

# **Transferência de Calor em Torre de Arrefecimento**

*Marco Rafael Carneiro Martins Pacheco*

## **Relatório da Dissertação do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Carlos Pinho  
Co-Orientador no ISEP: Prof. Leonardo Ribeiro



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho 2008



## Resumo

O presente estudo teve como principais objectivos estudar uma torre de arrefecimento e o processo de transferência de calor entre a água e o ar. Na torre de arrefecimento a água pulverizada é introduzida pelo topo da torre e o ar insuflado pela parte inferior da torre. Para simular uma instalação industrial consumidora de água fria recorreu-se ao uso de resistências eléctricas. Pretendeu-se também com este estudo elaborar um modelo matemático e validá-lo experimentalmente, modelo este com que se pretendeu traduzir a evolução das temperaturas dos fluidos (água e ar) ao longo da torre de arrefecimento. Foi feita a comparação entre os valores obtidos experimentalmente com o respectivo modelo matemático. Na elaboração do modelo matemático foi feita uma aproximação simples dado que foram desprezadas a transferência de água das gotas para o ar e o arrastamento das gotas de água pela corrente de ar para o exterior da torre de arrefecimento. A torre de arrefecimento foi instalada no Laboratório de Fluidos e Calor do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

A presente dissertação divide-se em seis principais capítulos, sendo o primeiro capítulo uma breve descrição da instalação e do estudo que se pretendeu fazer, o segundo uma descrição mais detalhada da instalação e instrumentação utilizada, o terceiro capítulo descreve o procedimento experimental, o quarto e quinto capítulos debruçam-se sobre os resultados obtidos experimentalmente, sua análise e comparação com o modelo matemático elaborado. As conclusões são apresentadas no capítulo 6.

De uma forma geral pode-se considerar que neste estudo foram alcançados os objectivos propostos, tendo em conta o tempo de execução.

Conclui-se que na instalação ensaiada, e muito provavelmente em todas as instalações que sigam o mesmo princípio de funcionamento, há uma maior importância na forma como a água é aspergida e no modo de obter gotas de diâmetro muito reduzido, do que do coeficiente de transferência de calor na determinação do coeficiente caracterizador das torres de arrefecimento  $\frac{hA}{c_p}$ .



## Abstract

The main objectives of this study were: study a cooling tower and the heat transfer process between water and air. In the cooling tower, the water was sprayed from the top of the tower, while the of air flows upwards from the bottom of the tower. A group of electric heating elements was installed to simulate an industrial process demanding cold water. A mathematical model was developed and experimentally validated. The model translates the evolution of the temperature of both fluids (water and air) along the cooling tower. A comparison of the values experimentally obtained and mathematically obtained was made. The development of the mathematical model lead to a simple model, with some constraints, since it was not considered the heat transfer from the water drop to the air flow and the drag of water by the air flow, to the exterior of the cooling tower. The cooling tower was installed in the Laboratório de Fluidos e Calor do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

This dissertation is divided in six chapters. The first chapter is a brief introduction to the installation and to the study that was made. The second chapter has got a detailed description of the installation and instruments used to collect data. The third chapter describes all the experimental procedure and the fourth and fifth chapters treat and analyze all the data collected and a comparison with the mathematical model is made. The conclusions are presented in sixth chapter.

Generally speaking, the initial objectives were achieved in spite of time limitations.

In conclusion, the tested installation and, most probably, in all the installations that follow the same working principle, the method used to spray the water into the cooling tower and the subsequent size of the water droplets, are more important than the heat transfer coefficient, in the quantification of the performance coefficient of the

cooling tower  $\frac{hA}{c_p}$ .



## **Agradecimentos**

Quero agradecer ao Professor Carlos Pinho, a sua orientação neste estudo bem como todas as condições que colocou ao meu dispor e que tornaram este estudo possível.

Ao Professor Leonardo Ribeiro a co-orientação deste estudo e por todo o apoio e ajuda prestado ao longo da realização do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, mais concretamente ao Laboratório de Fluidos e Calor por terem colocado as suas instalações ao meu dispor, bem como a instrumentação e meios necessários à realização deste estudo.



## Índice de Conteúdos

1 Introdução e objectivos.....	3
2 Instalação.....	7
2.1 Torre de Arrefecimento.....	7
2.2 Esquema de Funcionamento.....	10
2.3 Instrumentação.....	11
2.3.1 Aquisição de dados.....	11
2.3.2 'Anemómetro' digital, da KIMO, modelo AMI 301.....	12
2.3.3 Psicrómetro.....	13
2.3.4 Contador de água.....	14
3 Experimental.....	17
3.1 Procedimento.....	17
3.1.1 – Medição de caudal de ar e de água.....	17
3.1.1.1 – Medição de caudal de ar.....	17
3.1.1.2 – Medição de caudal de água.....	20
3.1.2 – Medição do diâmetro das gotas.....	20
3.2 Procedimento de ensaio.....	23
4 Resultados experimentais.....	29
5 Análise de Resultados.....	39
5.1 Modelo matemático.....	39
5.1.1 Cálculo do coeficiente característico das torres de arrefecimento, $\frac{hA_{gotas}}{cP_{medio}}$ .....	39
5.1.2 Perfil de temperaturas ao longo da torre de arrefecimento.....	42
5.1.3 Cálculo de $\frac{hA}{cP_{medio}}$ mediante resultados obtidos experimentalmente.....	43
5.1.4 Cálculo de $\frac{hA}{cP_{medio}}$ mediante o cálculo do coeficiente de transferência de calor $h$ e da área total de gotas de água existentes na torre em dado instante.....	46
5.1.4.1 Velocidade de queda das gotas.....	46
5.1.4.2 Coeficiente de transferência de calor $h$ .....	48
5.1.4.3 Diâmetro e número de gotas dentro da torre.....	49



5.2 Análise de resultados.....	50
5.2.1 Temperatura do ar Vs altura.....	50
5.2.2 Temperaturas da água medida e calculada Vs cota.....	56
5.2.3 Coeficiente $\frac{hA}{cP_{\text{médio}}}$ .....	62
5.2.4 Cálculo de h, $A_{\text{gotas}}$ , tempo de queda e $\frac{hA}{cP_{\text{médio}}}$ .....	63
5.2.4.1 Coeficiente de transferência de calor h.....	64
5.2.4.2 Área total das gotas de água.....	65
5.2.4.3 Tempo de queda das gotas de água.....	66
5.2.4.4 Coeficiente $\frac{hA}{cP_{\text{médio}}}$ .....	67
5.5 – Comparação do coeficiente $\frac{hA}{cP_{\text{médio}}}$ calculado globalmente em função dos ensaios, com o coeficiente $\frac{hA}{cP_{\text{médio}}}$ calculado em função do diâmetro das gotas.....	68
6 Conclusões e trabalhos futuros.....	71
6.1 Conclusões.....	71
6.2 Perspectivas de trabalhos futuros.....	72
7 Referências e Bibliografia .....	75
ANEXOS.....	77
Anexo A .....	79
Anexo B .....	85
Anexo C .....	91
Anexo D .....	97
Anexo E.....	101
Anexo F .....	113



## Nomenclatura

A	Área [m <sup>2</sup> ]
C <sub>par</sub>	Calor específico a pressão constante do ar húmido à pressão constante [J/kgK]
C <sub>água</sub>	Calor específico da água [J/kgK]
C <sub>pm</sub>	Calor específico a pressão constante do ar húmido [J/kgK]
C <sub>pmédio</sub>	Calor específico médio a pressão constante do ar húmido [J/kgK]
C <sub>x</sub>	Coefficiente de arrasto
d <sub>g</sub>	Diâmetro médio das gotas de água [m]
g	Força da aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
G	Caudal mássico de ar húmido [kg/s]
h	Coefficiente de transferência de calor entre as gotas e o ar [W/m <sup>2</sup> K]
h <sub>a</sub>	Entalpia do ar [J/(kgK)]
h <sub>água</sub>	Entalpia da água [J/kg/K]
h <sub>i</sub>	Entalpia do ar saturado à temperatura da água [J/(kgK)]
L	Caudal mássico de ar [kg/s]
m	Massa [kg]
m <sub>ah</sub>	Caudal mássico de ar húmido [kg/s]
m <sub>as</sub>	Caudal mássico de ar seco [kg/s]
m <sub>água</sub>	Caudal mássico de água aspergida [kg/s]
n <sub>g</sub>	Número de gotas de água
Cota	Altura a partir do nível de água na torre [m]
N <sub>u</sub>	Número de Nusselt
P <sub>atm</sub>	Pressão atmosférica [mmHg], [Pa]
P <sub>r</sub>	Número de Prandtl
R <sub>ed</sub>	Número de Reynolds
t	Tempo [s]
t <sub>queda</sub>	Tempo de queda [s]
T	Temperatura [°C]
T <sub>água</sub>	Temperatura da água [°C]
T <sub>a</sub>	Temperatura do ar [°C]
T <sub>i</sub>	Temperatura inicial [°C]
T <sub>bh</sub>	Temperatura de bolbo húmido [°C]
T <sub>bs</sub>	Temperatura de bolbo seco [°C]
V <sub>a</sub>	Caudal volúmico de ar húmido [m <sup>3</sup> /s]
v	Velocidade absoluta do ar [m/s]
v <sub>inicial</sub>	Velocidade inicial da gota [m/s]
v <sub>g</sub>	Velocidade média de queda das gotas de água [m/s]
v <sub>média ar</sub>	Velocidade média do ar insuflado na torre [m/s]
ρ <sub>água</sub>	Massa volúmica da água [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>ar</sub>	Massa volúmica do ar [kg/m <sup>3</sup> ]
v <sub>ar</sub>	Viscosidade cinemática do ar [m <sup>2</sup> /s]



# **CAPÍTULO 1: Introdução e objectivos**



## 1 – Introdução e objectivos

Hoje em dia existem cada vez mais preocupações com o consumo racional de energia e com o impacto ambiental dos equipamentos, neste sentido e no campo da climatização e da refrigeração, as torres de arrefecimento são uma boa alternativa, com limitações, a outros equipamentos com funções semelhantes, mas com consumos muito mais elevados e por vezes até se encontram sobredimensionados para as funções requeridas.

Actualmente é possível encontrar-se no mercado das unidades de refrigeração e climatização, uma variedade enorme de soluções e produtos, estando cada um deles adequado às diversas necessidades.

Normalmente inseridas em indústrias consumidoras de água fria, mas que não requeiram temperaturas muito baixas (o limite é a temperatura do bolbo húmido do ar ambiente), grandes sistemas centralizados de ar condicionado ou centrais termoeléctricas, é essencialmente utilizado como arrefecedor de água evaporativo, semi-fechado.

Nas torres de arrefecimento, ar e água circulam em contra-corrente: o ar é insuflado pelo fundo da torre de arrefecimento saindo pelo topo, e a água aspergida pelo topo cai por gravidade para o fundo da torre de arrefecimento.

Este é um dos motivos por que o aprofundamento de conhecimento nessa área é considerado essencial para otimizar o funcionamento das torres de arrefecimento.

O escoamento do ar nas torres de arrefecimento pode ser forçado ou por tiragem natural, sendo que na situação do escoamento ser forçado, geralmente são utilizados ventiladores de insuflação ou de extracção.

Em algumas torres, a água é aspergida em gotas no topo da torre, de modo a aumentar a área de contacto entre ar e água; noutros casos a água passa por favos, dividida em muitos fios de água, sendo o objectivo também aumentar a área de contacto entre ar e água.

Este tipo de unidades de refrigeração apresentam as seguintes vantagens:

- elevada eficiência devida ao seu escoamento em contra-corrente;
- facilidade de manutenção.

Apresentam como principais desvantagens:

- consumo de energia dos ventiladores e bomba;
- ruído gerado pelos ventiladores.

O presente estudo tem como objectivo estudar a transferência de calor entre a água e o ar numa torre de arrefecimento em que a água é pulverizada. Neste estudo está também incluído a construção de um modelo matemático e a sua validação experimental, que traduza a evolução das temperaturas dos fluidos (água e ar) ao longo da torre de arrefecimento. Será feita a comparação entre os valores obtidos experimentalmente, numa torre de arrefecimento instalada no Laboratório de Fluidos e Calor do Instituto Superior de Engenharia do Porto, e os valores previstos por um modelo matemático.

A torre de arrefecimento utilizada neste estudo, funciona de modo que a água e o ar escoam segundo a vertical, em sentidos opostos: a água de cima para baixo, por gravidade, e o ar de baixo para cima, insuflado por ventiladores.

Para a insuflação de ar na torre de arrefecimento estão colocados na parte inferior dois ventiladores que forçam o escoamento do ar com um caudal mássico médio na ordem dos 2,340 kg/s (ver Anexo A).

A água de que circula na torre de arrefecimento é aquecida por umas resistências eléctricas aquando da sua passagem por dois reservatórios, onde estão essas resistências instaladas, resistências estas que apresentam uma potência eléctrica total na ordem dos 3800 W, pretendem simular uma instalação de onde a torre deveria extrair calor.

A água é aspergida pelo topo da torre de arrefecimento com um caudal médio na ordem dos 0,120 kg/s (ver Anexo A). A água que chega à base da torre é recirculada com uma bomba.

## **CAPÍTULO 2: Instalação e Instrumentação**



## 2 - Instalação

### 2.1 - Torre de Arrefecimento

A torre de arrefecimento, ver Figura 1, alvo deste estudo foi parcialmente construída no Laboratório de Fluidos e Calor e nas oficinas do ISEP com a colaboração da empresa Ventilinha – Comércio e Indústria de Equipamento, Lda.. Esta torre de arrefecimento foi essencialmente concebida por Leonardo Ribeiro, docente do ISEP, com base em torres de arrefecimento já existentes no mercado. Contudo, grande parte das torres de arrefecimento espalhadas pelas empresas portuguesas aumentam a área de transferência de calor entre a água e ar à custa de um miolo de favos, enquanto que nesta torre se pulveriza a água para o mesmo efeito. Durante este trabalho foi revista toda a instalação mecânica (ligações, ramada de pulverizadores, ventiladores e bomba); montou-se um contador para a água; também se projectou e construiu o quadro eléctrico; usou-se um novo sistema de aquisição de dados e respectivo *software* de aquisição (National Instruments).

A construção é em chapa galvanizada e em painéis de alumínio, sendo a parede posterior em acrílico para permitir visualizar a queda das gotas de água. O ar é admitido pela parte inferior da torre de arrefecimento e a água é aspergida pelo topo, fazendo-se a transferência de calor água-ar em contra corrente. Os desenhos técnicos (eléctrico e de construção) estão no Anexo B.



Figura 1 – Torre de Arrefecimento.

Para a insuflação do ar no interior da torre utilizaram-se dois ventiladores conforme se pode observar na Figura 2. Estes ventiladores têm uma potência de 0,25 kW, colocados dentro das condutas de admissão de ar. Cada uma destas condutas dispõe de uma válvula tipo borboleta que permite a regulação grosseira do caudal de ar insuflado dentro da torre de arrefecimento, ver Figura 3.

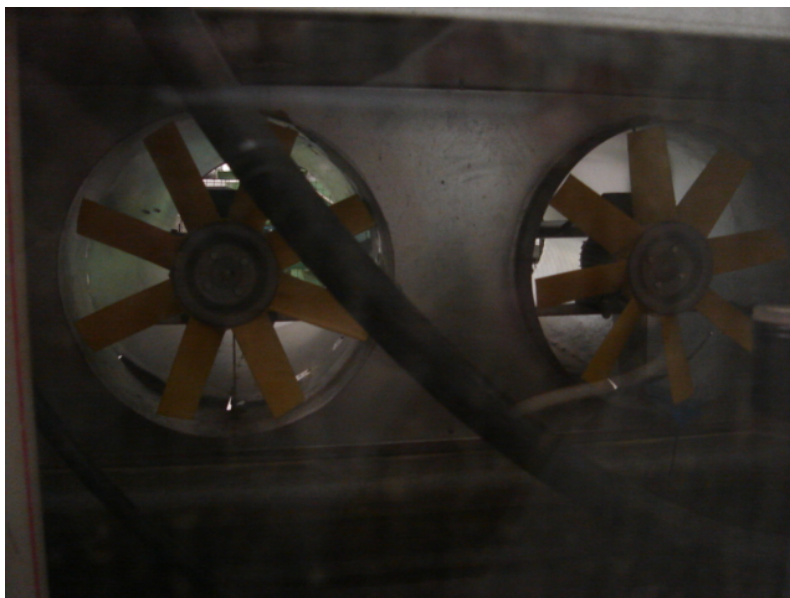


Figura 2 – Ventiladores.

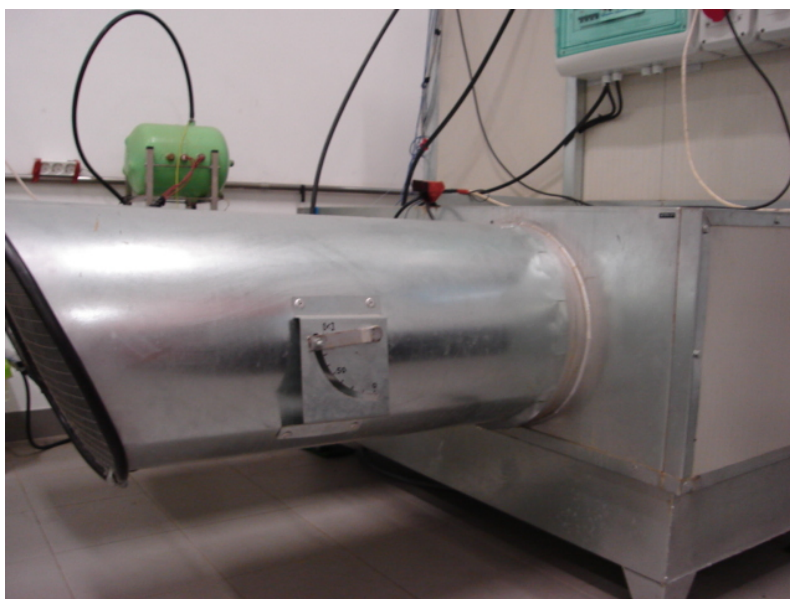


Figura 3 – Dispositivo de regulação do caudal de ar.

A bomba utilizada para circular a água é do tipo submersível da marca EFAFLU, modelo E -SDB. Foi colocada no interior da torre de arrefecimento.

Foram colocadas no interior da torre duas varas verticais onde foram aplicados os termopares para a medição da temperatura da água, ver Figura 4. Os termopares utilizados são do tipo T, seleccionados tendo em conta a gama de temperaturas em que decorreram os ensaios.



Figura 4 – Termopares e bomba circuladora de água.

A água é aquecida através de resistências eléctricas, cuja potência total é de aproximadamente 3840 W. Essas resistências estão no interior dos dois depósitos verdes, que se vêem no lado esquerdo da Figura 1.

## 2.2 – Esquema de funcionamento

O modelo que serviu como base de estudo está esquematizado na figura seguinte:

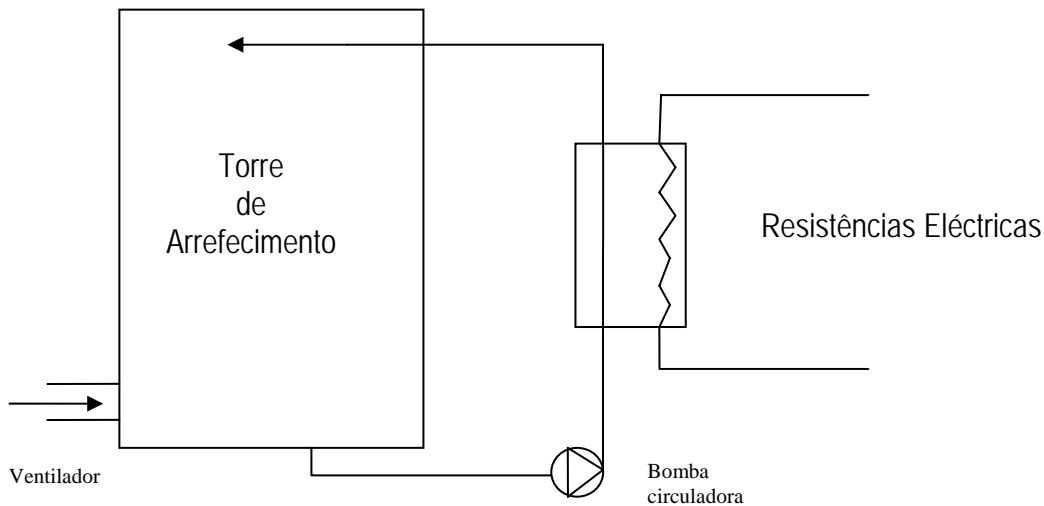


Figura 5 – Esquema de funcionamento.

A água é aspergida na parte superior da torre, acumula-se no fundo da torre de onde é novamente bombeada para os aspersores em cima, logo o seu fluxo é descendente. A aspersão da água é feita por uma estrutura colocada no topo da torre com um total de 54 aspersores, ver Figura 4. O ar é insuflado dentro da torre pela parte inferior, fluxo ascendente. A troca de calor entre os dois fluidos é feita em contra corrente. A água é aquecida por cinco resistências que simulam uma carga térmica.

## 2.3 - Instrumentação

Nos parágrafos seguintes descrevem-se os equipamentos e a instrumentação usados neste estudo.

### 2.3.1 - Aquisição de dados

Tendo necessidade de recolher e armazenar uma quantidade considerável de dados recolhidos experimentalmente, recorreu-se a um sistema de aquisição de dados.

O sistema utilizado possui as principais características:

- placa de circuitos '*ON-Board*', da National Instruments, modelo PCI 435;
- *VI Data Logger*, PCI card, de conversão de sinal, da marca National Instruments, modelo TBX 68 T, com compensação directa de junta fria e auto-zero, para medição directa de termopares, ver Figura 5. Possui 15 canais de entrada e ligação a placa PCI card através de cabo de 68 pinos;
- computador *Pentium IV*, HT 3.0 GHZ e 512 MB de memória RAM, para efectuar a recolha e armazenamento dos dados convertidos pelas placas.

Usaram-se as seguintes plataformas:

- Windows XP, da Microsoft;
- Measurement & Automation Studio, da National Instruments;
- Microsoft Office 2000 Excel.



Figura 6 – Placa de circuitos ‘ON-Board’ CJC, modelo TBX 68T.

### 2.3.2 - Anemómetro digital da KIMO, modelo AMI 301

Para a medição da velocidade e caudal de ar na torre arrefecimento foi utilizado o anemómetro da figura seguinte, ver Figura 7. Determinaram-se os perfis de velocidade do ar em duas secções transversais da torre, a diferentes alturas. Os perfis de velocidade do ar em qualquer uma dessas secções são muito irregulares, assim sendo calculou-se o valor da velocidade média para cada secção, e com esse valor e a área da secção, determinou-se o caudal de ar.

O anemómetro digital possui um sistema capaz de identificar todo o tipo de sondas que lhe são ligadas. Para a medição da velocidade do ar na torre de arrefecimento foi utilizado a função de anemómetro com uma ventoinha de 100 mm de diâmetro.

As gamas de funcionamento e correspondentes precisões e resoluções para o anemómetro são as seguintes:

- intervalo de medição de 0,20 a 3 m/s, precisão de  $\pm 2\%$  da leitura máxima, ou seja  $\pm 0,06$  m/s e resolução de  $\pm 0,01$  m/s;
- intervalo de medição de 3,1 a 35 m/s, precisão de  $\pm 2\%$  da leitura máxima, ou seja  $\pm 0,7$  m/s e resolução de  $\pm 0,1$  m/s.

Características adicionais do anemómetro:

- apresentação automática da média dos valores medidos;
- medição ponto a ponto;
- medição automática.



Figura 7 – Aparelho multifunções digital e anemómetro.

### 2.3.3 – Psicrómetro

Para a medição da temperatura do bolbo húmido e do bolbo seco do ar exterior, envolvente á torre, foi usado um psicrómetro da marca Casella London, Lda. disponibilizado pelo Laboratório de Fluidos e Calor. A gama de temperaturas dos dois termómetros (bolbo seco e húmido) situa-se entre os 0 e os 50 °C, com uma resolução de 0,5 °C.



Figura 8 – Psicrómetro.

### 2.3.4 - Contador de água

De modo a medir a quantidade de água circulada pela bomba durante os ensaios, utilizou-se um medidor volumétrico de transmissão magnética com reduzida perda de carga. A marca deste aparelho é Sappel, modelo Altair, ver Figura 9.

