03449	0,03252	35,40	308,40	55,1%	58,1%	5753,69	0,023287
11:46	1560	37,50	310,50	33,00	308,00	5034,48	0,03575	0,03377	36,10	309,10	54,6%	57,6%	5979,54	0,024020
11:50	1800	37,80	310,80	33,40	306,40	5148,63	0,03661	0,03467	36,40	309,40	54,5%	57,5%	6078,66	0,024389

Ensayo 4

CAMARA 1										CAMARA 2									
Tempo	horário	tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (°C)	TBU (K)	Pv (TBU) (Pa)	φ (TBU)	Io (kg/kg)	TBS (°C)	TBS (K)	UR (%)	Incerteza	Pv (TBS) (Pa)	φ (kg/kg)				
12:17		0	39,50	312,50	35,10	308,10	5659,18	0,04047	0,03852	36,80	309,80	50,0%	47,0%	6213,02	0,020246				
12:22		300	39,90	312,90	35,30	308,30	5722,03	0,04095	0,03891	37,30	310,30	50,0%	47,0%	6384,59	0,020823				
12:27		600	39,90	312,90	35,50	308,50	5785,49	0,04144	0,03948	37,80	310,80	50,1%	48,1%	6560,25	0,021935				
12:32		900	40,00	313,00	35,70	308,70	5849,56	0,04192	0,04001	38,10	311,10	50,5%	48,5%	6667,63	0,022499				
12:37		1200	40,30	313,30	35,90	308,90	5914,24	0,04242	0,04046	38,30	311,30	50,8%	49,8%	6740,06	0,023385				
12:42		1500	40,50	313,50	36,10	309,10	5979,54	0,04292	0,04096	38,60	311,60	51,1%	51,1%	6849,99	0,024426				
12:48		1860	40,60	313,60	36,20	309,20	6012,42	0,04317	0,04121	38,80	311,80	51,7%	51,7%	6924,12	0,025003				

Ensayo 5

Ensaios 6

Tempo horário	CAMARA 1					CAMARA 2							
	tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (°C)	TBU (K)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU)	(kg/kg)	TBS (°C)	TBS (K)	UR (%)	Pv (TBS) (Pa)	ω (kg/kg)
15:51	0	41,00	314,00	36,40	309,40	6078,66	0,04368	0,04163	37,60	310,60	48,7%	6489,49	0,021970
15:56	240	41,10	314,10	36,40	309,40	6078,66	0,04368	0,04158	38,40	311,40	48,2%	6776,53	0,022733
16:03	720	41,20	314,20	36,60	309,60	6145,52	0,04420	0,04214	39,00	312,00	48,1%	6998,96	0,023457
16:06	900	41,30	314,30	36,70	309,70	6179,19	0,04446	0,04240	39,40	312,40	48,1%	7150,72	0,023985
16:16	1500	41,40	314,40	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04266	40,00	313,00	48,5%	7383,69	0,025013
16:23	1920	41,40	314,40	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04266	40,20	313,20	49,0%	7462,79	0,025563

Ensayo 7

Tempo	CAMARA 1					CAMARA 2						
	horário	tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (°C)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU)(kg/kg)	TBS (°C)	TBS (K)	UR (%)	Pv (TBS) (Pa)	ω (kg/kg)
16:46	0	41,50	314,50	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04261	38,00	311,00	47,6%	6631,67
16:51	300	41,50	314,50	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04261	38,80	311,80	47,2%	6924,12
16:56	600	41,60	314,60	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04257	39,10	312,10	47,2%	7036,63
17:02	960	41,70	314,70	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04252	39,60	312,60	47,4%	7227,66
17:06	1200	41,70	314,70	36,90	309,90	6247,02	0,04498	0,04283	39,70	312,70	47,6%	7266,40
17:11	1500	41,70	314,70	36,80	309,80	6213,02	0,04472	0,04252	40,10	313,10	47,9%	7423,15