Características:

- caudal nominal  $Q_n = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- pressão máxima de 16 bar;
- temperatura máxima de funcionamento de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- resolução de  $0,001 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Os caudais volúmicos de água foram determinados com as leituras deste contador e com o correspondente tempo de duração dos ensaios, medido com um cronómetro.



Figura 9 – Contador de água.

## **CAPÍTULO 3: Procedimento Experimental**



### 3 – Experimental

#### 3.1 - Procedimentos

##### 3.1.1 - Medição dos caudais de ar e de água

Para determinar os caudais de ar e água fornecidos pelos ventiladores e pela bomba, utilizaram-se os seguintes métodos:

##### 3.1.1.1 - Medição de caudal de ar

Para a medição do caudal de ar escolheram-se duas secções transversais da torre, e dividiu-se a área total de cada uma dessas secções em seis partes exactamente iguais, ver Figura 10. Essas secções transversais da torre, situam-se a 15 e 40 cm, abaixo do topo da torre de arrefecimento. Estas cotas foram escolhidas aleatoriamente.

Efectuou-se um ensaio para cada secção de ambas as secções, retirando-se cerca de 15 a 25 leituras por cada uma das seis secções. Das medições efectuadas chegou-se a um valor médio da velocidade de 3,32 m/s com um desvio padrão de 0,43 para a secção à cota de 15 cm e um valor médio da velocidade de 3,22 m/s, com um desvio padrão de 0,43 para secção à cota de 40 cm. Após a análise dos valores obtidos, observou-se que a diferença dos caudais de ar em ambas as secções é muito pequena e portanto considerou-se que o caudal é o mesmo ao longo de toda a torre de arrefecimento. O caudal médio correspondente a estas medições é de 2,340 m<sup>3</sup>/s. Os ensaios referidos foram efectuados a uma temperatura de 20,9 °C e P<sub>atm</sub> de 745,6 mmHg.

Para a medição destas velocidades, foi utilizado o anemómetro digital referido em 2.3.2.

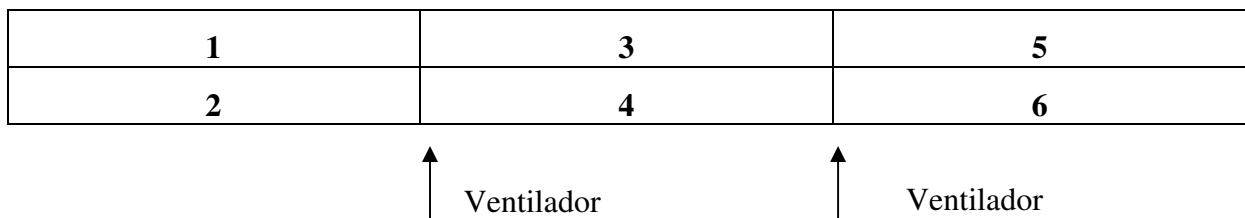


Figura 10 – Esquema de secções para medição de caudal de ar.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores das velocidades médias por secção nas diferentes cotas de medição.

Tabela 1 – Valores da velocidade do ar (m/s)

**h= 15 cm**

(valor medido/desvio padrão/nº leituras)

3,52/0,14/21	2,64/0,53/15	3,80/0,50/21
3,70/0,18/16	2,46/0,62/16	3,83/0,62/25

Tabela 2 – Valores da velocidade do ar (m/s)

**h= 40cm**

(valor medido/desvio padrão/nº leituras)

3,32/0,14/19	1,67/0,88/17	3,58/0,58/24
3,71/0,30/18	2,62/0,62/18	4,42/0,47/24

Obtiveram-se então os perfis de velocidade, que constam nas figuras apresentadas na página seguinte, ver Figuras 11 e 12. Depois de se obter as velocidades médias, por secção, determinou-se o valor do caudal de ar em função da área de cada secção. E assim obteve-se um valor total médio de 2,340 kg/s.

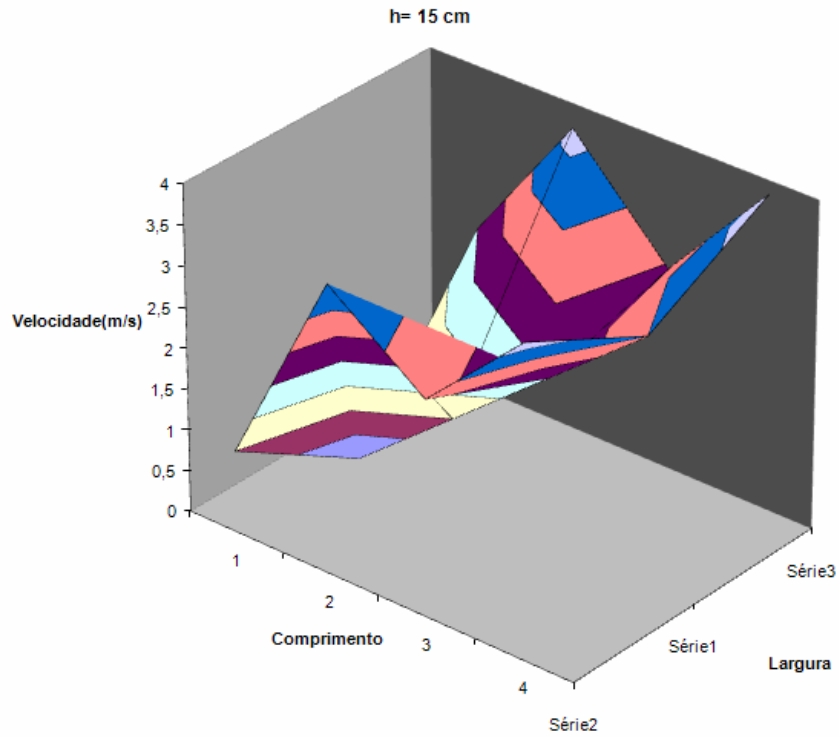


Figura 11 – Perfil de velocidades do ar para secção transversal da torre a 15 cm do topo.

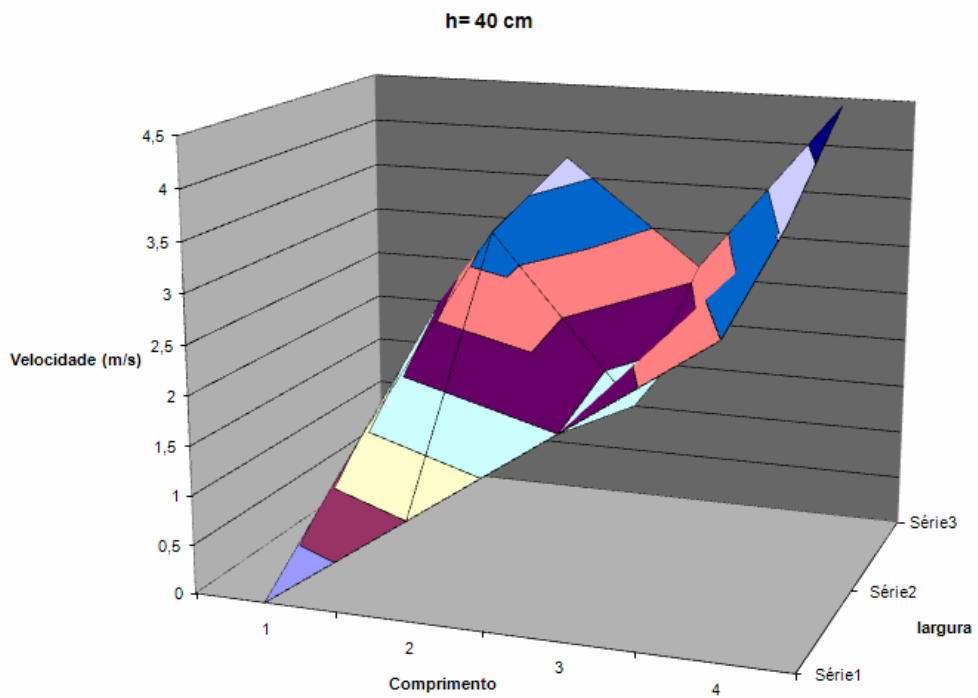


Figura 12 – Perfil de velocidades do ar para secção transversal da torre a 40 cm do topo.

### 3.1.1.2 - Medição de caudal de água

Para a medição do caudal de ar utilizou-se um contador de água disponível no laboratório de Fluidos e Calor do Instituto Superior de Engenharia do Porto, ver 2.3.4.

Procedeu-se então à calibração do contador. Para isso comparou-se a quantidade de água medida pelo contador, com a quantidade de água, que durante o mesmo tempo era recolhida num recipiente graduado, colocado após o contador. No gráfico seguinte, ver Figura 13, comparam-se as quantidades de água medidas pelo contador com as quantidades de água recolhidas pelo depósito. Nesta figura está representada a curva que correlaciona os valores medidos e os calculados, bem como o respectivo coeficiente de correlação.

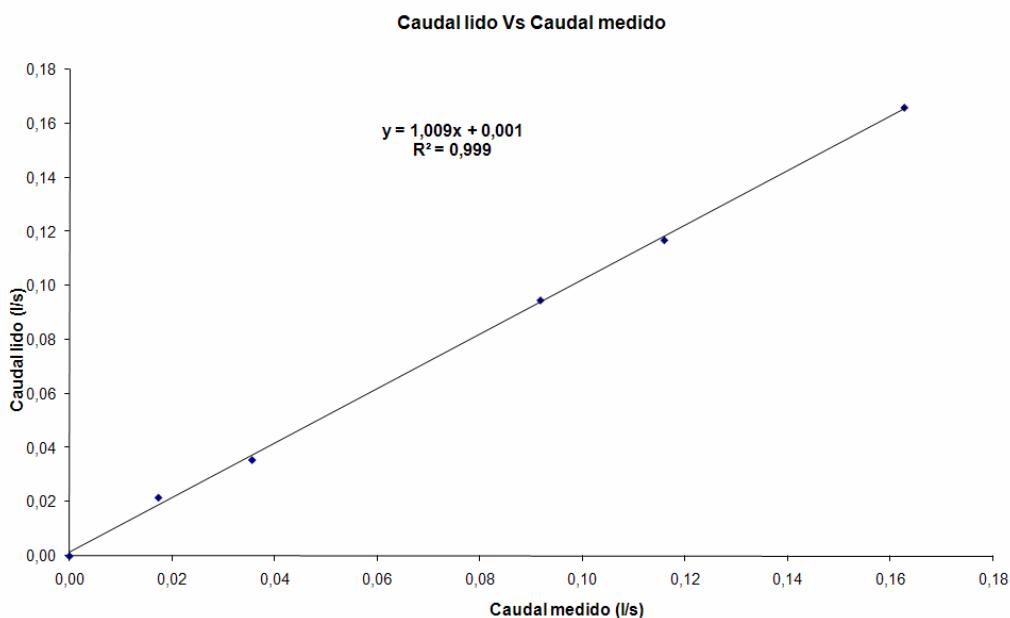


Figura 13 – Curva de calibração do contador.

### 3.1.2 - Medição do diâmetro das gotas

Houve necessidade de estimar o diâmetro médio das gotas de água, para cálculos do coeficiente de transferência de calor entre essas gotas e o ar. Essa estimativa foi feita recorrendo a fotografias das gotas de água em queda, tendo como fundo papel milimétrico, ver Figura 14 e 15. Foram tiradas fotos em planos horizontais e verticais. Como se pode observar os diâmetros das gotas variam entre 1 e 3 mm.

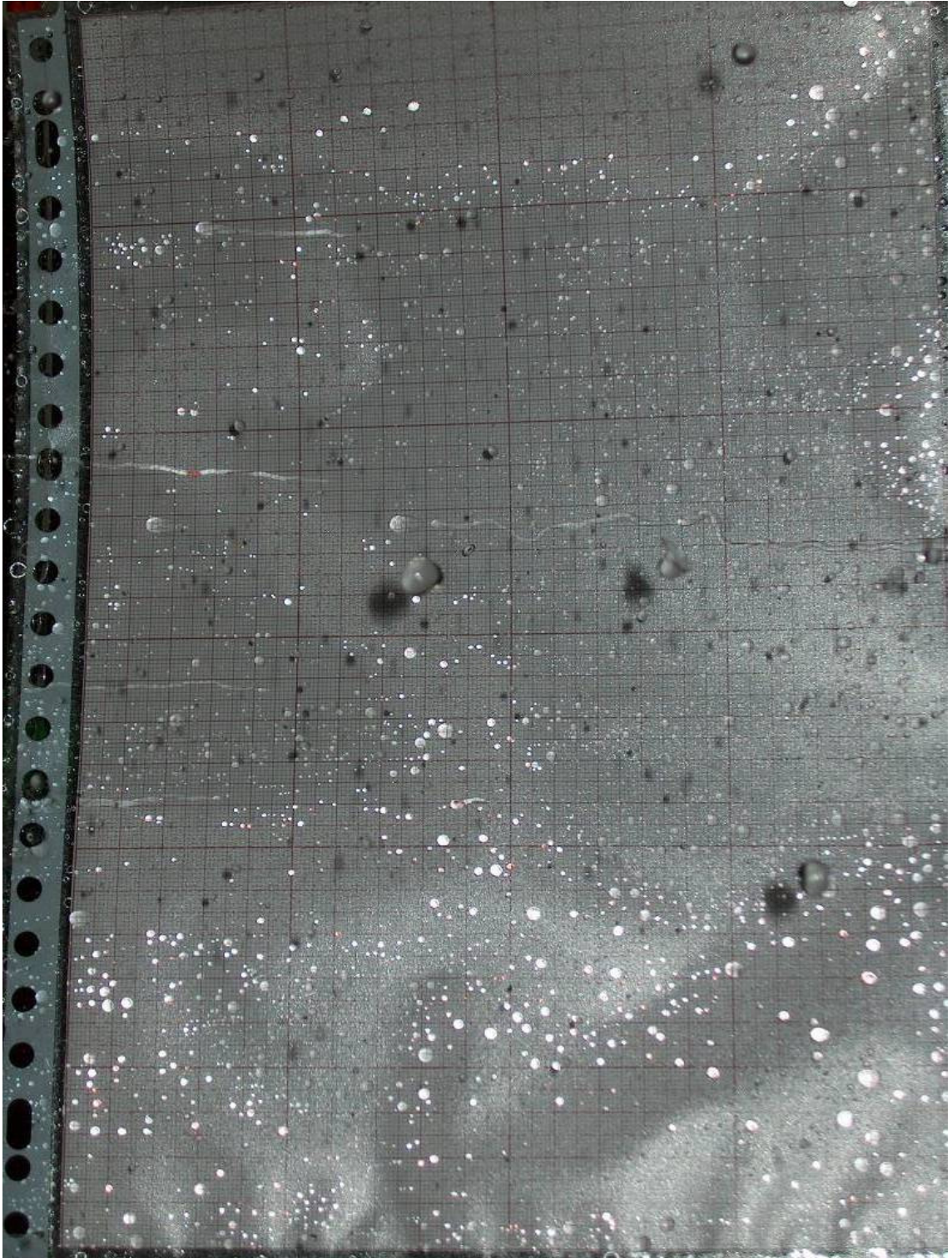


Figura 14 – Fotografia vertical de gotas de água em queda na torre de arrefecimento, junto aos aspersores.  
Caudal de água de 0,120 kg/s, caudal de ar de 2,340 kg/s.



Figura 15 – Fotografia horizontal de gotas de água em queda na torre de arrefecimento, junto aos aspersores.  
Caudal de água de 0,120 kg/s, caudal de ar de 2,340 kg/s.

### 3.2 – Procedimento de ensaio

Para medir as temperaturas da água ao longo da torre foram colocados termopares dentro de pequenos copos, aplicados em duas varas colocadas verticalmente dentro da torre, ver Figuras 16, 17 e 18. Esses copos foram aplicados de modo a que a distância entre dois copos consecutivos fosse sempre aproximadamente a mesma. Na vara esquerda foram colocados termopares às seguintes cotas: 0,0, 0,717 e 1,040 m; no tubo da direita foram colocados às cotas: 0,220, 0,545, 0,875, 1,212, e 1,430 m, medidos a partir do nível de água no fundo da torre.

Os termopares foram mergulhados dentro dos copos para que desta forma se medisse apenas a temperatura da água. Caso as extremidades dos termopares estivessem expostas às correntes de ar e gotas de água, os valores das temperaturas que iríamos obter seria de uma mistura ar/água e não apenas da água como pretendido. O volume dos copos era reduzido, cerca de  $5 \text{ cm}^3$ , para permitir uma renovação rápida da água dentro do copo.

Inicialmente estavam apenas colocadas duas varas verticais (ver Figura 16- vara verde e vara cinzenta), e um total de oito termopares. Posteriormente colocou-se uma terceira vara (ver Figura 18 – vara azul) com mais três termopares, colocados em níveis um pouco acima dos ventiladores, de modo verificar se a evolução da temperatura da água ao longo da vara central (Figura 18 – vara azul) era semelhante à evolução da temperatura ao longo das outras duas varas verticais (ver Figura 18- vara verde e vara cinzenta) que estavam colocadas nas extremidades da torre. A introdução desta terceira vara justifica-se pelo facto de os perfis de velocidade do ar terem valores mínimos na zona central das secções rectas da torre de arrefecimento. No entanto verificou-se que a evolução da temperatura da água ao longo das três varas era semelhante.

Estes termopares foram inseridos no interior das varas de polipropileno, para que ficassem protegidos de perturbações electromagnéticas originadas pelos motores da bomba e dos ventiladores. Para o mesmo efeito, foi aplicado um verniz nas extremidades dos termopares.

Os termopares foram ligados a uma placa de aquisição de dados de modo a possibilitar a recolha das leituras. Imediatamente antes de cada ensaio mediu-se o valor das temperaturas de bolbo húmido,  $T_{BH}$ , e de bolbo seco,  $T_{BS}$ , do ar exterior à torre para se determinar a entalpia do ar à entrada da torre, através do recurso ao diagrama psicrométrico.

O caudal de ar manteve-se constante durante cada ensaio.

A potência fornecida à água pelas resistências foi também constante durante cada ensaio.

Os ensaios realizados tiveram duração de cerca de 15 minutos de modo a não saturar o ar no local onde a torre se encontra instalada. Se se permitisse que o ar exterior à torre evoluísse no sentido de ficar saturado, isso contrariaria a intenção de realizar os ensaios em regime permanente.

A recolha de dados foi efectuada com intervalos de cerca de 1,4 segundos pelo sistema de aquisição de dados. Após a recolha das leituras obtidas procedeu-se ao tratamento dos dados, elaborando tabelas e gráficos para uma melhor compreensão dos resultados.



Figura 16 – Aspecto geral da colocação dos termopares e aspersores.

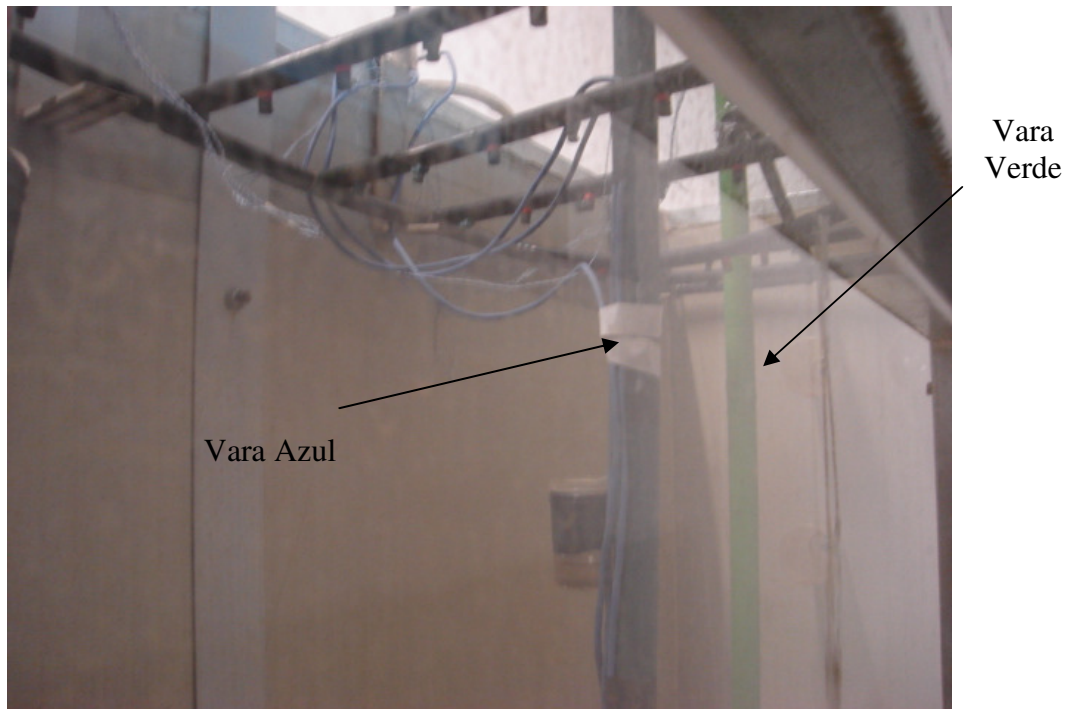


Figura 17 – Disposição e colocação de termopares.

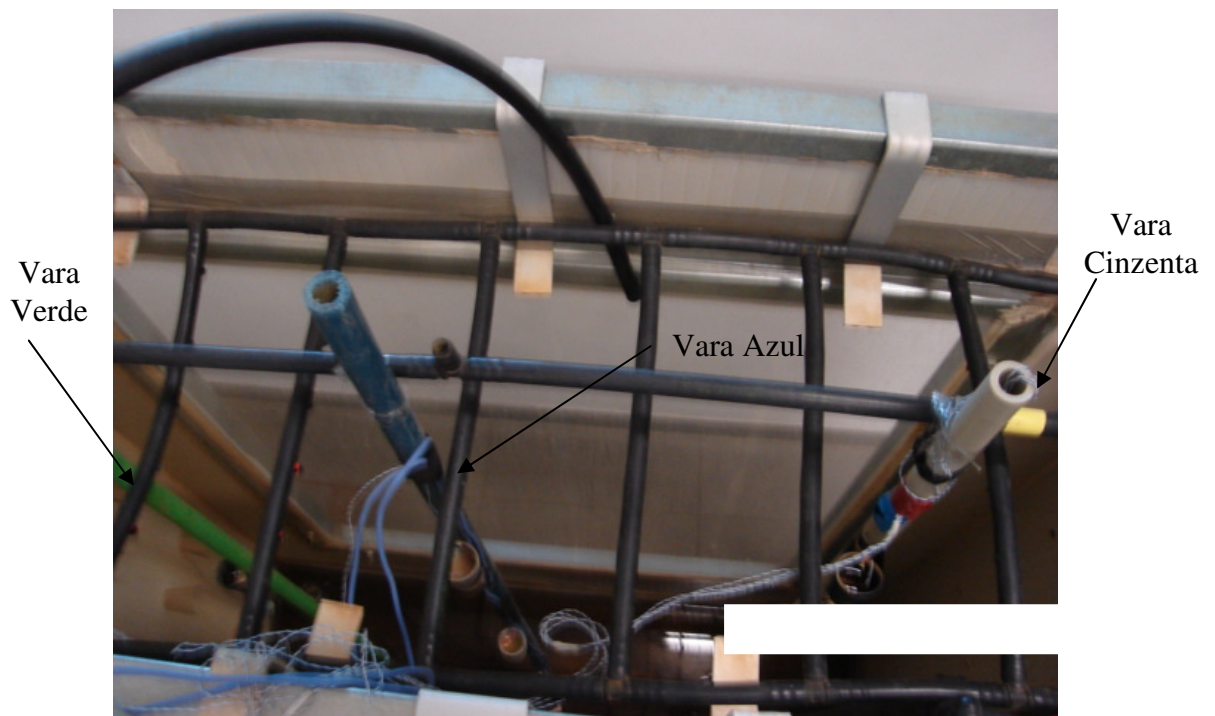


Figura 18 – Aspecto geral da colocação dos termopares.



## **CAPÍTULO 4: Resultados Experimentais**



#### 4 – Resultados experimentais

Conforme já referido anteriormente, durante os ensaios foi medida a temperatura da água ao longo da torre, nos pontos determinados pelas colocações dos termopares.

Seguem-se os gráficos com os resultados obtidos. Nos gráficos os pontos representam as médias aritméticas das temperaturas medidas. Todas as tabelas, com medições e cálculos, relativas aos ensaios efectuados podem ser consultadas no Anexo E.

Efectuaram-se os seguintes ensaios, para as seguintes condições iniciais, conforme indicado na Tabela 3. Estes ensaios foram efectuados, fixando o caudal de ar, a potência das resistências e para diferentes caudais de água.

Tabela 3 – Ensaios efectuados

Ensaio	Temperatura bolbo seco	Temperatura bolbo húmido	Potência das resistências	Caudal de água	Caudal de ar
-	°C	°C	W	kg/s	kg/s
1	18,5	13,5	3840	0,121	2,340
2	18,0	14,5	3840	0,128	2,340
3	18,6	14,8	3840	0,136	2,340
4	17,3	11,6	3840	0,127	2,340
5	17,1	12,8	3840	0,100	2,340
6	18,3	12,3	3840	0,08	2,340
7	18,8	17,3	3840	0,120	2,340
8	19,8	18,0	3840	0,119	2,340
9	19,8	18,0	3840	0,121	2,340
10	20,0	18,0	3840	0,122	2,340

De seguida apresentam-se os gráficos obtidos dos ensaios anteriores, ver Figura 19 a Figura 28. Nestes gráficos pode-se observar a evolução da descida da temperatura da água em função da cota da torre de arrefecimento.

Ensaio n.º 1:  
Temperatura da água Vs Cota

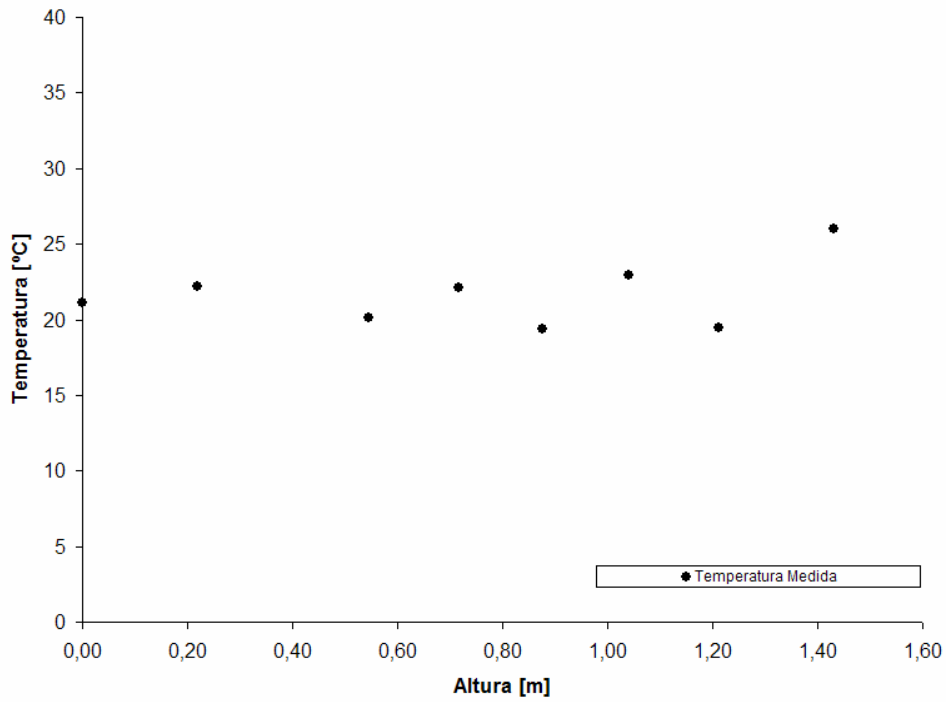


Figura 19 – Temperatura da água vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 31

Ensaio n.º 2:  
Temperatura da água Vs Cota

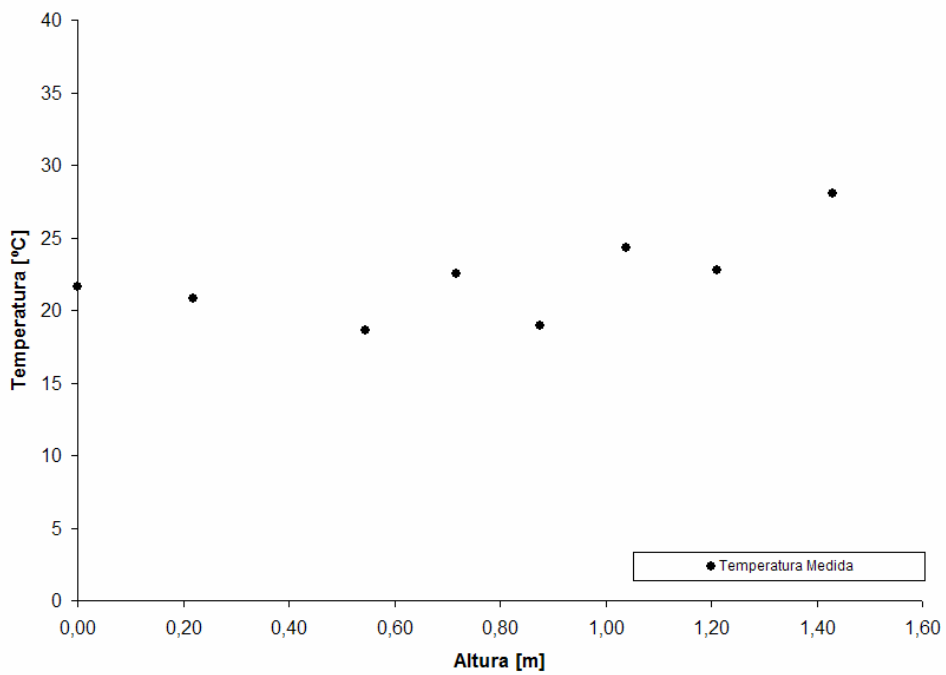


Figura 20 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 33

Ensaio n.º 3:  
 Temperatura da água Vs Cota

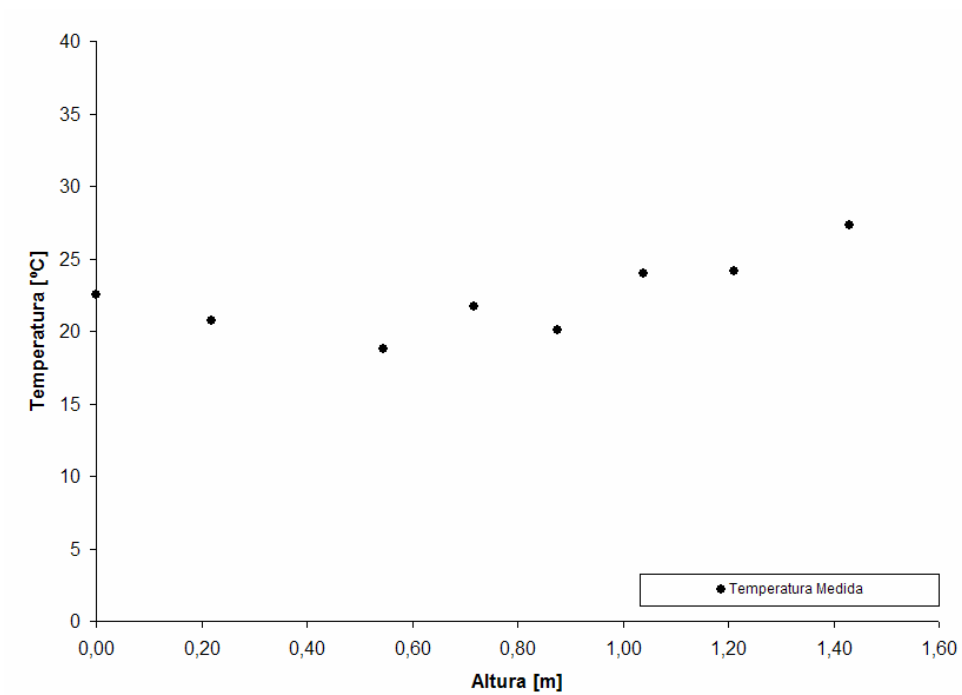


Figura 21 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 35

Ensaio n.º 4:  
 Temperatura da água Vs Cota

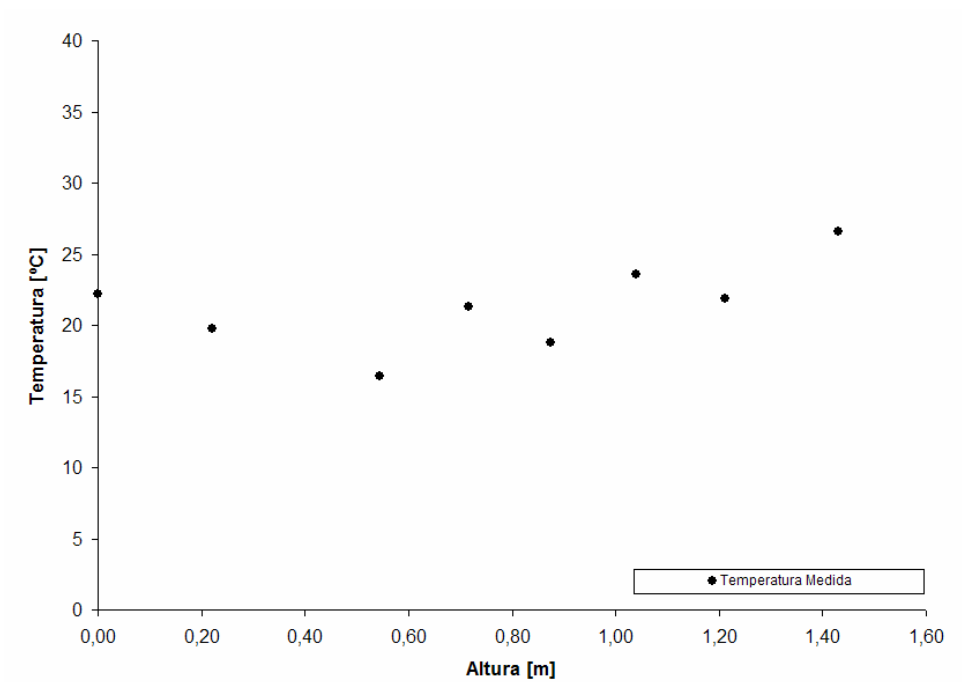


Figura 22 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 37

Ensaio n.º 5:  
Temperatura da água Vs Cota

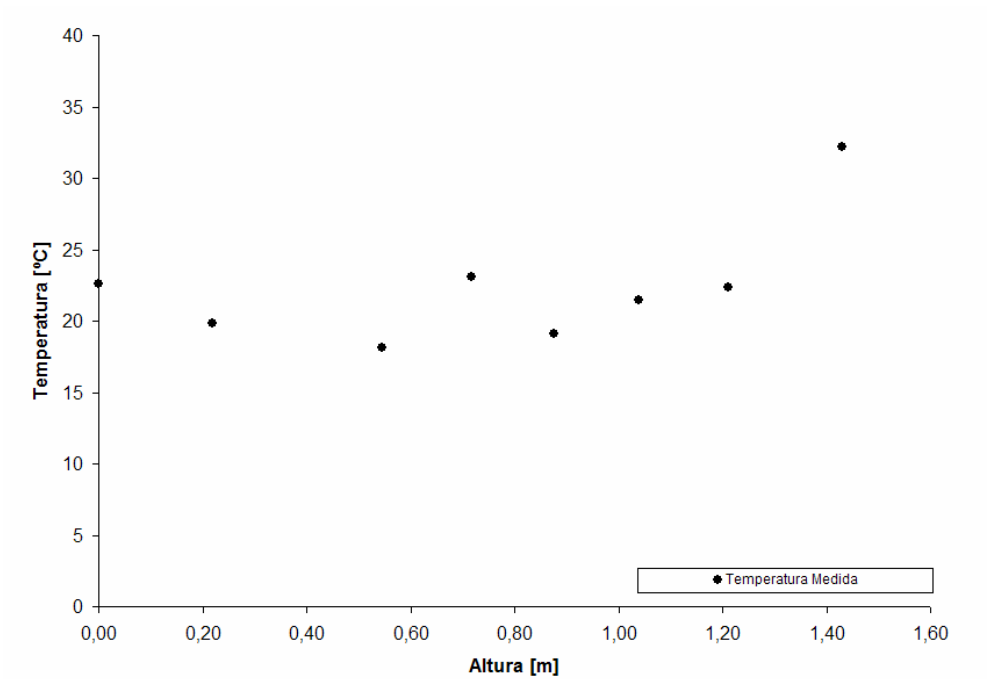


Figura 23 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 39

Ensaio n.º 6:  
Temperatura da água Vs Cota

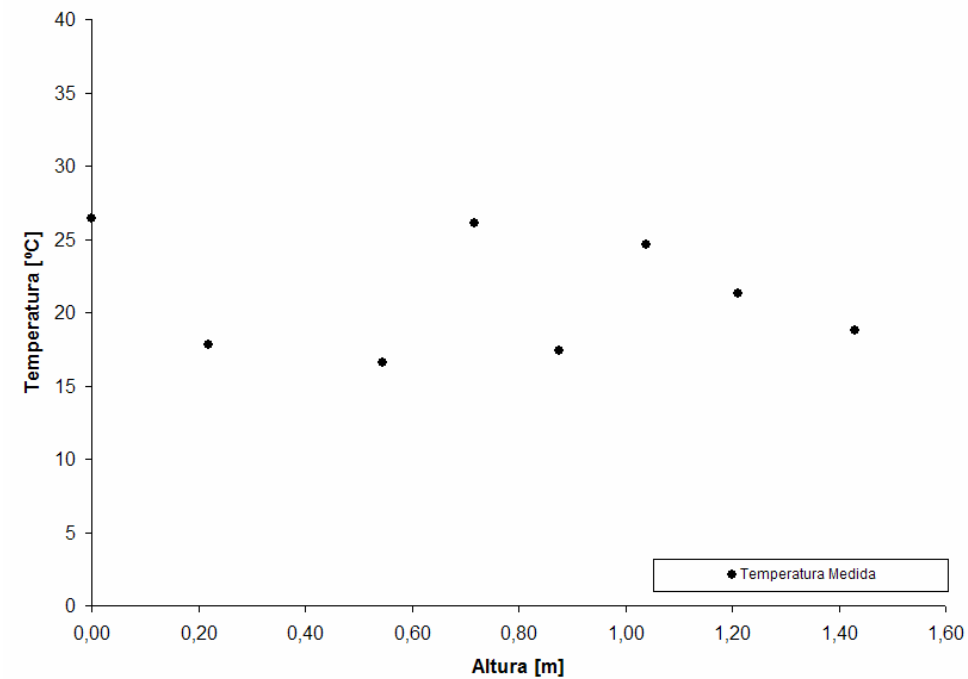


Figura 24 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 41

Ensaio n.º 7:  
 Temperatura da água Vs Cota

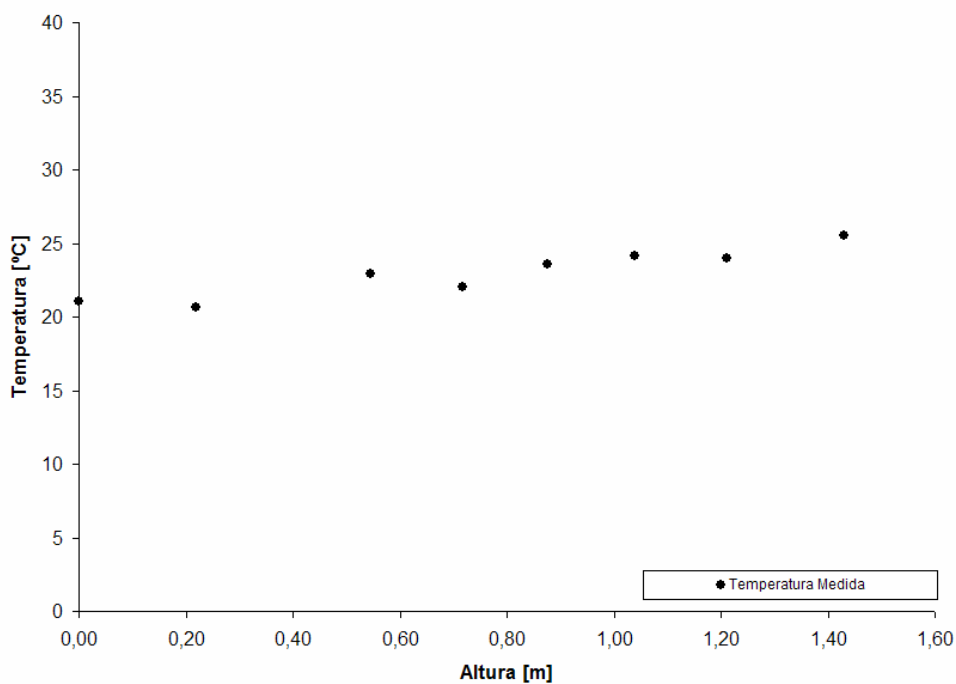


Figura 25 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 43

Ensaio n.º 8:  
 Temperatura da água Vs Cota

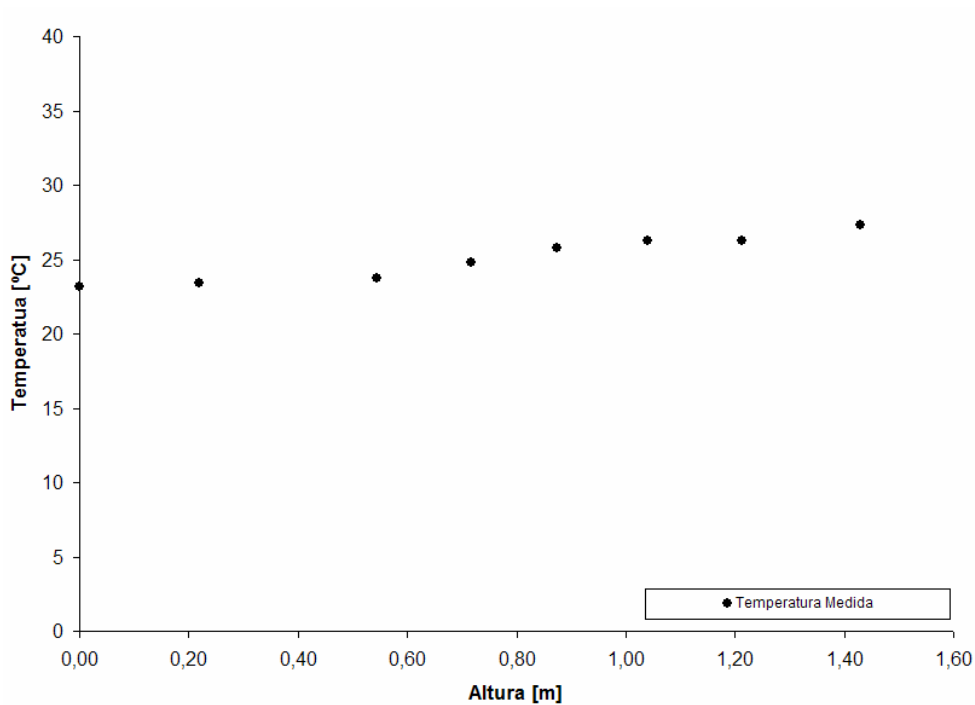


Figura 26 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 45

Ensaio n.º 9:  
Temperatura da água Vs Cota

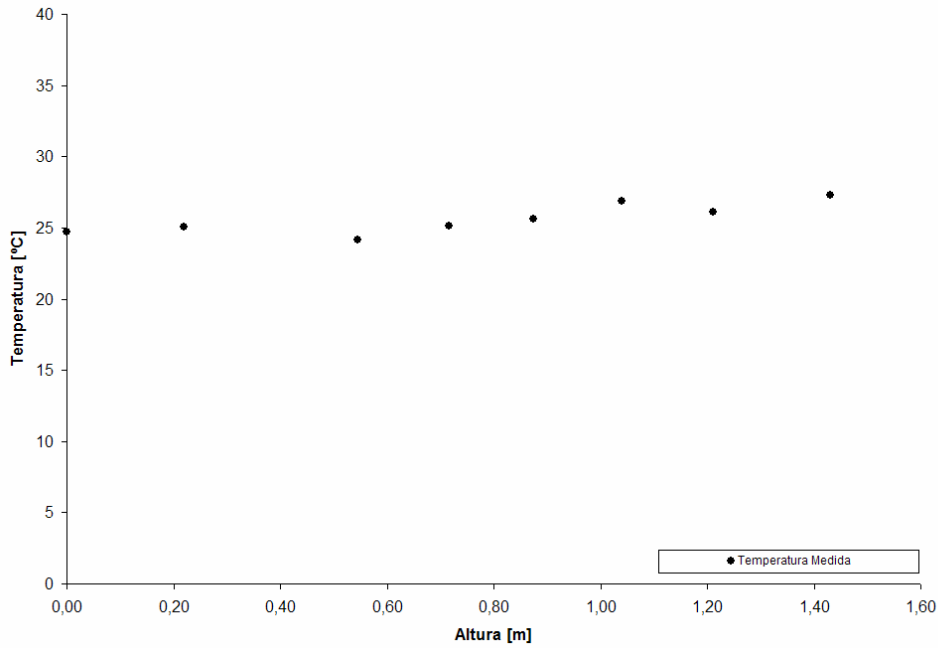


Figura 27 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 47

Ensaio n.º 10:  
Temperatura da água Vs Cota

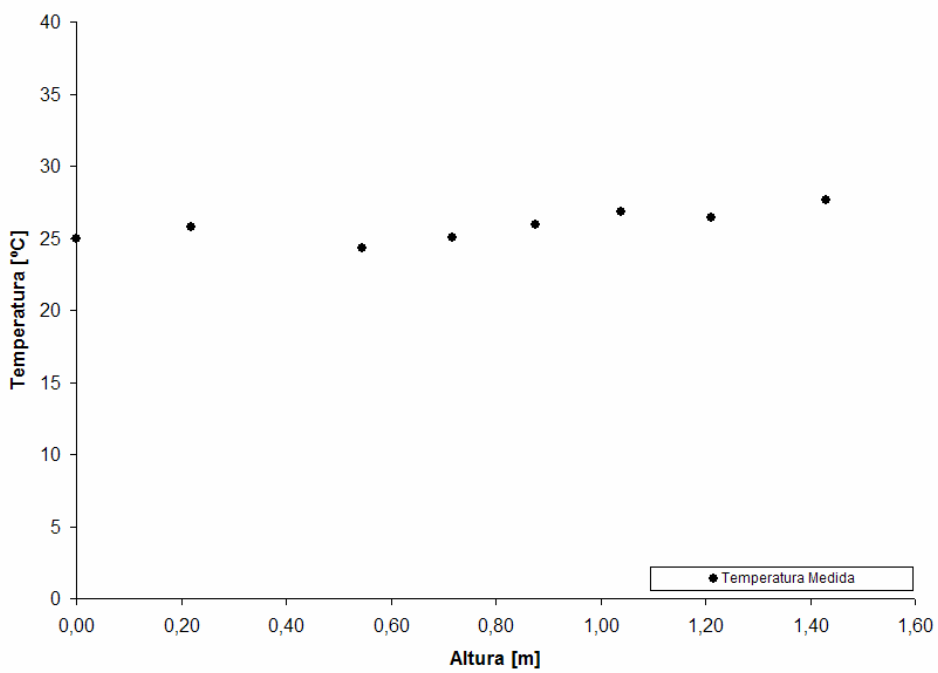


Figura 28 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 49

De uma forma geral a temperatura da água desce quase linearmente em função da cota, para todos os ensaios efectuados. Verifica-se que na maior parte dos ensaios existe um desvio para cima da temperatura no fundo da torre de arrefecimento em relação à tendência representada pelas restantes temperaturas medidas em níveis superiores. É provável que este facto se deva a perturbações por correntes electromagnéticas geradas pelos motores dos ventiladores, embora se tentasse minimizar esta perturbação cobrindo as extremidades dos termopares com verniz.



## **CAPÍTULO 5:** Modelo matemático e análise de resultados



## 5 – Modelo matemático e análise de resultados

### 5.1 - Modelo matemático

Considerou-se, para construir o modelo matemático, o interior da torre dividido em várias fatias, tão finas quanto possível, ver Figura 29. Assumiu-se que não há transferência de água das gotas para o ar, e que não há arrastamento, pela corrente de ar para o exterior da torre. Na realidade existe transferência de massa das gotas de água para a corrente de ar e também existe arrastamento das gotas de água para o exterior da torre, principalmente as mais pequenas.