Ensaios

Tempo	CAMARA 1						CAMARA 2					
	horário	tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (°C)	TBU (K)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU)(kg/kg)	TBS (°C)	TBS (K)	UR (%)	Pv (TBS)(Pa)
14:51:30	0	39,2	312,20	311,9	304,90	473,182	0,03348	0,03029	35,3	308,30	56,8%	5722,03
14:52:30	60	39,3	312,30	32	305,00	475,867	0,03368	0,03049	35,7	308,70	56,6%	5849,56
14:53:30	120	39,4	312,40	32,1	305,10	4785,65	0,03388	0,03069	36,1	309,10	56,4%	5979,54
14:54:30	180	39,5	312,50	32,2	305,20	4812,76	0,03409	0,03089	36,3	309,30	56,3%	6045,46
14:55:30	240	39,6	312,60	32,3	305,30	4840,00	0,03429	0,03110	36,6	309,60	55,9%	6145,52
14:56:30	300	39,6	312,60	32,4	305,40	4867,38	0,03449	0,03134	36,8	309,80	55,7%	6213,02
14:57:30	360	39,8	312,80	32,5	305,50	4894,89	0,03470	0,03150	37	310,00	55,3%	6281,17
14:58:30	420	39,9	312,90	32,6	305,60	4922,54	0,03491	0,03171	37,2	310,20	55,1%	6349,96
14:59:30	480	39,9	312,90	32,7	305,70	4950,32	0,03512	0,03196	37,3	310,30	55,1%	6384,59
15:00:30	540	40,2	313,20	32,8	305,80	4978,24	0,03533	0,03208	37,5	310,50	55,0%	6454,36
15:01:30	600	40,2	313,20	32,8	305,80	4978,24	0,03533	0,03208	37,6	310,60	55,0%	6489,49
15:02:30	660	40,3	313,30	32,9	305,90	5006,29	0,03554	0,03229	37,7	310,70	54,9%	6524,79
15:03:30	720	40,3	313,30	32,9	305,90	5006,29	0,03554	0,03229	37,7	310,70	55,0%	6524,79
15:04:30	780	40,3	313,30	33	306,00	5034,48	0,03575	0,03254	37,9	310,90	54,9%	6595,87
15:05:30	840	40,3	313,30	33,1	306,10	5062,81	0,03596	0,03280	37,9	310,90	54,9%	6595,87
15:06:30	900	40,4	313,40	33,1	306,10	5062,81	0,03596	0,03275	38	311,00	54,8%	6631,67
15:07:30	960	40,4	313,40	33,2	306,20	5091,28	0,03617	0,03301	38,1	311,10	54,8%	6667,63
15:08:30	1020	40,4	313,40	33,3	306,30	5119,89	0,03639	0,03327	38,2	311,20	54,7%	6703,76
15:09:30	1080	40,4	313,40	33,3	306,30	5119,89	0,03639	0,03327	38,3	311,30	54,6%	6740,06
15:10:30	1140	40,6	313,60	33,4	306,40	5148,63	0,03661	0,03344	38,4	311,40	54,6%	6776,53
15:11:30	1200	40,7	313,70	33,5	306,50	5177,52	0,03682	0,03365	38,5	311,50	54,7%	6813,17
15:12:30	1260	40,8	313,80	33,6	306,60	5206,54	0,03704	0,03387	38,5	311,50	54,7%	6813,17
15:13:30	1320	40,9	313,90	33,6	306,60	5206,54	0,03704	0,03383	38,7	311,70	54,7%	6886,97
15:14:30	1380	41	314,00	33,7	306,70	5235,71	0,03726	0,03405	38,7	311,70	54,7%	6886,97
15:15:30	1440	41,1	314,10	33,7	306,70	5235,71	0,03726	0,03400	38,8	311,80	54,7%	6924,12
15:16:30	1500	41,1	314,10	33,8	306,80	5265,02	0,03748	0,03427	39	312,00	54,5%	6998,96
15:17:30	1560	41	314,00	33,8	306,80	5265,02	0,03748	0,03431	39,1	312,10	54,5%	7036,63
15:18:30	1620	41	314,00	33,9	306,90	5294,47	0,03771	0,03457	39,2	312,20	54,6%	7074,49
15:19:30	1680	41,2	314,20	33,9	306,90	5294,47	0,03771	0,03449	39,2	312,20	54,6%	7074,49
15:20:30	1740	41,3	314,30	34	307,00	5324,06	0,03793	0,03471	39,3	312,30	54,7%	7112,51
15:21:30	1800	41,4	314,40	34	307,00	5324,06	0,03793	0,03467	39,3	312,30	54,7%	7112,51
15:22:30	1860	41,4	314,40	34,1	307,10	5353,80	0,03815	0,03493	39,4	312,40	54,6%	7150,72
15:23:30	1920	41,4	314,40	34,2	307,20	5383,68	0,03838	0,03520	39,5	312,50	54,6%	7189,10
15:24:30	1980	41,5	314,50	34,2	307,20	5383,68	0,03838	0,03516	39,6	312,60	54,6%	7227,66