Porém, quanto ao arrastamento verificou-se que a torre perdia cerca de 0,0002 kg/s, valor este muito inferior aos cerca de 0,1 kg/s de água que era circulada pela torre. Por outro lado o caudal de água que evaporaria, caso todo o ar saísse saturado para fora da torre, seria da ordem dos 0,009 kg/s (para uma temperatura do ar húmido na ordem dos 25°C e 50 % de humidade relativa inicial, em que a humidade absoluta é 0,0095 kg água/kg ar seco, e condições finais de saturação do ar, em que a humidade absoluta é de 0,013 kg água/kg ar seco), considerando uma evolução do ar isentálpica.

Assim, é razoável admitir que estes dois fenómenos (transferência de massa e arrastamento) sejam pouco significativos, pelo que se justifica as suposições adoptadas.

#### 5.1.1 - Cálculo do coeficiente característico das torres de arrefecimento, $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$

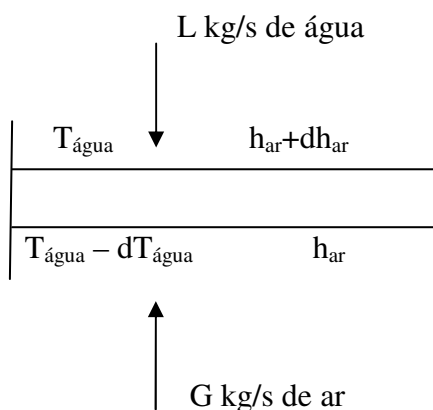


Figura 29 – Exemplo de uma “fatia” da torre

O balanço térmico em cada fatia é dado pela seguinte equação:

$$d_q = Gdh = Lc_{\text{água}} dT, \quad (5.1)$$

em que  $Gdh$  é a potência calorífica recebida pelo ar e  $Lc_{\text{H}_2\text{O}}dT$  é a potência calorífica cedida pela água.

O símbolo  $G$  designa o caudal mássico de ar (ar seco + água contida no ar) e o símbolo  $L$  representa o caudal mássico de água que passa, em forma de gotas, pelo interior da torre de arrefecimento. Por outro lado, a transferência de calor entre as gotas de água existentes no sistema representado pela fatia e o ar é dada por,

$$hdA(T_{\text{interface}} - T_{\text{ar}}) = \frac{hdA}{cp_m}(h_i - h_a), \quad (5.2)$$

em que  $dA$  se refere ao somatório das áreas de todas as gotas existentes na fatia.

Logo,

$$d_q = \frac{hdA}{cp_m}(h_i - h_a) \quad (5.3)$$

em que,

$h$  – coeficiente de transferência de calor entre as gotas e o ar [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$h_i$  – entalpia do ar saturado à temperatura da água ( $\text{J}/\text{kg}$  ar seco)

$h_a$  – entalpia do ar ( $\text{J}/\text{kg}$  ar seco)

$c_{pm}$  – calor específico do ar húmido [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ]

O coeficiente  $\frac{hdA}{cp_m}$  caracteriza termicamente a fatia da torre de arrefecimento, e é dado

por:

$$\frac{hdA}{cp_m} = \frac{d\dot{q}}{h_i - h_a} = c_p L \frac{dT}{h_i - h_a}, \quad (5.4)$$

em que se assumiu que o calor específico,  $c_{\text{água}}$ , da água é  $4200 \text{ J}/(\text{kgK})$ .

Por sua vez o coeficiente  $\frac{hA}{cP_m}$ , que caracteriza termicamente a torre toda é dado por:

$$\int_0^A \frac{hdA}{cP_m} = c_{\text{água}} \times L \int_{t_s}^{t_e} \frac{dT}{h_i - h_a}, \quad (5.5)$$

em que o integral do lado esquerdo é calculado para a área total das gotas de água existentes num dado instante dentro da torre. Assumiu-se que os valores de L e G se mantêm praticamente constantes, ou seja que não existe evaporação de água.

Como é impossível resolver analiticamente a equação anterior, o que se fez foi dividir a torre no máximo número de fatias possível, que é igual ao número de termopares instalados ao longo da torre para medir a temperatura da água menos 1. Assim, o resultado final aproxima-se de um somatório conforme a seguinte equação.

$$\frac{hA}{cP_m} \approx c_{\text{água}} \times L \Delta T \Sigma \frac{1}{(h_i - h_a)_m} \quad (5.6)$$

O cálculo do coeficiente  $\frac{hA_{\text{gotas}}}{cP_{\text{médio}}}$  caracteriza o funcionamento de uma torre de arrefecimento, Stoecker (1979).

Para determinados caudais de água e de ar e para o mesmo tipo de aspersores (ou seja diâmetro e número de gotas de água) este coeficiente deve-se manter constante. Isto justifica-se porque o coeficiente de transferência de calor depende essencialmente da velocidade do ar sobre as gotas e do diâmetro das gotas, que para as condições referidas não variam, e além disso dentro da gama de funcionamento de temperaturas da torre as propriedades dos fluidos varia pouco; por outro lado a área das gotas não varia com os mesmos caudais de água, número e tipo de aspersores; finalmente o  $c_{\text{pmédio}}$  também não varia significativamente dentro da gama de funcionamento da torre.

### 5.1.2 - Perfil de temperaturas da água ao longo da torre de arrefecimento

Para se obter matematicamente a evolução da temperatura da água ao longo da torre, assumiu-se que o  $c_{\text{água}}$  é constante ao longo da queda de água na torre, pressuposto este que não se deve afastar muito da realidade tendo em conta a pequena variação da temperatura da água ao longo da torre. Se também se assumir que a evaporação da água é desprezável então a temperatura da água diminui linearmente ao longo da torre. Por outro lado a água vai perder durante a sua queda na torre de arrefecimento a potência que absorveu das resistências (da instalação industrial consumidora de água fria). Assim:

$$\dot{Q}_{\text{resistência}} = \dot{m}_{\text{água}} \times c_{\text{água}} \times (T_{(x=L)} - T_{(x=0)}) \quad (5.7)$$

em que  $x$  varia conforme indicado na Figura 30. Por outro lado,

$$\frac{T_L - T_0}{L - 0} = \frac{T_x - T_0}{x - 0} \quad (5.8)$$

e assim,

$$T_{(x)} = \frac{x}{L} \times (T_L - T_0) + T_0 \quad (5.9)$$

Pela substituição da equação 5.8 na equação 5.7 obtém-se a seguinte equação,

$$T_L - T_0 = \frac{\dot{Q}_{\text{resistência}}}{\dot{m} c_{\text{água}}} \quad (5.10)$$

Conjugando as equações 5.9 e 5.10 obtém-se,

$$T_{(x)} = \frac{x}{L} \times \frac{\dot{Q}_{\text{resistência}}}{\dot{m} c_{\text{água}}} + T_0 \quad (5.11)$$

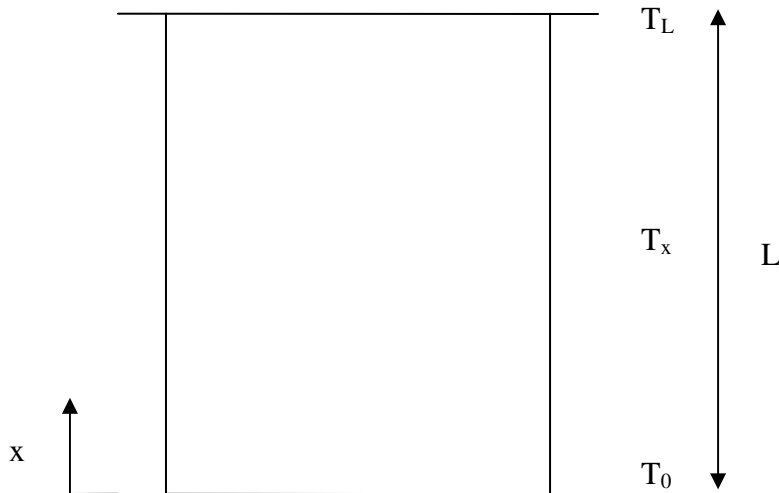


Fig.30 – Representação da temperatura em função do eixo dos xx

### 5.1.3 - Cálculo de $\frac{hA}{cp_m}$ mediante resultados obtidos experimentalmente

Com um dos ensaios efectuados (o 4º ensaio) ilustrar-se-á, com a Tabela 4 os cálculos efectuados para determinar  $\frac{hA}{cp_m}$ . As posições dos termopares (cotas na segunda coluna) representam os limites de cada uma das fatias em que se dividiu a torre. Dividiu-se a torre em sete fatias. A cota em que os termopares foram colocados foi medida a partir do fundo da torre de arrefecimento.

Os termopares 3 e 9 não constam da Tabela 4 porque estavam dedicados à leitura de outras grandezas que não foram utilizados neste estudo.

A temperatura medida (terceira coluna da tabela) obteve-se directamente dos ensaios, através de várias medições. A temperatura calculada foi obtida com base na equação (5.11), sabendo a potência das resistências térmicas e a temperatura da água na base da torre.

Tabela 4 – Valores obtidos para o ensaio nº 4

<b>Termopares</b>	<b>Cota</b>	<b>Temperatura medida água</b>	<b>Temperatura calculada água</b>	<b>Entalpia calculada ar</b>
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	22,16	20,00	30982,00
2	0,220	19,76	21,11	31234,47
4	0,545	16,44	22,74	31607,43
5	0,717	21,27	23,61	31804,81
6	0,875	18,81	24,41	31986,12
7	1,040	23,62	25,24	32175,47
8	1,212	21,84	26,10	32372,86
10	1,430	26,60	27,20	32623,03

A partir da equação (5.1) obteve-se,

$$h_{a,1} - h_{a,0} = \frac{L}{G} \times c_{\text{água}} \times dT_{\text{água}} \quad (5.12)$$

que permitiu calcular a entalpia do ar nas secções limite das fatias em que se dividiu a torre, sabendo as temperaturas da água nessas secções. Para isso calculou-se a entalpia do ar à entrada da torre (x=0) mediante as temperaturas do bolbo seco e do bolbo húmido do ar atmosférico.

Na tabela seguinte, Tabela 5, feita a partir da tabela anterior Tabela 4, estão valores médios referentes a cada uma das 7 fatias em que a torre foi dividida. Na primeira coluna designa-se cada fatia pelos números que designam os termopares que foram colocados nos limites dessa fatia. Na segunda coluna está a cota média da fatia, ou seja, a média aritmética das cotas dos termopares (ver segunda coluna da Tabela 4) colocados nos limites dessa fatia. Os valores da temperatura média da água numa fatia (terceira coluna da Tabela 5) foram calculados com base na média aritmética dos valores de temperatura que constam da Tabela 3 para os limites dessa fatia com base na temperatura calculada. Cálculo semelhante se fez para a obtenção da entalpia média do ar.

Tabela 5 – Valores obtidos e calculados com base no ensaio nº 4

Fatia	Cota média m	Temperatura média água °C	Entalpia média ar J/kg	Entalpia ar saturado kJ/kg	1/(hi-har) kg/J	hA/cp kg/min	ΔT s	Temperatura calculada ar °C
1-2	0,11	20,55	31108,23	59,04	3,58E-05	1,27	1,11	17,25
2-4	0,38	21,93	31420,95	63,96	3,07E-05	1,61	1,64	17,56
4-5	0,63	23,18	31706,12	68,71	2,70E-05	0,75	0,87	17,84
5-6	0,80	24,01	31895,47	72,01	2,49E-05	0,63	0,80	18,03
6-7	0,96	24,82	32080,80	75,35	2,31E-05	0,61	0,83	18,22
7-8	1,13	25,67	32274,16	78,97	2,14E-05	0,59	0,87	18,41
8-10	1,32	26,65	32497,94	83,32	1,97E-05	0,69	1,10	18,63

A entalpia do ar saturado,  $h_i$ , foi calculada com base numa correlação matemática, obtida através do diagrama psicrométrico, entre a temperatura e a entalpia do ar saturado. No gráfico seguinte está representada a entalpia Vs temperatura e a correlação referida, ver Figura 31.

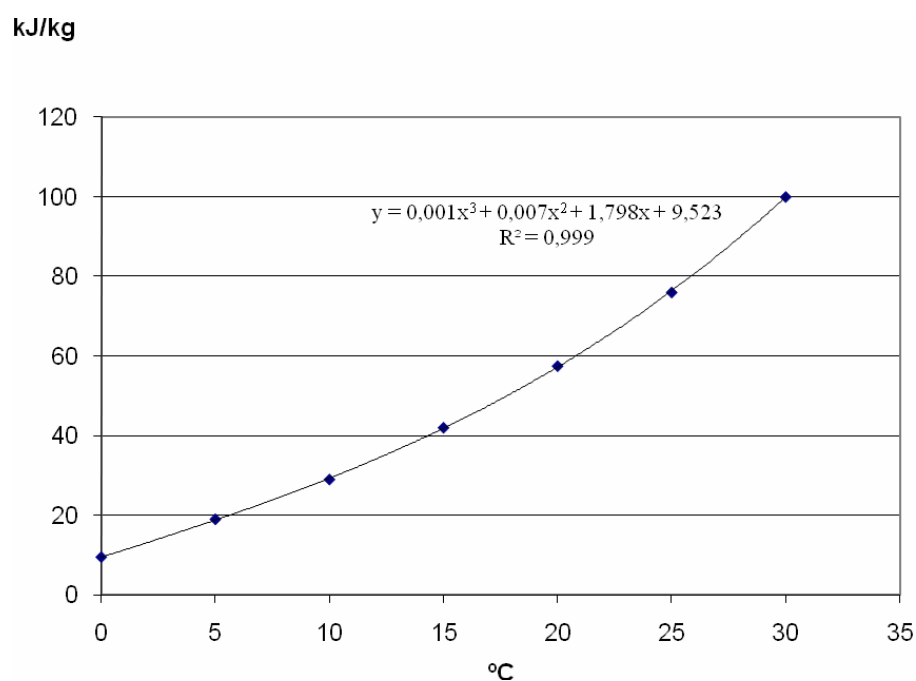


Figura 31 – Curva da evolução da entalpia do ar saturado em função da temperatura (obtido do diagrama psicrométrico)

O coeficiente  $\frac{1}{h_i - h_{ar}}$  foi calculado pela com base nos valores da entalpia média do ar e da entalpia do ar saturado das colunas anteriores. Por sua vez o valor de  $\frac{hA}{cp}$  foi obtido através da equação (5.6),  $\Delta T$  é a diferença entre as temperaturas nos limites de cada fatia constituinte da torre.

O valor da temperatura calculada do ar obteve-se através da equação matemática (5.12) em que as entalpias do ar foram divididas pelo calor específico do ar,  $c_{par}$ , de modo a obter-se as temperaturas.

**5.1.4 - Cálculo de  $\frac{hA}{cp_m}$  mediante o cálculo do coeficiente de transferência de calor h e da área total de gotas de água existentes na torre em dado instante**

**5.1.4.1 - Velocidade de queda das gotas**

Considerou-se que as gotas tinham um formato esférico. As forças, a que uma gota está sujeita, estão representadas na figura seguinte, ver Figura 32.

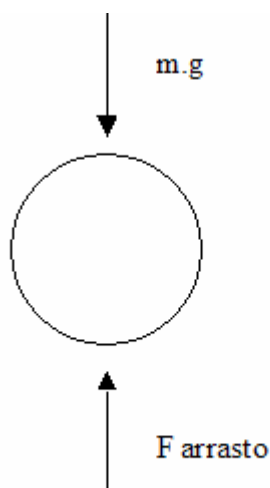


Fig.32 – Diagrama do corpo livre de uma gota em queda

Assim a uma gota em queda aplica-se a seguinte equação:

$$-c_x \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 \frac{\pi d_{gota}^2}{4} + \rho_{\acute{a}gua} \frac{\pi d_{gota}^3}{6} g = \frac{\pi d_{gota}^3}{6} \rho_{\acute{a}gua} \frac{dv_{gota}}{dt}, \quad (5.13)$$

em que  $v$  é a velocidade absoluta do ar em relação à gota de água, ou seja é a soma da velocidade de queda da gota mais a velocidade média de ascensão do ar. Logo:

$$-c_x \frac{1}{2} \rho_{ar} (v_{gota} + v_{ar})^2 \frac{\pi d_{gota}^2}{4} + \rho_{\acute{a}gua} \frac{\pi d_{gota}^3}{6} g = \frac{\pi d_{gota}^3}{6} \rho_{\acute{a}gua} \frac{dv_{gota}}{dt}. \quad (5.14)$$

Como a equação diferencial anterior não é linear, foi integrada com recurso ao método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem. Tomou-se como condição inicial para essa integração a velocidade das gotas à saída dos aspersores, ou seja para  $t=0$  s. Essa velocidade inicial da gota,  $v_{inicial}$ , foi estimada segundo a equação seguinte.

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = n^{\circ} \text{aspersores} \frac{\pi d_{gota}^2}{4} \rho_{\acute{a}gua} v_{inicial}, \quad (5.15)$$

em que o diâmetro da gota foi considerado igual ao diâmetro da saída dos jactos dos aspersores. Nesta instalação o número de aspersores utilizado foi de 54.

O coeficiente de arrasto  $C_x$  foi efectuado através da equação seguinte, White (1994)

$$c_x = \frac{24}{Re_D} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_{d_{gota}}}} + 0,4. \quad (5.16)$$

em que o Reynolds foi calculado pela equação (5.17),

$$Re_{d_{gota}} = \frac{\rho_{ar} (v_{gota} + v_{ar}) d_{gota}}{\mu_{ar}}, \quad (5.17)$$

Após se ter efectuado todas as simplificações adequadas chegou-se à equação seguinte:

$$\frac{dv_{gota}}{dt} = av^2 + b, \quad (5.18)$$

em que,

$$a = \frac{-c_x \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 \frac{\pi d_{gota}^2}{4}}{\rho_{\acute{a}gua} \frac{\pi d_{gota}^3}{6}}, \quad [m^{-1}] \quad (5.19)$$

e

$$b = \frac{\rho_{\acute{a}gua} \frac{\pi d_{gota}^3}{6} \cdot g}{\rho_{\acute{a}gua} \frac{\pi d_{gota}^3}{6}} = g. \quad \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (5.20)$$

#### 5.1.4.2 - Coeficiente de transferência de calor h

O coeficiente de transferência de calor entre as gotas de água e as corrente de ar foi calculado com base na seguinte equação, Incropera e DeWitt (2001),

$$Nu = 2 + 0,6 Re_{d_{gota}}^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (5.21)$$

em que,

$$Nu = \frac{hd_{gota}}{k_{ar}}. \quad (5.22)$$

### 5.1.4.3 - Diâmetro e número de gotas dentro da torre

A massa de água existente dentro da torre num determinado instante é dada por:

$$m_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{água}} t_{\text{queda}}, \quad (5.23)$$

em que o tempo de queda,  $t_{\text{queda}}$ , é obtido através da integração da equação (5.14).

Por outro lado a massa de água é dada pela equação seguinte:

$$m_{\text{água}} = n^{\circ}_{\text{gotas}} \frac{\pi d_{\text{gota}}^3}{6} \rho_{\text{água}}. \quad (5.24)$$

Se o diâmetro da gota for conhecido a equação anterior permite-nos estimar o número de gotas dentro da torre num determinado instante.

O valor de  $h$  foi calculado mediante as equações (5.21) e (5.22).

A área total das gotas existentes na torre é dada por:

$$A_{\text{gotas}} = n^{\circ}_{\text{gotas}} \pi d_{\text{gotas}}^2. \quad (5.25)$$

## 5.2 – Análise de resultados

### 5.2.1 – Temperatura calculada do ar vs altura

As temperaturas do ar que constam dos gráficos seguintes foram calculadas mediante a equação (5.12), e sabendo que  $h_{ar} = c_{par} \times T_{ar}$ . A temperatura da água considerada nos cálculos efectuados com a equação (5.12) foi a temperatura obtida através da equação (5.9).

Todos os gráficos que se seguem baseiam-se nas tabelas do Anexo E.

Ensaio n.º1

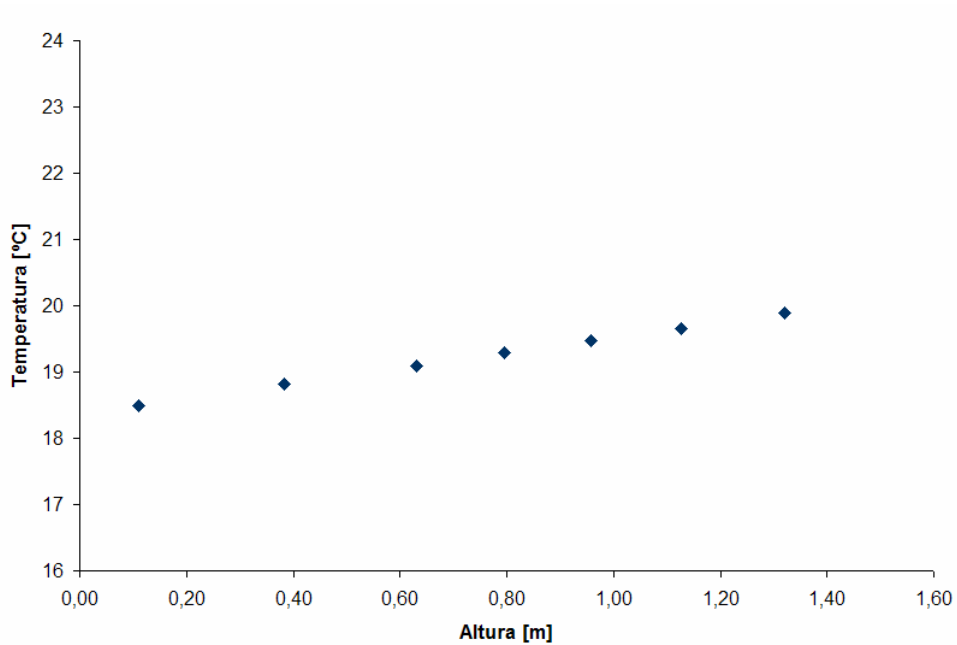


Figura 33 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 31

Ensaio n.º 2

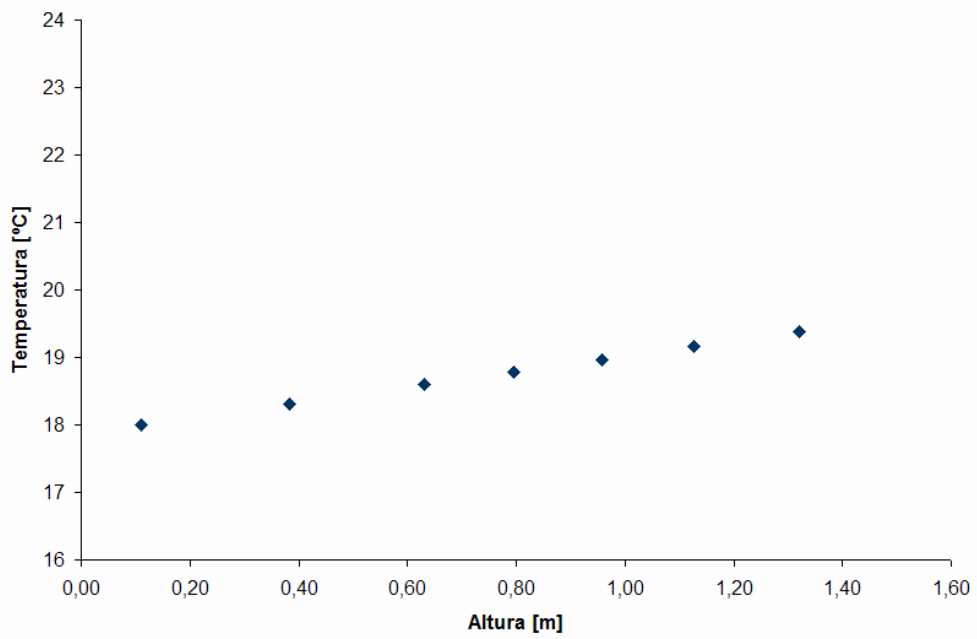


Figura 34 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 33

Ensaio n.º 3

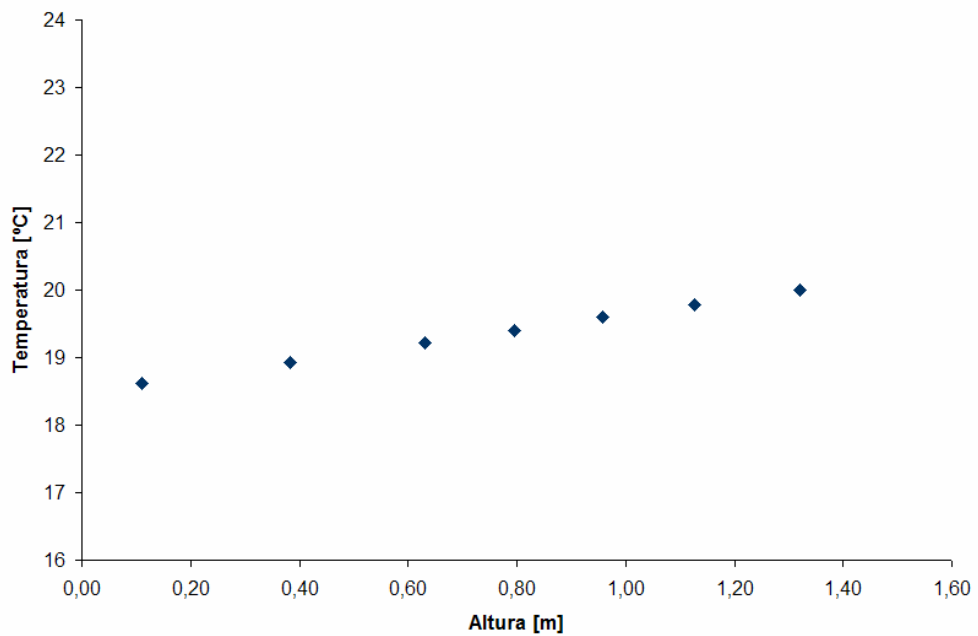


Figura 35 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 35

Ensaio n.º 4

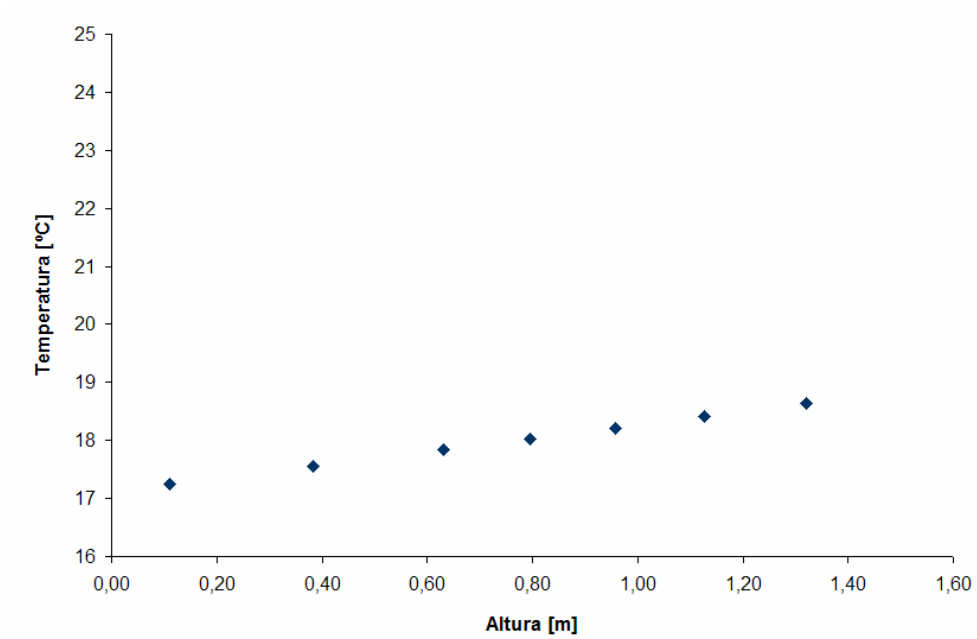


Figura 36 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 37

Ensaio n.º 5

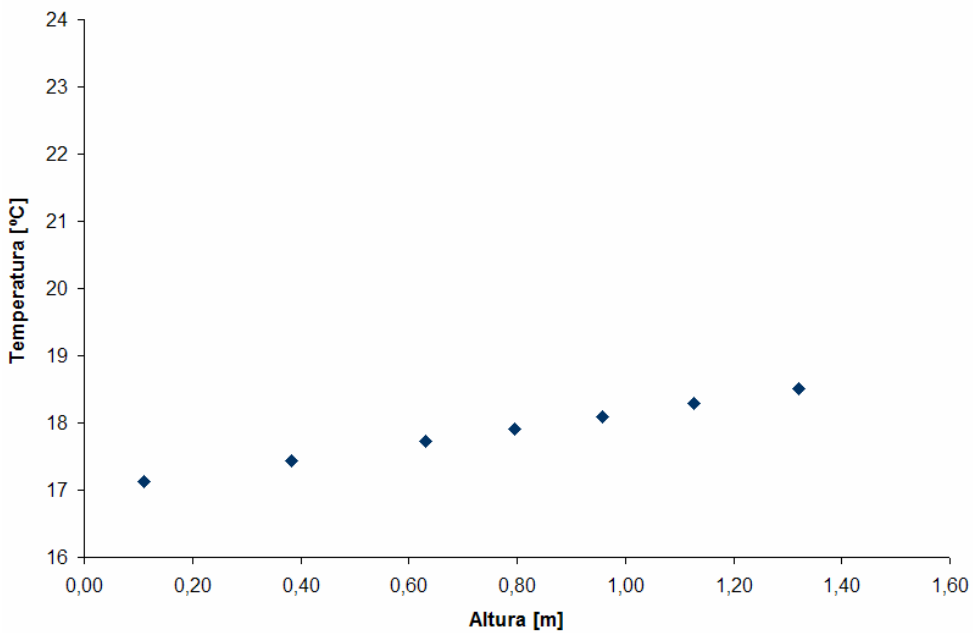


Figura 37 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 39

Ensaio n.º 6

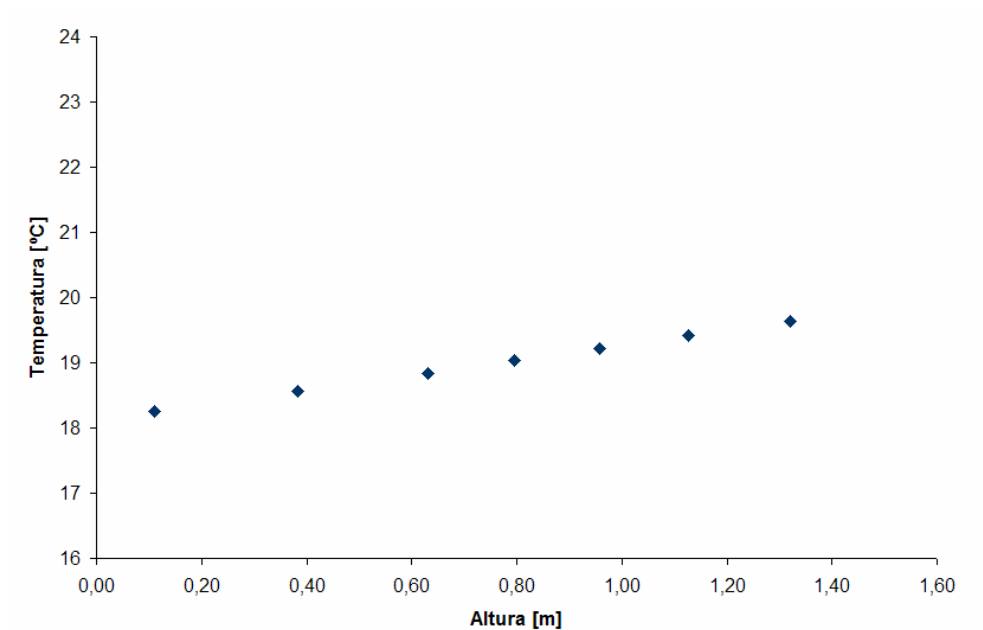


Figura 38 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 41

Ensaio n.º 7

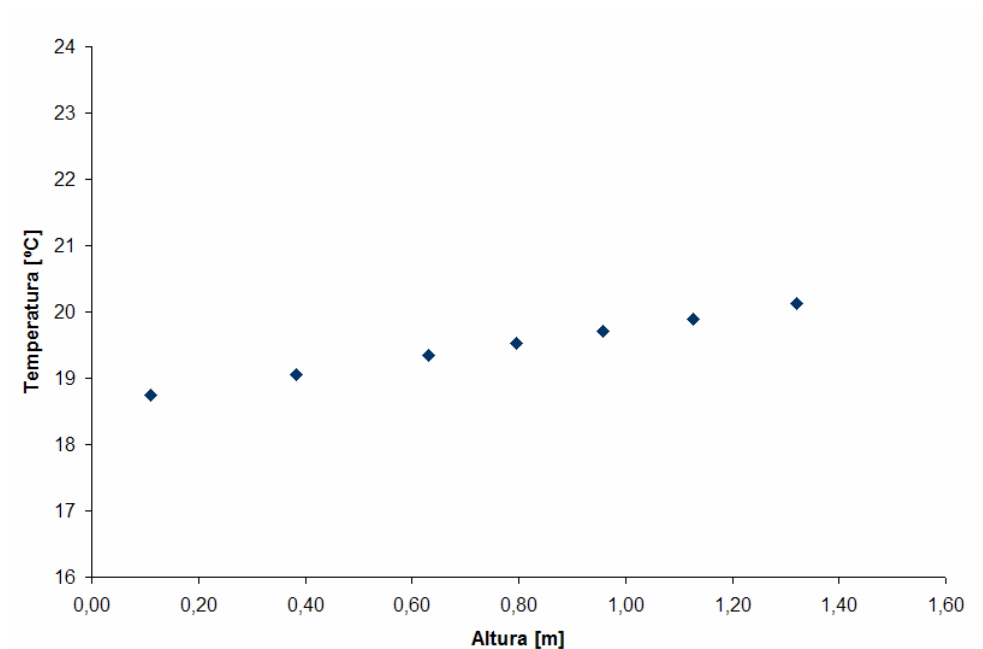


Figura 39 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 43

Ensaio n.º 8

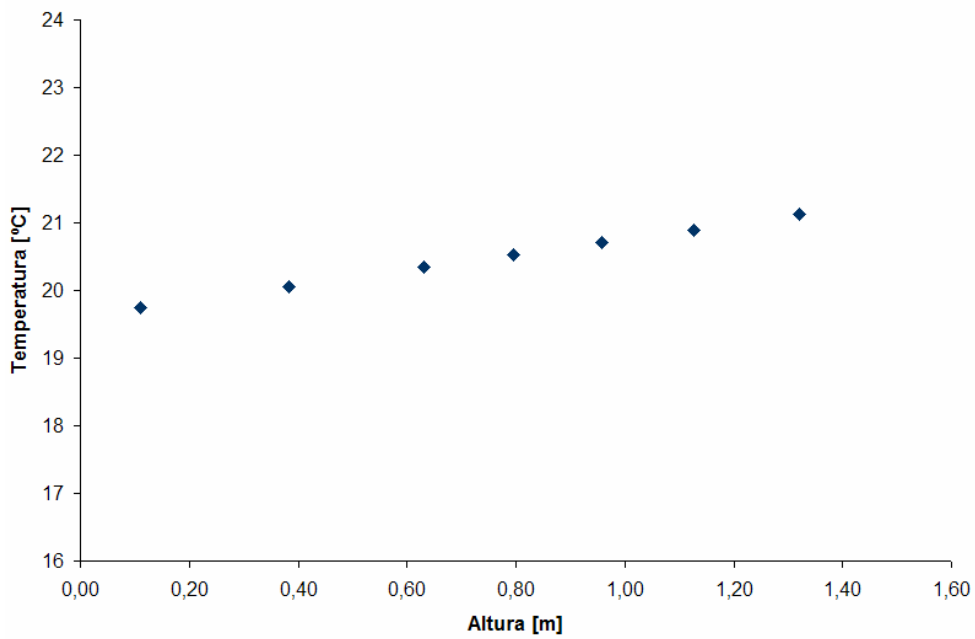


Figura 40 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 45

Ensaio n.º 9

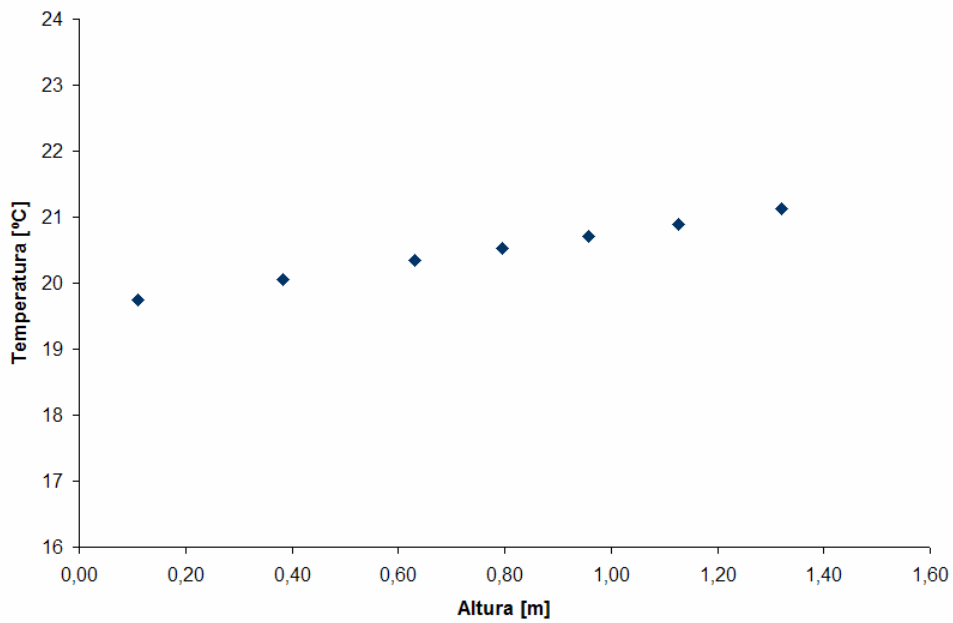


Figura 41 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 47

Ensaio n.º 10

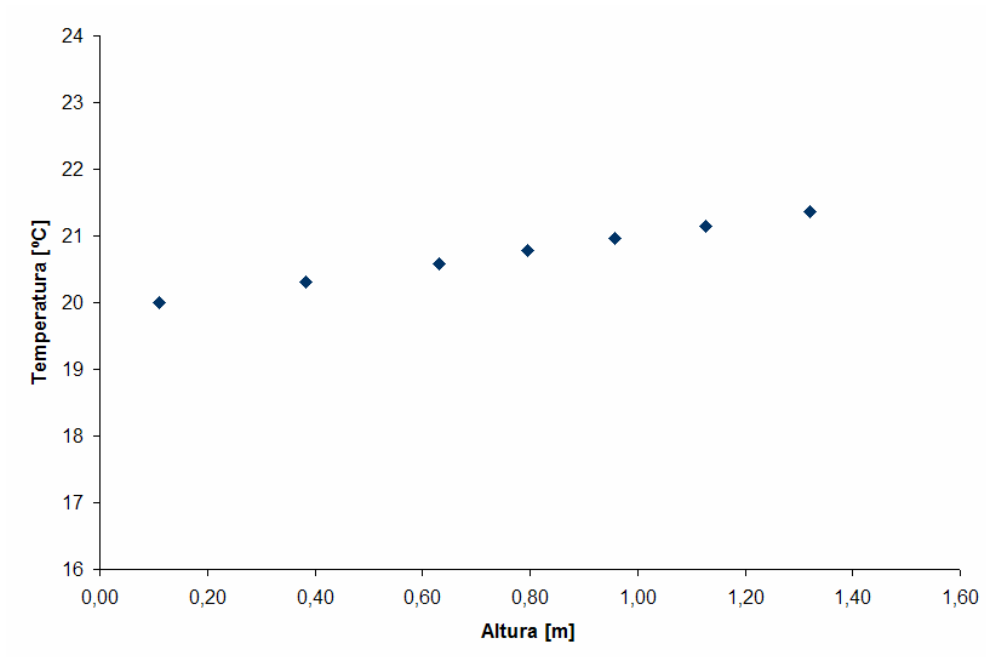


Figura 42 – Temperatura calculada do ar vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 49

### 5.2.2 – Temperatura da água medida e calculada Vs cota

Nos gráficos seguintes, das Figuras 43 a 52, pode-se comparar os valores da temperatura da água obtidos nos ensaios experimentais com os calculados mediante a equação (5.11) – evolução linear das temperaturas da água.

Nos gráficos são também apresentados, em legenda, os desvios médios entre os valores calculados e os medidos, que foram calculados com base na seguinte equação:

$$desviomédio = \sqrt{\left(\frac{T_{calculado} - T_{medido}}{T_{medido}}\right)^2} \quad (5.26)$$

Ensaio n.º 1:  
Temperatura da água Vs Cota

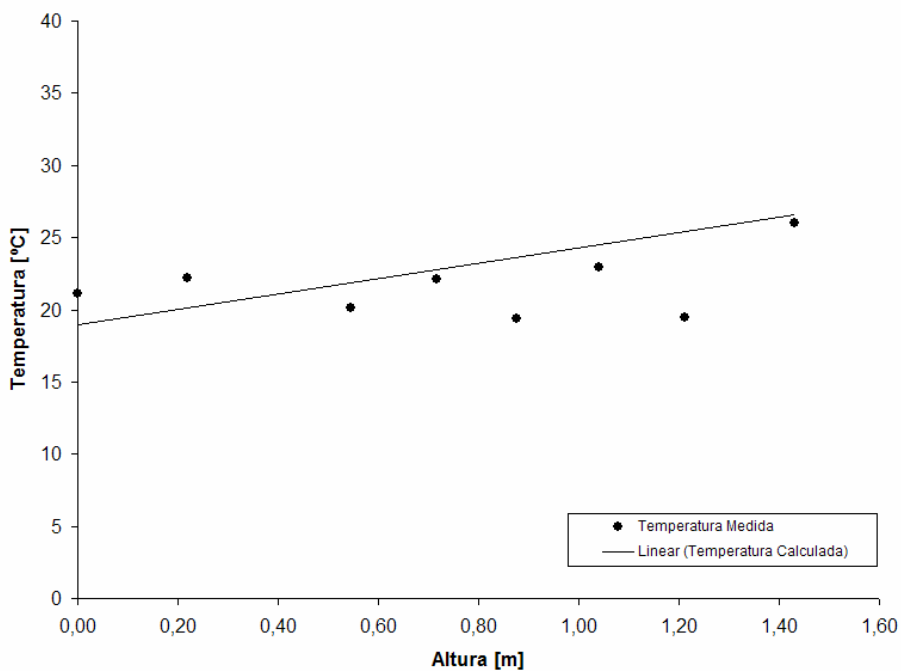


Figura 43 – Temperatura da água vs altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 31, (desvio médio - 33%)

Ensaio n.º 2:  
Temperatura da água Vs Cota

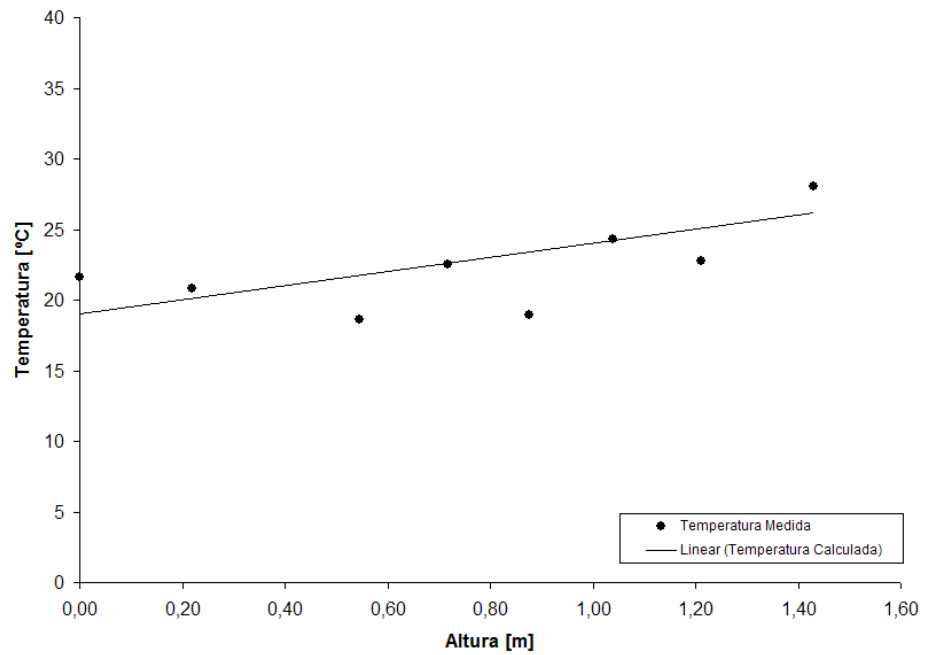


Figura 44 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 33, (desvio médio - 24%)

Ensaio n.º 3:  
Temperatura da água Vs Cota

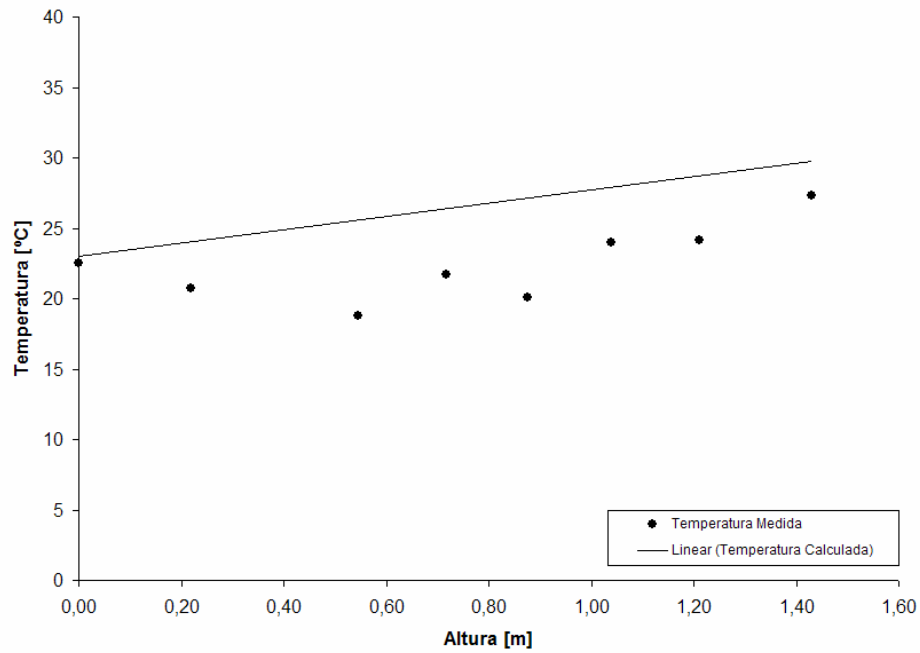


Figura 45 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 35, (desvio médio - 55%)

Ensaio n.º 4:  
 Temperatura da água Vs Cota

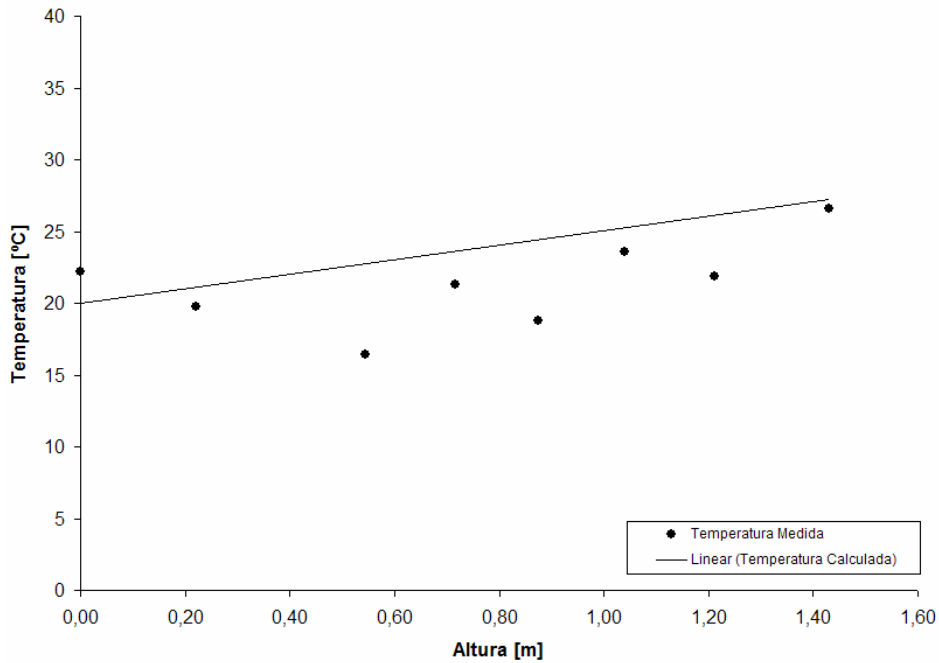


Figura 46 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 37, (desvio padrão – 44%)