Ensaios 9

Tempo	CÂMARA 1					CÂMARA 2						
	horário	tempo (s)	TBS (°C)	TBS (K)	TBU (°C)	TBU (K)	Pv (TBU)(Pa)	ω (TBU)	(kg/kg)	ω (kg/kg)	Pv (TBS) (Pa)	UR (%)
18:52:16	0	42,3	315,30	38,9	311,90	6961,45	0,05054	0,04900	35,7	308,70	53,0%	5849,56
18:53:16	60	42,5	315,50	38,9	311,90	6961,45	0,05054	0,04891	35,6	308,60	53,1%	5817,45
18:54:16	120	42,6	315,60	39	312,00	6998,96	0,05084	0,04920	35,5	308,50	53,3%	5785,49
18:55:16	180	42,6	315,60	39,1	312,10	7036,63	0,05113	0,04954	35,4	308,40	53,4%	5753,69
18:56:16	240	42,7	315,70	39,2	312,20	7074,49	0,05143	0,04984	35,2	308,20	53,5%	5690,53
18:57:16	300	42,7	315,70	39,3	312,30	7112,51	0,05173	0,05018	34,7	307,70	53,6%	5535,26
18:58:16	360	42,7	315,70	39,4	312,40	7150,72	0,05203	0,05033	35,7	308,70	53,6%	5849,56
18:59:16	420	42,9	315,90	39,4	312,40	7150,72	0,05203	0,05044	37,1	310,10	53,6%	6315,48
19:00:16	480	42,9	315,90	39,5	312,50	7189,10	0,05233	0,05079	37,8	310,80	53,6%	6560,25
19:01:16	540	43,1	316,10	39,4	312,40	7150,72	0,05203	0,05036	36,9	309,90	53,6%	6247,02
19:02:16	600	43,1	316,10	38,9	311,90	6961,45	0,05054	0,04864	37,1	310,10	53,6%	6315,48
19:03:16	660	43,1	316,10	38,5	311,50	6813,17	0,04938	0,04730	37,9	310,90	53,6%	6595,87
19:04:16	720	43,3	316,30	38,1	311,10	6667,63	0,04824	0,04590	38,3	311,30	53,6%	6740,06
19:05:16	780	43,5	316,50	37,9	310,90	6595,87	0,04768	0,04516	38,7	311,70	53,6%	6886,97
19:06:16	840	43,4	316,40	37,6	310,60	6489,49	0,04686	0,04425	39	312,00	53,6%	6998,96
19:07:16	900	43,3	316,30	37,4	310,40	6419,40	0,04631	0,04366	39	312,00	53,6%	6998,96
19:08:16	960	43,3	316,30	37,2	310,20	6349,96	0,04578	0,04304	39,1	312,10	53,6%	7036,63
19:09:16	1020	43,3	316,30	37,1	310,10	6315,48	0,04551	0,04273	39,2	312,20	53,6%	7074,49
19:10:16	1080	43,2	316,20	36,9	309,90	6247,02	0,04498	0,04216	39,3	312,30	53,6%	7112,51
19:11:16	1140	43,3	316,30	36,8	309,80	6213,02	0,04472	0,04181	39,4	312,40	53,6%	7150,72
19:12:16	1200	43,2	316,20	36,7	309,70	6179,19	0,04446	0,04155	39,4	312,40	53,6%	7150,72
19:13:16	1260	43	316,00	36,6	309,60	6145,52	0,04420	0,04134	39,5	312,50	53,6%	7189,10
19:14:16	1320	43,2	316,20	36,6	309,60	6145,52	0,04420	0,04125	39,5	312,50	53,6%	7189,10
19:15:16	1380	43	316,00	36,5	309,50	6112,01	0,04394	0,04103	39,5	312,50	53,6%	7189,10
19:16:16	1440	42,8	315,80	36,4	309,40	6078,66	0,04368	0,04082	39,5	312,50	53,6%	7189,10
19:17:16	1500	42,7	315,70	36,4	309,40	6078,66	0,04368	0,04087	39,6	312,60	53,6%	7227,66
19:18:16	1560	42,6	315,60	36,5	309,50	6112,01	0,04394	0,04121	39,6	312,60	50,5%	7227,66
19:19:16	1620	42,5	315,50	36,3	309,30	6045,46	0,04343	0,04066	39,6	312,60	50,4%	7227,66
19:20:16	1680	42,4	315,40	36,3	309,30	6045,46	0,04343	0,04070	39,7	312,70	50,3%	7266,40
19:21:16	1740	42,3	315,30	36,2	309,20	6012,42	0,04317	0,04045	39,7	312,70	50,2%	7266,40