Ensaio n.º 5:  
 Temperatura da água Vs Cota

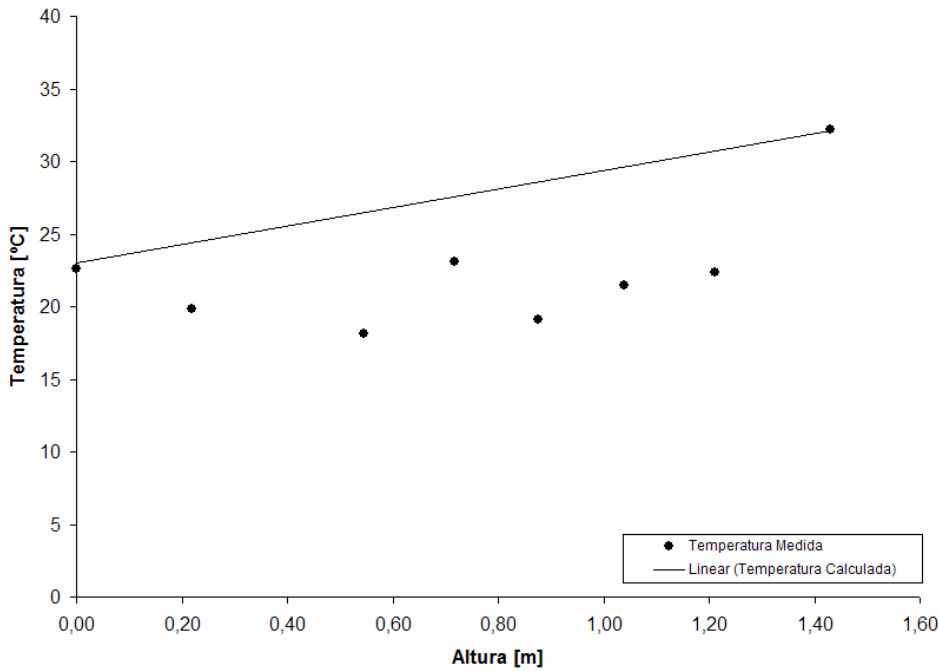


Figura 47 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 39, (desvio médio 76%)

Ensaio n.º 6:  
Temperatura da água Vs Cota

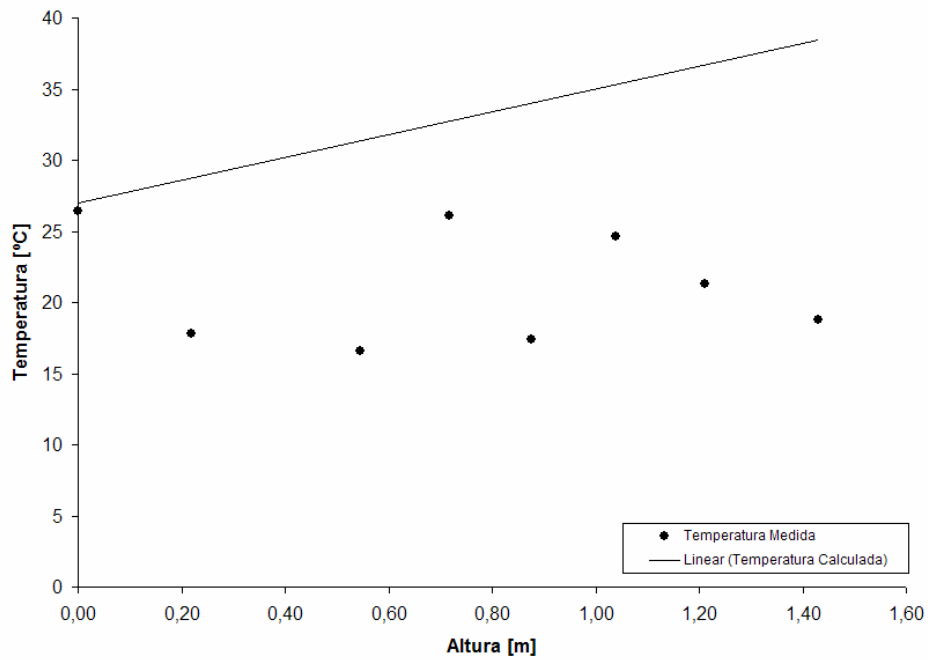


Figura 48 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 41, (desvio padrão 174%)

Ensaio n.º 7:  
Temperatura da água Vs Cota

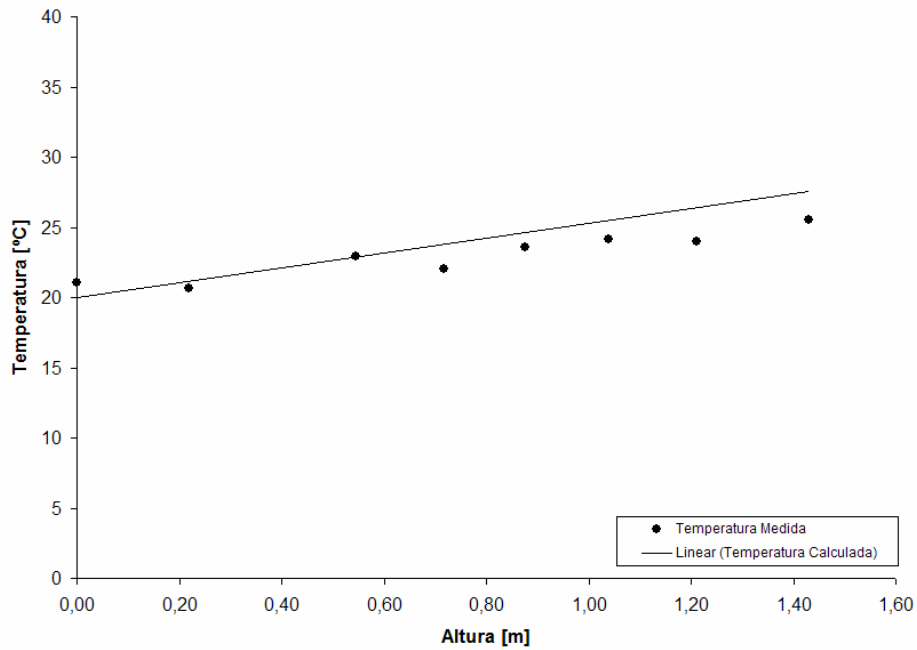


Figura 49 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 43, (desvio médio - 15%)

Ensaio n.º 8:  
Temperatura da água Vs Cota

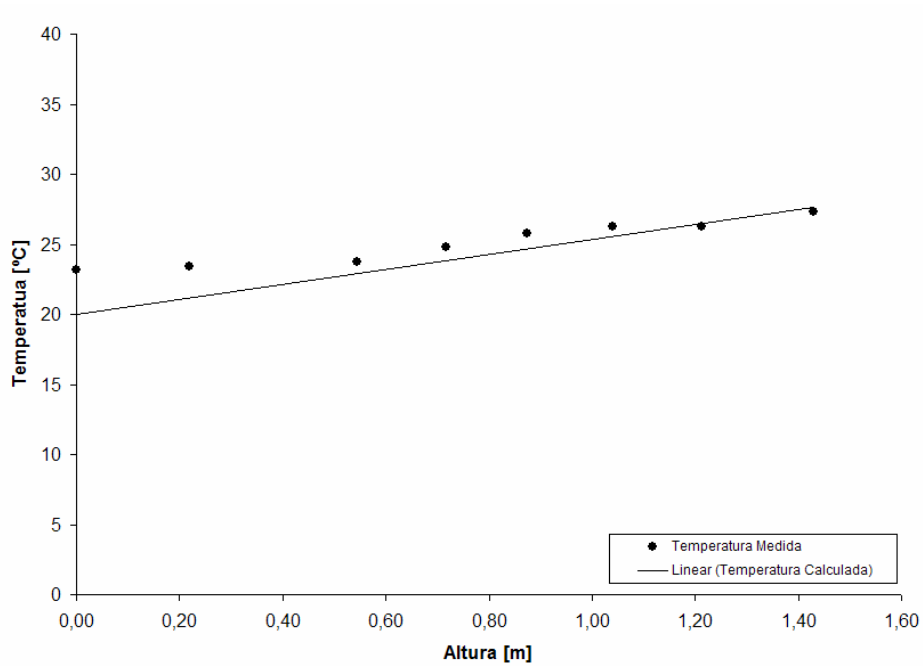


Figura 50 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 45, (desvio médio – 14%)

Ensaio n.º 9:  
Temperatura da água Vs Cota

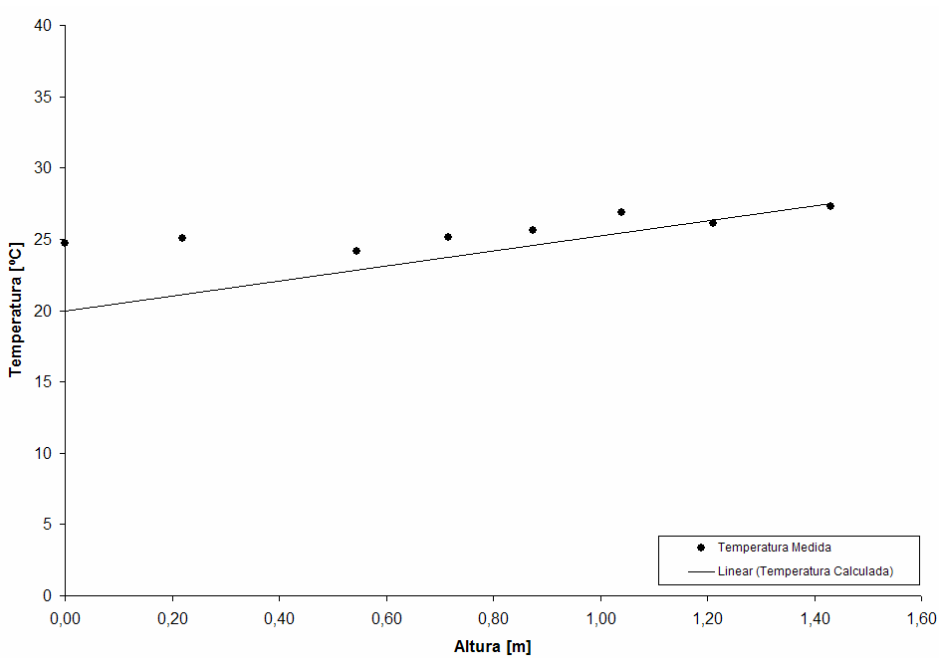


Figura 51 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 47, (desvio médio – 20%)

Ensaio n.º 10:  
Temperatura da água Vs Cota

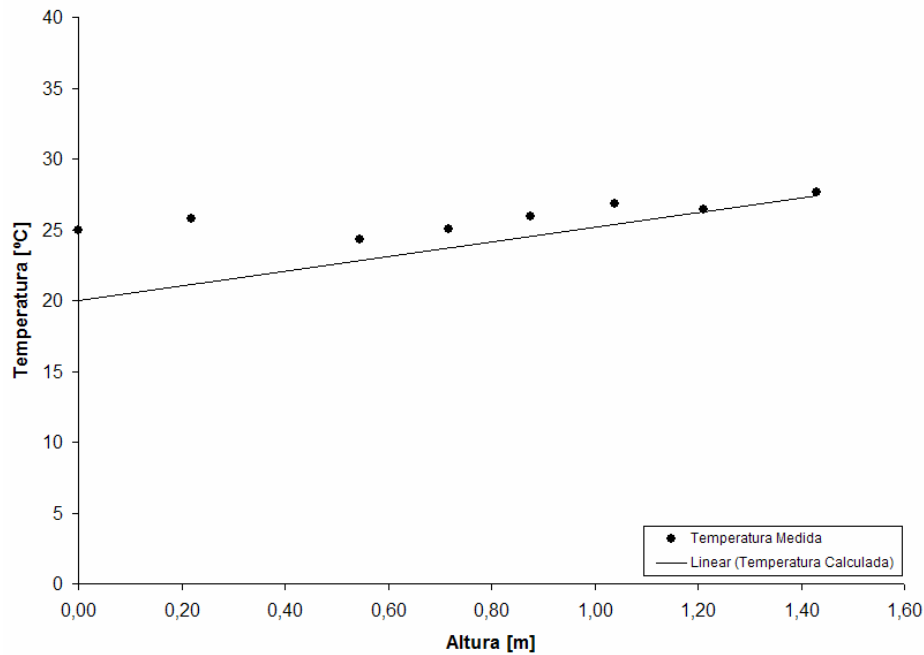


Figura 52 – Temperatura da água vs Altura medida a partir do nível de água no fundo da torre, ver valores Anexo E, Tabela 49, (desvio médio – 22%)

No geral verifica-se que há boa concordância entre os valores medidos e os valores calculados para a temperatura da água, ver desvios médios. A única exceção é o ensaio n.º 6, ver Figura 48, em que se verifica grande discrepância entre os valores medidos e calculados, que provavelmente se deve a má calibração da junta fria da placa de aquisição de dados. Essa calibração é feita automaticamente pela placa. Em todo caso optou-se por manter os dados relativos ao referido ensaio.

### 5.2.3 – Coeficiente $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$

No anexo E encontram-se todos os cálculos efectuados para determinar o coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  para cada fatia em que se dividiu a torre e para toda a torre. Na última coluna da

Tabela 5, estão os valores  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  totais para cada um dos ensaios efectuados. Os valores deste coeficiente são da mesma ordem de grandeza qualquer que seja o ensaio, para caudais de água (relacionado com a  $A_{gotas}$ ) e de ar semelhantes, ver secção 5.1.1.

Tabela 6 – Coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$

Ensaio	Temperatura bolbo seco	Temperatura bolbo húmido	Potência das resistências	Caudal de água	Caudal de ar	$\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$
-	°C	°C	W	kg/s	kg/s	kg/min
1	18,5	13,5	3840	0,121	2,340	8,7
2	18,0	14,5	3840	0,128	2,340	8,9
3	18,6	14,8	3840	0,136	2,340	5,8
4	17,3	11,6	3840	0,127	2,340	6,2
5	17,1	12,8	3840	0,100	2,340	4,3
6	18,3	12,3	3840	0,08	2,340	3,0
7	18,8	17,3	3840	0,120	2,340	14,3
8	19,8	18,0	3840	0,119	2,340	17,0
9	19,8	18,0	3840	0,121	2,340	17,2
10	20,0	18,0	3840	0,122	2,340	17,3

### 5.2.4 – Cálculo de $h$ , $A_{gotas}$ , $t_{queda}$ e do coeficiente $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$

Calcularam-se os valores de  $h$ ,  $A_{gotas}$  e o tempo de queda de modo independente, de forma a calcular o coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  e a comparar este valor com o valor obtido em 5.2.2.

Assunções iniciais:

- Propriedades da água a uma temperatura média 20 °C;
- Propriedades da água a uma temperatura média 27 °C;
- Caudal de água de 0,120 kg/s;
- Caudal de ar de 2,340 kg/s;
- Número de aspersores = 54;
- Incremento na integração da equação diferencial (5.14);
- Gotas de água de forma esférica.

Os cálculos foram feitos para os seguintes diâmetros das gotas de água: 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3 mm. Estes diâmetros foram escolhidos tendo em conta que representam os diâmetros observados experimentalmente nas gotas existentes durante os ensaios, ver Figuras 14 e 15 do Capítulo 3.

As tabelas que serviram de base à elaboração dos gráficos apresentados a seguir, apenas se mostra para uma situação de  $d_{gotas} = 2,25$  mm encontram-se no Anexo F, ver Tabelas 50 a 52.

### 5.2.4.1 - Coeficiente de transferência de calor $h$

Calculado através das equações (5.21) e (5.22). De entre os valores calculados o valor de  $h$  não é o que varia mais significativamente com o aumento do diâmetro das gotas. Em todo o caso a valor de  $h$  diminui porque o diâmetro aumenta, ver equação (5.22).

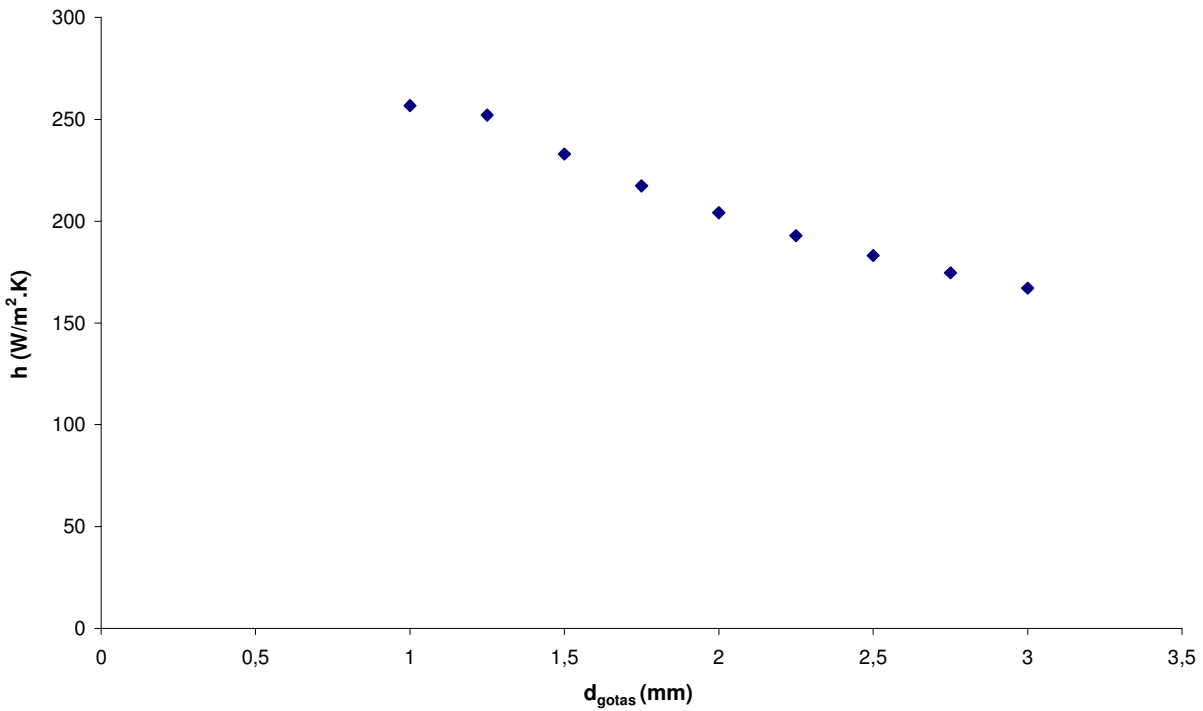


Figura 53 – Evolução do coeficiente de transferência de calor em função do diâmetro das gotas de água

### 5.2.4.2 – Área total das gotas de água

À medida que o diâmetro das gotas de água vai aumentando a área total das gotas de água vai diminuindo, como se pode observar na Figura 44. O cálculo foi feito através das equações (5.23) e (5.24).

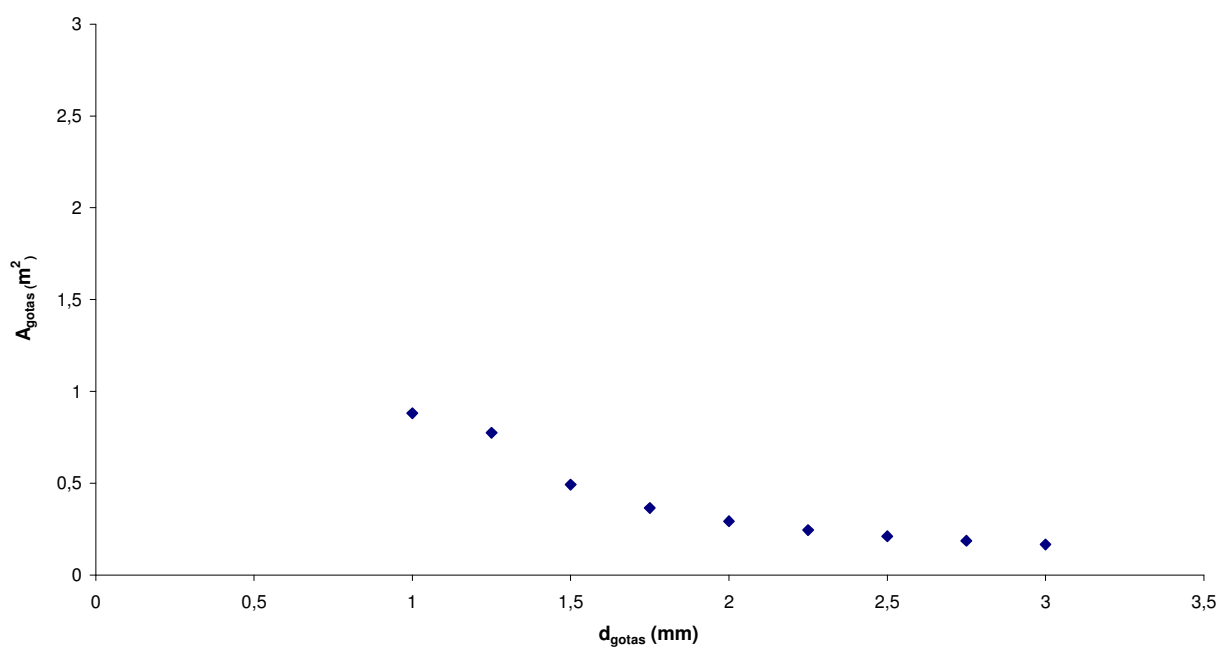


Figura 54 – Evolução da área das gotas de água em função do diâmetro das gotas de água

### 5.2.4.3 – Tempo de queda das gotas de água

O tempo de queda das gotas de água diminui à medida que o diâmetro das gotas aumenta, uma vez que o peso das gotas de água também aumenta, ver Figura 45. O tempo de queda foi calculado através da integração da equação (5.14), e corresponde a um deslocamento da gota igual a 1,43 m, que é a distância entre os aspersores e o nível de água no fundo da torre.

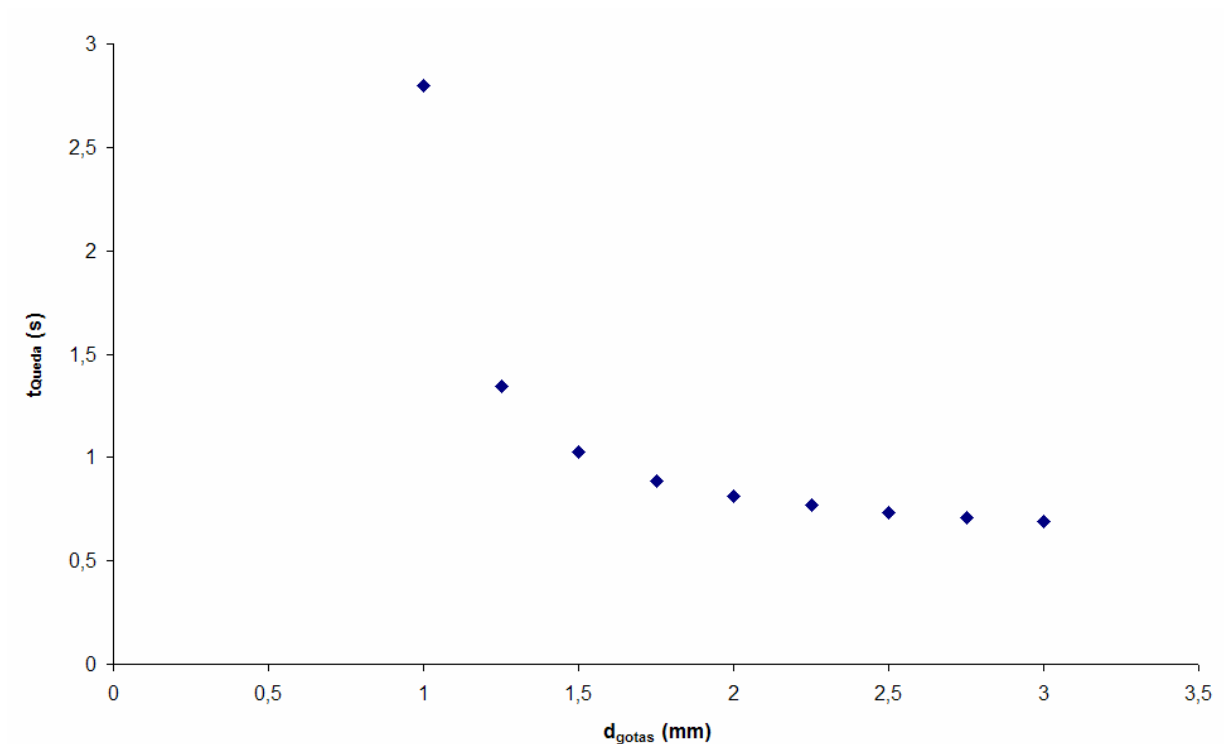


Figura 55 – Tempo de queda em função do diâmetro das gotas de água

#### 5.2.4.4 – Coeficiente $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$

Na figura seguinte pode-se observar a variação do coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$ . Verifica-se que a gama de valores que mais se aproxima da grandeza dos obtidos experimentalmente ver última coluna da Tabela 6, situa-se entre os diâmetros de gotas entre 1,25 e 2,25 mm. Isto indica que os diâmetros de gotas de água mais frequentes no interior da torre, provavelmente estarão compreendidos neste intervalo.

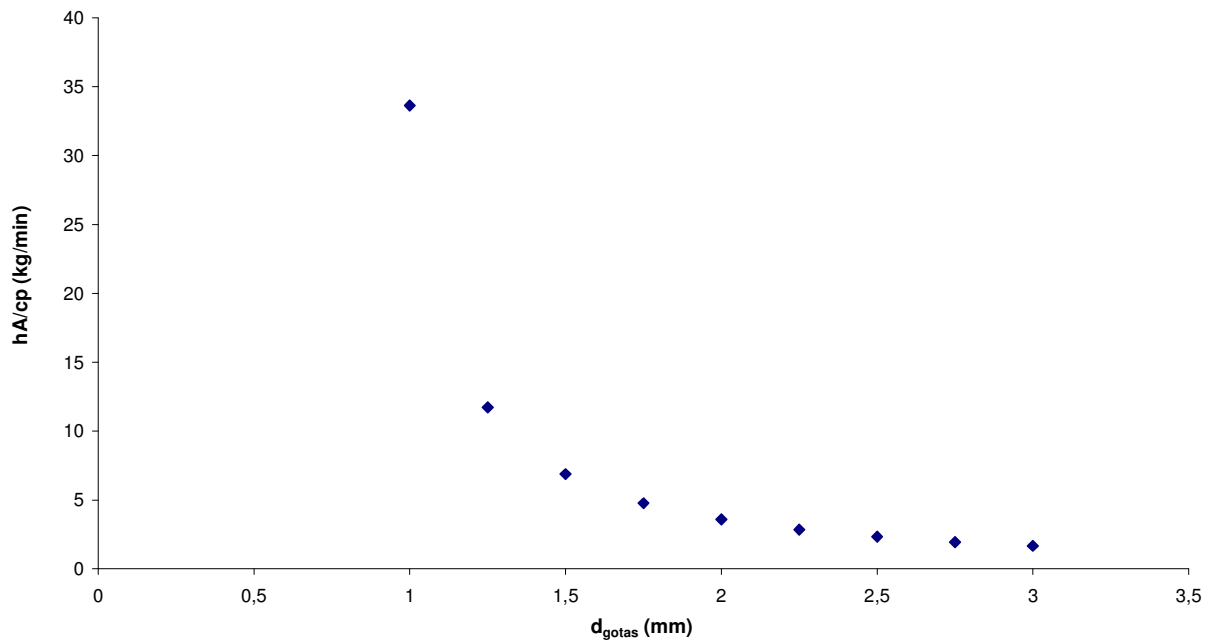


Figura 56 – Evolução da curva do coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  em função do diâmetro das gotas de água

**5.5 – Comparação do coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  calculado globalmente em função dos ensaios,**

**com o coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  calculado em função do diâmetro das gotas de água**

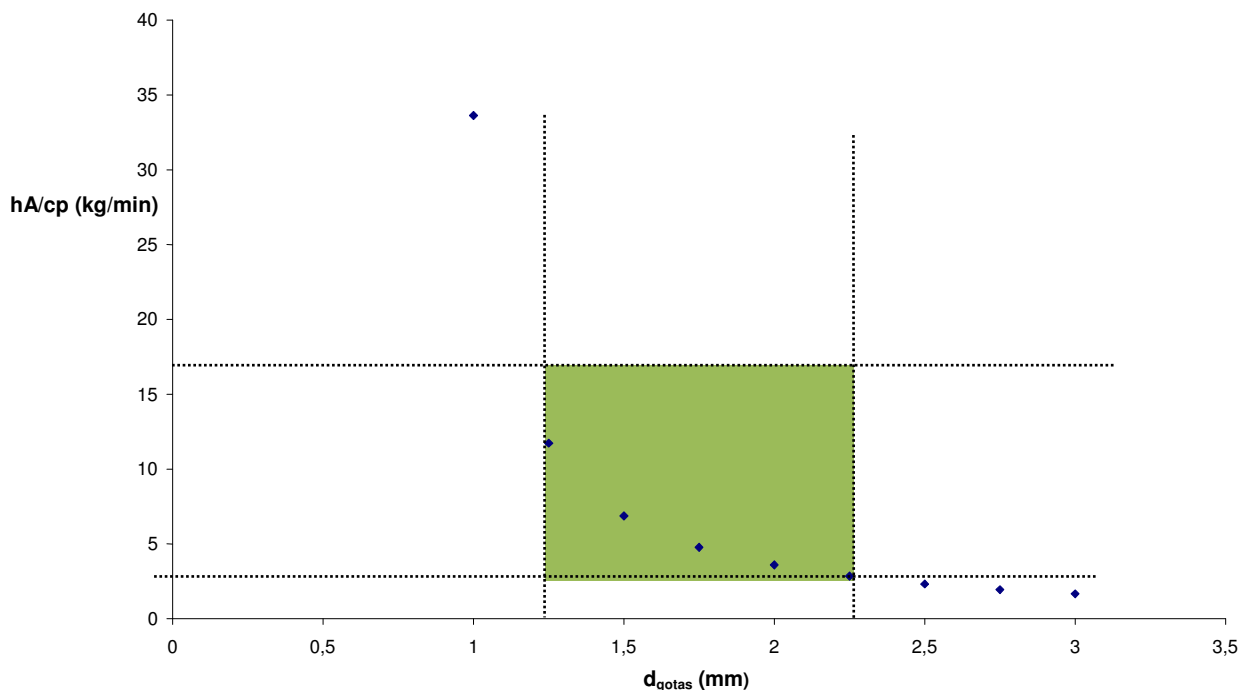


Figura 57 – Comparação do coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  calculado globalmente em função dos ensaios, ver Tabela 6,

com o coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  calculado em função do diâmetro das gotas de água

Pode-se observar que de facto os diâmetros das gotas existentes no interior da torre variam entre cerca de 1,25 e 2,25 mm, ver Figura 4, estando na figura realçado a verde a zona

onde se encontram os valores de  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$  calculados globalmente em função dos ensaios

realizados. Contudo não se sabe qual é a distribuição estatística desses diâmetros.

# **CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**



## 6 – Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 – Conclusões

Este estudo foi feito com um procedimento de ensaio muito curto, cerca de 15 minutos, para evitar a saturação do ar no espaço em que a torre se encontrava instalada, uma vez que se pretendeu que os ensaios fossem efectuados em regime permanente. Caso se pretendesse tornar os ensaios mais longos, a torre de arrefecimento deveria ser instalada num local exterior, aliás locais habituais deste tipo de equipamentos.

Efectuaram-se vários ensaios dos quais se obtiveram os perfis da evolução da temperatura da água ao longo da torre de arrefecimento. Os pontos de medida da temperatura da água foram já referidos no capítulo 3.2.

O modelo matemático criado é propositadamente simples. Essa simplicidade deve-se ao facto de se ter desprezado a transferência de água das gotas para o ar e o arrastamento, pela corrente de ar, das gotas de água para o exterior da torre. Em todo caso os valores de  $\frac{hA}{cP_m}$  medidos e calculados são semelhantes.

Verificou-se pelos gráficos das Figuras 43 e 44, que para a gama de diâmetros simulados, a área das gotas existentes na torre varia entre 0,17 e 0,89 m<sup>2</sup>, enquanto que o coeficiente de transferência de calor  $h$  varia entre 260 e 170 W/m<sup>2</sup>K. Portanto conclui-se que o impacto da área total das gotas é maior que o impacto do coeficiente de transferência de calor  $h$  sobre o coeficiente  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{medio}}$ . Isto indica que para melhorar a transferência de calor

numa torre de arrefecimento de construção idêntica ao modelo usado, é mais importante aspergir bem a água do que aumentar o coeficiente de transferência de calor entre as gotas de água e o ar. Da análise do gráfico da Figura 47, conclui-se que quando comparando o valor de

$\frac{hA}{cP_m}$  calculado globalmente em função dos ensaios experimentais com o valor de  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{medio}}$

calculado em função do diâmetro que o diâmetro das gotas no interior da torre situam-se entre 1,25 e 2,25 mm, valores estes que ficam entre a gama de valores que era esperada, tendo em conta a avaliação experimental de diâmetro de gotas, ver Figuras 14 e 15.

## **6.1 – Trabalhos futuros**

Em termos de trabalhos futuros, sugere-se um melhoramento e aprofundamento do modelo matemático tendo em conta que de facto existe transferência de água das gotas para o ar e que há arrastamento, pela corrente de ar, das gotas de água para o exterior da torre de arrefecimento.

Sugere-se também que se estude a transferência de massa uma vez que como já foi referido o tempo deste estudo foi bastante curto para fazê-lo. Tentar melhorar a forma de aspersão das gotas de água e eventualmente fazer este estudo com a torre de arrefecimento no exterior, o que neste estudo foi impossível de concretizar.

## **CAPÍTULO 7: Referências Bibliográficas**



## 7 – Referências Bibliográficas

- Al-Waked Rafat, Behnia Masud, “CFD simulation of wet cooling towers”, Applied Thermal Engineering (2005).
- Costa, E. C., “Refrigeração”, Edgard Blucher, 1982
- Cengel, Y. A. e Boles, M. A., “Thermodynamics – 5<sup>th</sup> Edition”, McGraw Hill, 2006.
- Incropera, F. P. e DeWitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Sons, 2001
- Jameel-Ur-Rehman Khan, Bilal Ahmed Querishi, Syed M. Zubair, “ A comprehensive design and performance evaluation study of counter flow wet cooling towers”.
- Kaiser, A.S., Lucas, M., Viedma, A., e Zamora, B., “Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower”, International Communications in Heat and Mass Transfer 48 (2005) 986-989.
- Kloppers, J.C. e Krogger, D.G., “The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers”, International Journal of Thermal Sciences 44 (2005) 879-884.
- Naphon Pairsarn, “Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower”, International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (2005) 1066-1074.
- Qi Xiaoni, Liu Zhenyan, Li Dandan, “Performance characteristics of a shower cooling tower”, Energy Conversion and Management 48 (2007) 193-203.
- Smrekar J., Oman J., Sirok B., “Improving the efficiency of natural draft cooling towers”, Energy Conversion and Management (2005).

- Stoecker, W. F., “Design of Thermal Systems”, 1982, McGraw Hill
  
- Stoecker, W. F., “Refrigeration and air conditioning”, McGraw Hill, 1971
  
- Wang S.W., Tyagi S.K., Sharma Atul, Kaushik S.C., “Application of solar collectors to control the visible plume from wet cooling towers of a commercial building in Hong Kong: A case study”, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1394-1404.
  
- White, M. Frank, “Mecânica do Fluidos”, McGraw Hill, 1994
  
- Xiaoni Qi, Zhenyan Liu, Dandan Li, “Prediction of the performance characteristics of a shower cooling tower”, Energy Conversion and Management (2007).

**ANEXOS: A, B, C, D, E e F**



## **ANEXO A: Caudal de ar e água**



Tabela 7 – Comparação Caudal de água medido Vs Caudal lido pelo Caudalimetro

		<b>Teste h=15 cm</b>						<b>T= 20,9°C</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	
		3,5	2,87	3,8	3,9	3,4	3,2	
		3,4	2,75	4,1	3,8	3,1	4,1	
		3,5	2,55	3,6	3,7	2,55	4,3	
		3,6	2,36	3,8	3,6	1,45	4	
		3,7	1,98	3,9	3,7	2,42	2,8	
		3,5	2,74	4	3,8	2,53	4,3	
		3,6	2,96	3,8	3,7	1,71	4,1	
		3,8	3,4	2,93	3,5	1,57	4,5	
		3,79	3,3	3,1	3,7	2,55	4,3	
		3,6	3,1	3	3,8	3	4,2	
		3,4	3,2	2,73	4,1	2,8	3,4	
		3,2	2,35	3,7	3,9	2,91	2,9	
		3,3	1,74	4,3	3,6	2,95	3,2	
		3,4	1,77	4,5	3,5	2,86	4,3	
		3,6	2,48	4,5	3,4	1,86	4,7	
		3,5		4,4	3,5	1,65	4,1	
		3,4		4,3			3,6	
		3,6		3,9			2,9	
		3,5		3,8			3,5	
		3,4		3,8			4,5	
		3,6		3,9			4,2	
							4,3	
							3,7	
							4,1	
							2,5	
média=		3,52	2,64	3,80	3,70	2,46	3,83	3,32
desv. Padrão=		0,15	0,53	0,50	0,18	0,62	0,61	0,43
n=		21	15	21	16	16	25	

Tabela 8 – Comparação Caudal de água medido Vs Caudal lido pelo Caudalimetro

		Teste h=40 cm		T= 20,9°C					
		1	2	3	4	5	6		
		3,1	1,74	4,2	3,4	3,7	3,7		
		3,3	1,47	3,9	3,5	3,1	3,6		
		3,4	1,35	3,2	3,4	3,2	4,3		
		3,3	0	4	3,3	2,55	4,5		
		3,2	0,7	3,1	3,8	1,57	4,4		
		3,1	0,8	3,5	4,1	1,96	5		
		3,2	0,8	3,3	3,9	1,8	5,1		
		3,3	0,9	2,48	4	2	4,9		
		3,4	2	2	4,1	2,9	4,8		
		3,3	1,93	2,6	3,7	2,8	4,1		
		3,2	1,98	3,6	4	3,1	4		
		3,2	1,84	3,9	3,9	3,4	3,9		
		3,4	1,22	3,7	3,6	3,3	3,8		
		3,5	3	3,8	3,4	2,48	4,7		
		3,6	2,82	3,9	3,3	2,49	4,9		
		3,5	2,91	4	3,4	2,39	4,1		
		3,5	2,85	4,1	3,8	1,8	4,2		
		3,3		3,8	4,2	2,55	4,3		
		3,2		3,9			3,8		
				4			4,5		
				4,5			4,8		
				3,6			5,1		
				3,3			5		
				3,5			4,5		
média=		3,32	1,67	3,58	3,71	2,62	4,42		3,22
desv. Padrão =		0,14	0,88	0,58	0,30	0,62	0,47		0,50
n=		19	17	24	18	18	24		

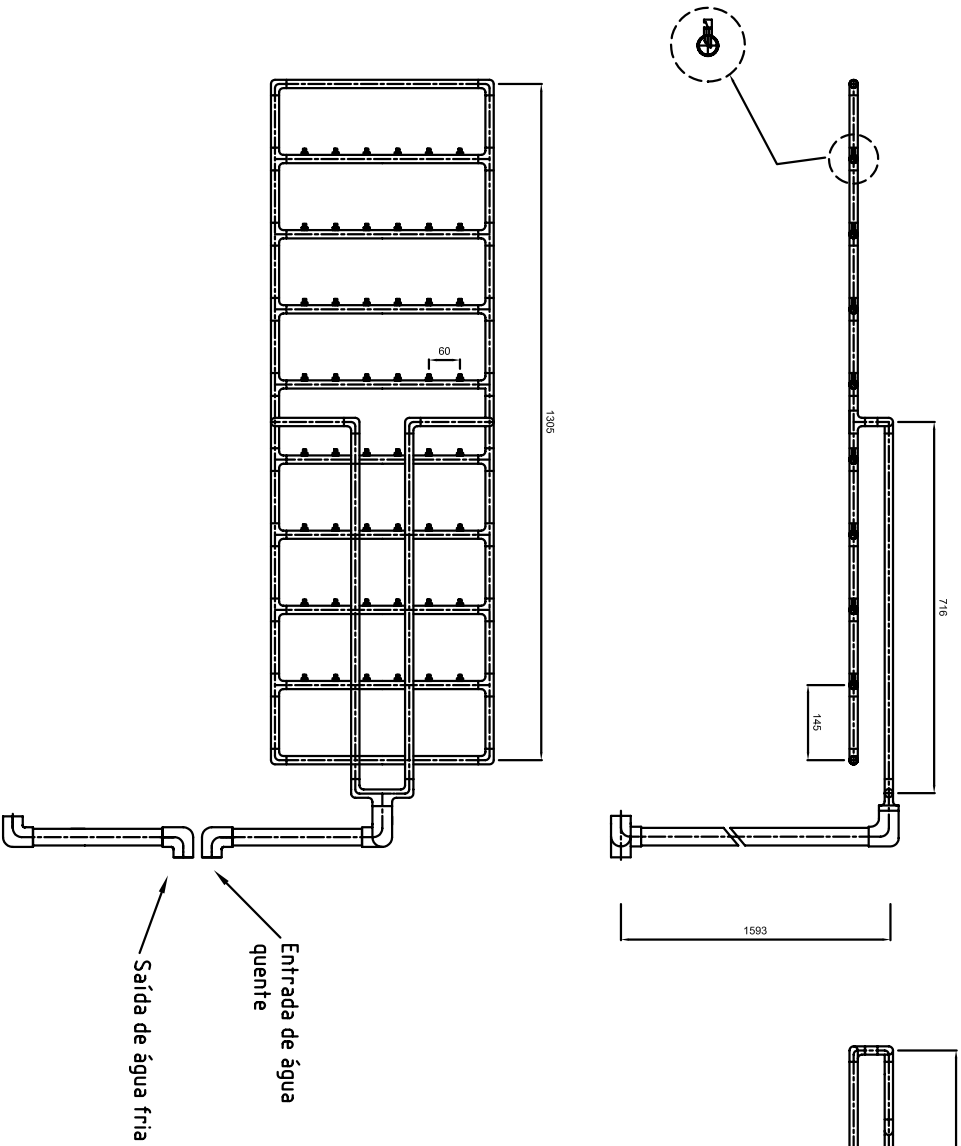
Tabela 9 – Comparação Caudal de água medido Vs Caudal lido pelo Caudalimetro

t (s)	medido		lido	
	v (l)	V (l/s)	v (l)	V (l/s)
0	0	0	0	0
253,02	9	0,0356	9	0,0356
346,43	6	0,0173	7,5	0,0216
305,24	28	0,0917	28,9	0,0947
457,5	53	0,1158	53,5	0,1169
295,2	48	0,1626	49	0,1660



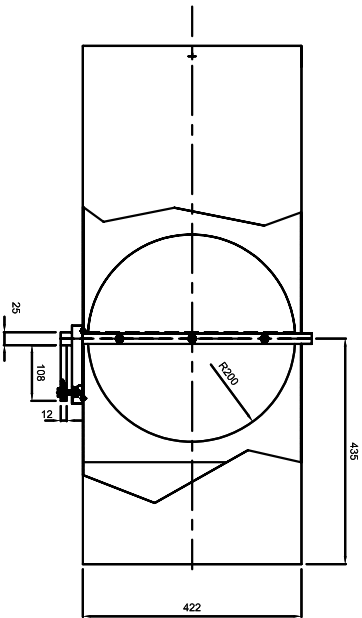
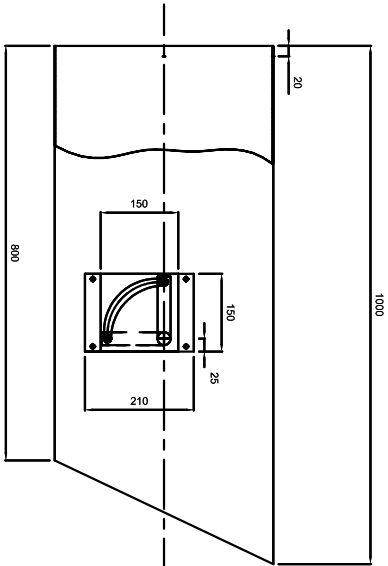
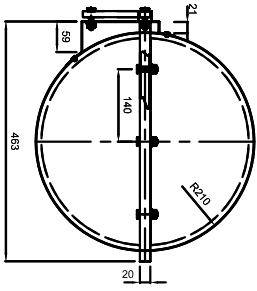
## **ANEXO B: Desenhos e Pormenores construtivos**





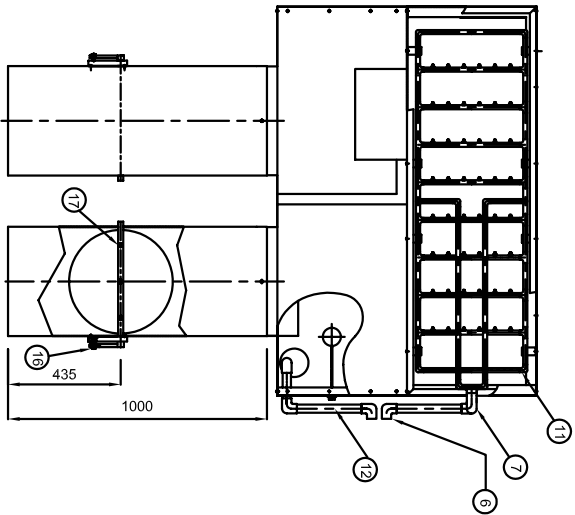
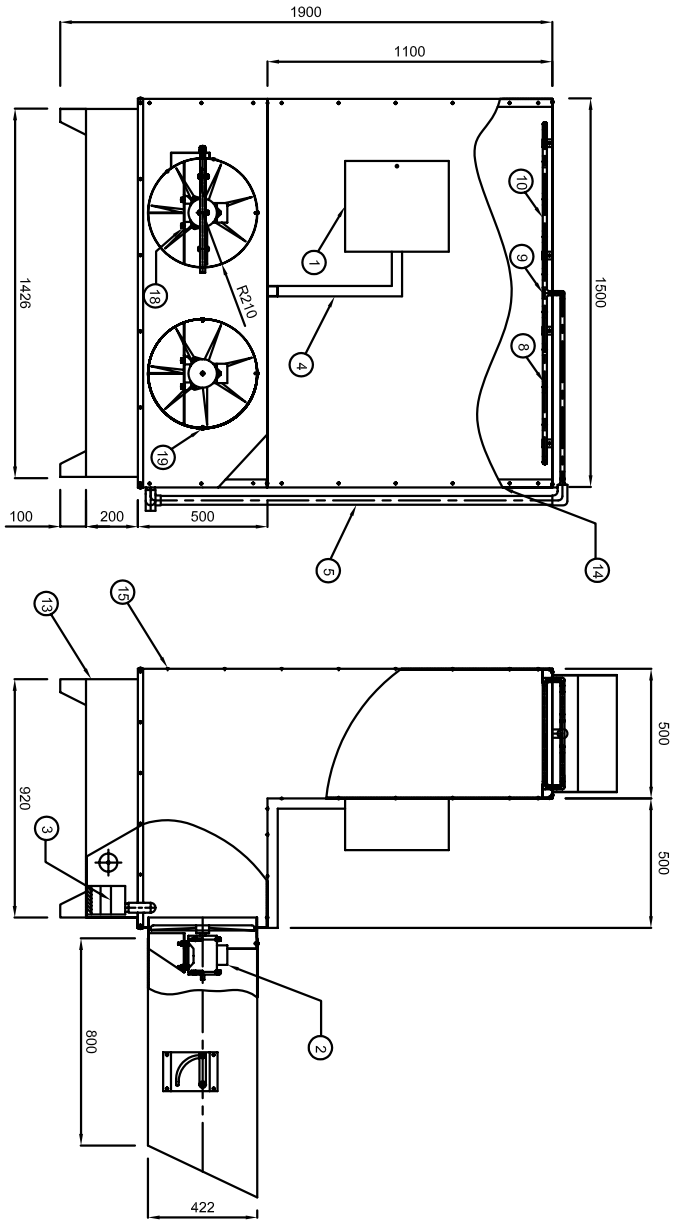
QUANT. POS.	DESIGNAÇÃO	NORMA / DESENHO	MATERIAL	OBS./ARTIGO N.º UNID. PESO TOTAL
01		100mm		COTAS NÃO TOLERÂNCIADAS:
PROJECTOU	TORRE DE ARREFECIMENTO		ARTIGO N.º	
DESENHOU	POMENOR DAS TUBAGENS E ASPERSORES		DESENHO N.º	01
VERIFICOU	Marco Pacheco 07201		REV. A	B
APROVOU			C	D
ESCALAS:	1/10	ORIENTADORES:	E	FORMATO
		CARLOS PINHO		A3
		LEONARDO RIBEIRO	SUBSTITUI:	
			SUBSTITUIDO POR:	





QUANT.	POS.	DESIGNAÇÃO	NORMA / DESENHO	MATERIAL	OBS./ARTIGO N.º UNIF. PESO TOTAL
01			100mm		COTAS NÃO TOLERÂNCIADAS:
PROJECTOU		TORRE DE ARRETECIMENTO		ARTIGO N.º	
DESENHOU		POMENOR DE TOMADAS DE AR E RESISTO		DESENHO N.º	02
VERIFICOU		Marco Pacheco 07201			
APROVOU				REV. A	B
ESCALAS:	1/10			SUBSTITUI:	C
				ORIENTADORES:	D
				CARLOS PINHO	E
				LEONARDO RIBEIRO	
				SUBSTITUIDO POR:	FORMATO
					A3

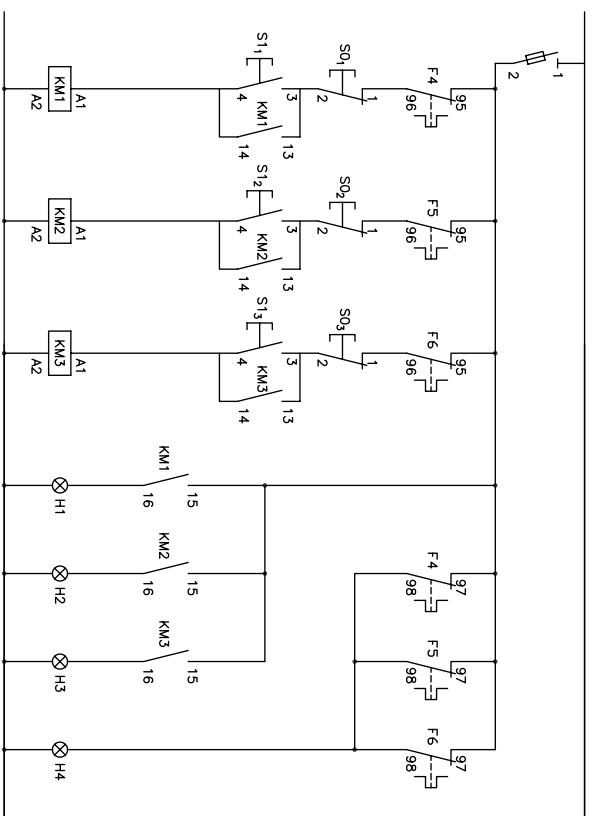




19	Parafuso St 4,8x9,5, mm				
18	Arbitra plana M8				
17	Porca H M8				
16	Parafuso H M8x35mm				
15	Rebites de cabeça contrapicada de latão, 40°, 25%, diâmetro 4, mm				
14	Chapa de aço galvanizado a zinco, com 1,6 mm de espessura				
13	Chapa de aço galvanizado a zinco, com 1mm de espessura				
12	Vislão de 3/16" com cabeça por-bola				
11	Janela 2 9/16" em PVC (diâmetro de 16 mm)				
10	Tubo em PVC (diâmetro de 16 mm)				
9	1/2" em PVC (diâmetro de 16 mm)				
8	Microscopos Mini Jet 9/16"				
7	1/2" de redução de 3/2" para 2x 1/2" em PVC				
6	Janela 9/16" em PVC (diâmetro 37mm)				
5	Tubo de PVC (diâmetro 37mm)				
4	Chapa em aço galvanizado 30x30x1,6mm				
3	Motor Bomba de água L.P. 750 W./E. 230 V./E. 19 A				
2	Motorventilador L.P. 750 W./E. 230 V./E. 0,97 A				
1	Quadro elétrico				
QUANT. POS.	DESIGNAÇÃO	NORMA / DESENHO	MATERIAL	OBS./ARTIGO N.º UNID. PESO TOTAL	
0 1		1 100mm			
PROJETO	TORRE DE ARREFECIMENTO		ARTIGO N.º		
DESENHO	DESENHO DE CONSTRUÇÃO Nº1		DESENHO N.º	03	
VERIFICOU	Marco Pacheco 07201				
APROVOU			REV. A B C D E		
ESCALAS:	1/20	ORIENTADORES:	CARLOS PINHO		FORMATO
			LEONARDO RIBEIRO		A3
					SUBSTITUÍDO POR:



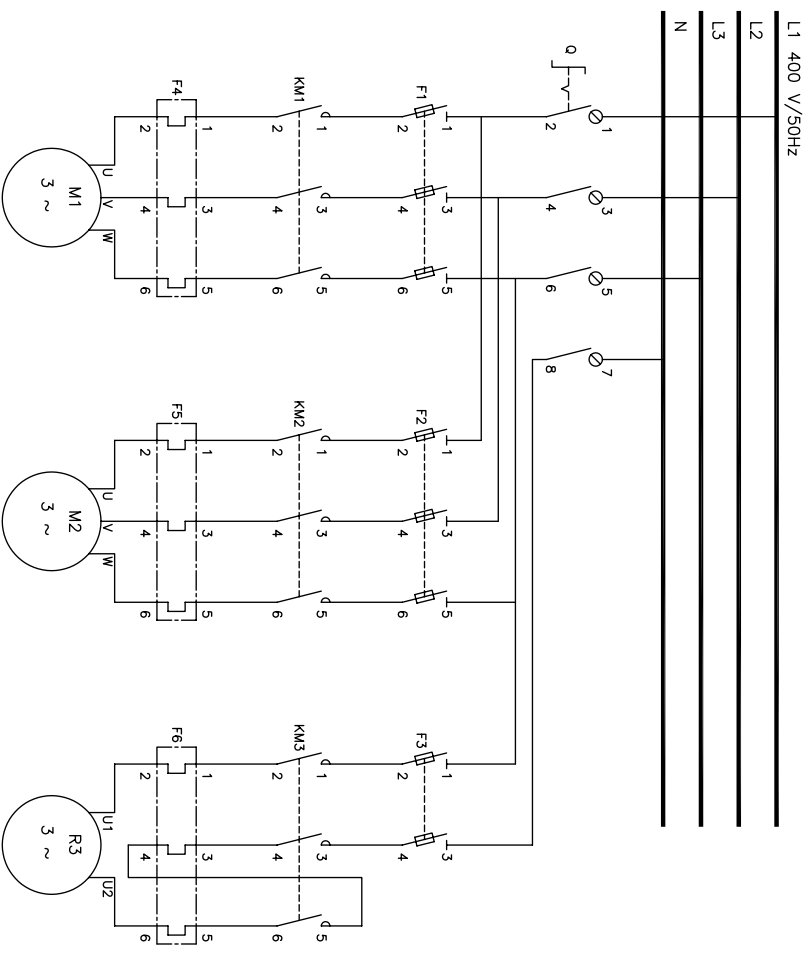
# Esquema de Comando



## LEGENDA TÉCNICA:

	- Botoneira de 3 Posições		- Disjuntor com Bobine de Disparo MX e com 1 Contacto Auxiliar
	- Botoneira de Pressão		- Bobine Contactor/Relé
	- Botoneira de Pressão Tipo Cogumelo		- Porta Fusíveis
	- Botoneira de 2 Posições		- Contactor NC com Contacto Auxiliar
	- Disjuntor		- Disjuntor com Contacto Auxiliar
	- Lâmpada de Sinalização		- Disjuntor Magnético-térmico com Contacto Auxiliar Lateral
	- Contactos		- Contacto
	- Interruptor		- Disjuntor Diferencial
	- Interruptor Horário Digital		- Aparelho de Medida Digital Amperímetro/Voltímetro
		- Relé Falta e Inversão de Fase	

# Esquema de Potência



Esquema de Comando

Esquema de Potência

Referência	Designação, material, dimensões	ET	Secundário Típico B.5315
0	Interruptor tripolar de 60 A de encostar		Secundário Típico de 2A - B.5315
FI.F1.E3	Secundário Típico Típico 00.58		
F4.F5	Relé térmico de A.A.com referência	F4.F5.F6	Relé térmico
F6	Relé térmico de A.A.com referência	KM1.KM2.KM3	Contatores
KM1.KM2.KM3	Contactor tripolar de 60 A, 3 com 2 N.A. - 200V/50Hz	SI1.SI2.SI3	Bobineira de desligar de encostar
H1	Motor Indução de 7.5kW, Ue=380V, Ie=15.9A	SI1.SI2.SI3	Bobineira de ligar de encostar
H2	Motor Indução de 7.5kW, Ue=380V, Ie=15.9A	H1.H2.H3	Suprte 0/2 de encostar com vistor remido
H3	Motor Indução de 7.5kW, Ue=380V, Ie=15.9A	H1.H2.H3	Suprte 0/2 de encostar com vistor remido
ET	Secundário Típico B.5315		Lâmpadas 0/2.70V 10W 1/2"
F1.F5.F6	Relé térmico		
KM1.KM2.KM3	Contatores		
SI1.SI2.SI3	Bobineira de desligar de encostar		
SI1.SI2.SI3	Bobineira de ligar de encostar		
H1.H2.H3	Suprte 0/2 de encostar com vistor remido		
H1.H2.H3	Suprte 0/2 de encostar com vistor remido		
	Lâmpadas 0/2.70V 10W 1/2"		

0	100mm	COTAS NÃO TOLERÂNCIADAS:
---	-------	--------------------------

PROJECTO	Marco Pacheco 01201	TORRE DE ARRETEQUEMTO	ARTIGO N.º	
DESENHO	Marco Pacheco 01201	INSTALAÇÃO ELÉCTRICA DE COMANDO E POTÊNCIA	DESENHO N.º	04
VERIFICOU	Marco Pacheco 01201			
APROVOU				
ESCALAS:	s/e	ORIENTADORES:	CARLOS PINHO	FORMATO
			LEONARDO RIBEIRO	A3



## **ANEXO C: Ensaios – Condições Iniciais**



Tabela 10 – Ensaio nº1: 03/03/2008 – 12:15h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,121	2,340	3.840	18,5	13,5	35634

Tabela 11 – Ensaio nº2: 03/03/2008 – 15:15h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,128	2,340	3.840	18,0	14,5	40286

Tabela 12 – Ensaio nº3: 03/03/2008 – 16:34h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,136	2,340	3.840	18,6	14,8	37960

Tabela 13 – Ensaio nº4: 04/03/2008 – 14:00h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,121	2,340	3.840	17,3	11,6	30982

Tabela 14 – Ensaio nº5: 04/03/2008 – 14:45h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,100	2,340	3.840	17,1	12,8	33308

Tabela 15 – Ensaio nº6: 04/03/2008 – 15:34h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,080	2,340	3.840	18,3	12,3	33308

Tabela 16 – Ensaio nº7: 03/03/2008 – 12:15h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,120	2,340	3.840	18,8	17,3	47264

Tabela 17 – Ensaio nº8: 03/03/2008 – 12:15h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,119	2,340	3.840	19,8	18,0	49590

Tabela 18 – Ensaio nº9: 03/03/2008 – 12:15h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,121	2,340	3.840	19,8	18,0	49590

Tabela 19 – Ensaio nº10: 03/03/2008 – 12:15h

<b>Caudal de água</b>	<b>Caudal de ar</b>	<b>Potência</b>	<b>Temperatura bolbo seco do ar</b>	<b>Temperatura bolbo húmido do ar</b>	<b>Entalpia Inicial Ar</b>
kg/s	kg/s	W	°C	°C	J/kg
0,122	2,340	3.840	20,0	18,0	49590



## **ANEXO D: Ensaaios – Medições obtidas**



Tabela 20 – Ensaio n°1

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	21,15	22,21	20,11	22,11	19,36	22,92	19,49	26,03
<b>Desvio Padrão</b>	0,42	1,54	1,16	0,74	0,89	0,40	0,41	0,15
<b>Nº leituras</b>	144,00	144,00	144,00	144,00	144,00	144,00	144,00	144,00

Tabela 21 – Ensaio n°2

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	21,62	20,85	18,62	22,54	18,93	24,28	22,75	28,05
<b>Desvio Padrão</b>	0,61	1,94	0,72	1,02	1,52	0,81	1,68	0,21
<b>Nº leituras</b>	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00

Tabela 22 – Ensaio n°3

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	22,53	20,76	18,79	21,71	20,09	24,02	24,17	27,31
<b>Desvio Padrão</b>	0,54	2,25	1,66	1,31	1,55	0,87	1,02	0,52
<b>Nº leituras</b>	588,00	588,00	588,00	588,00	588,00	588,00	588,00	588,00

Tabela 23 – Ensaio n°4

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	22,16	19,76	16,44	21,27	18,81	23,62	21,84	26,60
<b>Desvio Padrão</b>	0,50	2,34	1,14	1,44	1,99	0,83	1,49	0,42
<b>Nº leituras</b>	366,00	366,00	366,00	366,00	366,00	366,00	366,00	366,00

Tabela 24 – Ensaio n°5

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	22,62	19,81	18,12	23,07	19,12	21,46	22,34	32,22
<b>Desvio Padrão</b>	0,98	1,53	1,52	2,88	2,82	0,82	3,20	1,29
<b>Nº leituras</b>	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00

Tabela 25 – Ensaio n°6

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	26,43	17,83	16,62	26,08	17,39	24,65	21,33	18,77
<b>Desvio Padrão</b>	0,72	0,83	0,83	0,44	1,58	0,54	2,00	1,92
<b>Nº leituras</b>	558,00	558,00	558,00	558,00	558,00	558,00	558,00	558,00

Tabela 26 – Ensaio n°7

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	21,08	20,62	22,89	22,05	23,59	24,17	23,99	25,54
<b>Desvio Padrão</b>	4,50	4,28	3,75	4,02	3,68	4,61	3,93	3,80
<b>Nº leituras</b>	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00

Tabela 27 – Ensaio n°8

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	23,15	23,38	23,71	24,81	25,76	26,30	26,29	27,29
<b>Desvio Padrão</b>	4,28	4,00	3,51	3,19	3,23	3,59	3,11	2,97
<b>Nº leituras</b>	857,00	857,00	857,00	857,00	857,00	857,00	857,00	857,00

Tabela 28 – Ensaio n°9

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	24,68	25,05	24,13	25,14	25,61	26,85	26,12	27,29
<b>Desvio Padrão</b>	4,10	3,61	3,55	2,98	3,15	3,63	2,85	2,73
<b>Nº leituras</b>	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00

Tabela 29 – Ensaio n°10

	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 4	Termopar 5	Termopar 6	Termopar 7	Termopar 8	Termopar 10
<b>Média</b>	24,99	25,77	24,28	25,03	25,97	26,87	26,44	27,65
<b>Desvio Padrão</b>	4,13	3,96	3,53	3,03	3,31	3,43	3,06	2,75
<b>Nº leituras</b>	828,00	828,00	828,00	828,00	828,00	828,00	828,00	828,00

## **ANEXO E: Ensaio – medições e cálculos**



**Ensaio nº 1**

Tabela 30 – Valores obtidos por medição no ensaio nº1

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	21,15	19,00	37960,00
2	0,220	22,21	20,16	38212,47
4	0,545	20,11	21,88	38585,43
5	0,717	22,11	22,79	38782,81
6	0,875	19,36	23,62	38964,12
7	1,040	22,92	24,50	39153,47
8	1,212	19,49	25,40	39350,86
10	1,430	26,03	26,56	39601,03

Tabela 31 – Valores obtidos por cálculo para o ensaio nº1

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	19,58	38086,23	55,72	5,67E-05	2,01	1,16	18,50
2-4	0,38	21,02	38398,95	60,68	4,49E-05	2,35	1,72	18,81
4-5	0,63	22,33	38684,12	65,49	3,73E-05	1,03	0,91	19,09
5-6	0,80	23,21	38873,47	68,83	3,34E-05	0,85	0,83	19,28
6-7	0,96	24,06	39058,80	72,22	3,02E-05	0,80	0,87	19,47
7-8	1,13	24,95	39252,16	75,90	2,73E-05	0,76	0,91	19,66
8-10	1,32	25,98	39475,94	80,33	2,45E-05	0,86	1,15	19,88
Total:					2,54E-04	8,661		

**Ensaio nº 2**

Tabela 32 – Valores obtidos por medição no ensaio nº2

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	21,62	19,00	37960,00
2	0,220	20,85	20,10	38212,47
4	0,545	18,62	21,72	38585,43
5	0,717	22,54	22,58	38782,81
6	0,875	18,93	23,37	38964,12
7	1,040	24,28	24,19	39153,47
8	1,212	22,75	25,05	39350,86
10	1,430	28,05	26,14	39601,03

Tabela 33 – Valores obtidos por cálculo para o ensaio nº2

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	ΔT	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	19,55	38086,23	55,61	5,71E-05	2,02	1,10	18,00
2-4	0,38	20,91	38398,95	60,29	4,57E-05	2,39	1,62	18,31
4-5	0,63	22,15	38684,12	64,80	3,83E-05	1,06	0,86	18,59
5-6	0,80	22,98	38873,47	67,93	3,44E-05	0,88	0,79	18,78
6-7	0,96	23,78	39058,80	71,11	3,12E-05	0,83	0,82	18,97
7-8	1,13	24,62	39252,16	74,54	2,83E-05	0,79	0,86	19,16
8-10	1,32	25,60	39475,94	78,66	2,55E-05	0,90	1,09	19,38
					2,60E-04	8,862		

**Ensaio nº 3**

Tabela 34 – Valores obtidos por medição no ensaio nº3

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida	Calculada	Calculada
		Água	Água	Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	22,53	23,00	40286,00
2	0,220	20,76	24,03	40538,47
4	0,545	18,79	25,56	40911,43
5	0,717	21,71	26,37	41108,81
6	0,875	20,09	27,11	41290,12
7	1,040	24,02	27,89	41479,47
8	1,212	24,17	28,70	41676,86
10	1,430	27,31	29,72	41927,03

Tabela 35 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº3

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	23,52	40412,23	70,05	3,37E-05	1,20	1,03	18,63
2-4	0,38	24,80	40724,95	75,26	2,90E-05	1,52	1,53	18,94
4-5	0,63	25,97	41010,12	80,27	2,55E-05	0,71	0,81	19,22
5-6	0,80	26,74	41199,47	83,73	2,35E-05	0,60	0,74	19,41
6-7	0,96	27,50	41384,80	87,23	2,18E-05	0,58	0,78	19,59
7-8	1,13	28,29	41578,16	91,01	2,02E-05	0,56	0,81	19,79
8-10	1,32	29,21	41801,94	95,53	1,86E-05	0,65	1,02	20,01
					1,72E-04	5,811		

**Ensaio nº 4**

Tabela 36 – Valores obtidos por medição no ensaio nº4

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	22,16	20,00	30982,00
2	0,220	19,76	21,11	31234,47
4	0,545	16,44	22,74	31607,43
5	0,717	21,27	23,61	31804,81
6	0,875	18,81	24,41	31986,12
7	1,040	23,62	25,24	32175,47
8	1,212	21,84	26,10	32372,86
10	1,430	26,60	27,20	32623,03

Tabela 37 – Valores obtidos por cálculo para o ensaio nº4

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	20,55	31108,23	59,04	3,58E-05	1,27	1,11	17,25
2-4	0,38	21,93	31420,95	63,96	3,07E-05	1,61	1,64	17,56
4-5	0,63	23,18	31706,12	68,71	2,70E-05	0,75	0,87	17,84
5-6	0,80	24,01	31895,47	72,01	2,49E-05	0,63	0,80	18,03
6-7	0,96	24,82	32080,80	75,35	2,31E-05	0,61	0,83	18,22
7-8	1,13	25,67	32274,16	78,97	2,14E-05	0,59	0,87	18,41
8-10	1,32	26,65	32497,94	83,32	1,97E-05	0,69	1,10	18,63
					1,83E-04	6,161		

**Ensaio nº 5**

Tabela 38 – Valores obtidos por medição no ensaio nº5

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	22,62	23,00	30982,00
2	0,220	19,81	24,41	31234,47
4	0,545	18,12	26,48	31607,43
5	0,717	23,07	27,58	31804,81
6	0,875	19,12	28,59	31986,12
7	1,040	21,46	29,65	32175,47
8	1,212	22,34	30,75	32372,86
10	1,430	32,22	32,14	32623,03

Tabela 39 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº5

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	23,70	31108,23	70,79	2,52E-05	0,89	1,41	17,13
2-4	0,38	25,45	31420,95	78,01	2,15E-05	1,12	2,08	17,44
4-5	0,63	27,03	31706,12	85,07	1,87E-05	0,52	1,10	17,72
5-6	0,80	28,09	31895,47	90,02	1,72E-05	0,44	1,01	17,91
6-7	0,96	29,12	32080,80	95,09	1,59E-05	0,42	1,05	18,09
7-8	1,13	30,20	32274,16	100,60	1,46E-05	0,41	1,10	18,29
8-10	1,32	31,45	32497,94	107,30	1,34E-05	0,47	1,39	18,51
					1,26E-04	4,272		

**Ensaio nº 6**

Tabela 40 – Valores obtidos por medição no ensaio nº6

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	26,43	27,00	33308,00
2	0,220	17,83	28,76	33560,47
4	0,545	16,62	31,36	33933,43
5	0,717	26,08	32,73	34130,81
6	0,875	17,39	33,99	34312,12
7	1,040	24,65	35,31	34501,47
8	1,212	21,33	36,69	34698,86
10	1,430	18,77	38,43	34949,03

Tabela 41 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº6

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	27,88	33434,23	89,02	1,80E-05	0,64	1,76	18,25
2-4	0,38	30,06	33746,95	99,86	1,51E-05	0,79	2,60	18,56
4-5	0,63	32,04	34032,12	110,63	1,31E-05	0,36	1,37	18,84
5-6	0,80	33,36	34221,47	118,27	1,19E-05	0,30	1,26	19,03
6-7	0,96	34,65	34406,80	126,14	1,09E-05	0,29	1,32	19,22
7-8	1,13	36,00	34600,16	134,78	9,98E-06	0,28	1,37	19,41
8-10	1,32	37,56	34823,94	145,36	9,05E-06	0,32	1,74	19,63
					8,80E-05	2,979		

**Ensaio nº 7**

Tabela 42 – Valores obtidos por medição no ensaio nº7

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	21,08	20,00	51000,00
2	0,220	20,62	21,16	51249,84
4	0,545	22,89	22,87	51618,91
5	0,717	22,05	23,78	51814,24
6	0,875	23,59	24,61	51993,66
7	1,040	24,17	25,48	52181,04
8	1,212	23,99	26,39	52376,37
10	1,430	25,54	27,54	52623,93

Tabela 43 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº7

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	20,58	51124,92	59,13	1,25E-04	4,38	1,16	18,75
2-4	0,38	22,02	51434,37	64,30	7,77E-05	4,03	1,71	19,06
4-5	0,63	23,33	51716,57	69,30	5,69E-05	1,56	0,91	19,34
5-6	0,80	24,20	51903,95	72,78	4,79E-05	1,21	0,83	19,53
6-7	0,96	25,05	52087,35	76,31	4,13E-05	1,09	0,87	19,71
7-8	1,13	25,94	52278,70	80,14	3,59E-05	0,98	0,91	19,90
8-10	1,32	26,96	52500,15	84,75	3,10E-05	1,08	1,15	20,12
					4,16E-04	14,324		

**Ensaio nº 8**

Tabela 44 – Valores obtidos por medição no ensaio nº8

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	23,15	20,00	53000,00
2	0,220	23,38	21,17	53249,84
4	0,545	23,71	22,90	53618,91
5	0,717	24,81	23,81	53814,24
6	0,875	25,76	24,65	53993,66
7	1,040	26,30	25,53	54181,04
8	1,212	26,29	26,44	54376,37
10	1,430	27,29	27,60	54623,93

Tabela 45 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº8

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	$\Delta T$	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	20,58	53124,92	59,15	1,66E-04	5,82	1,17	19,75
2-4	0,38	22,03	53434,37	64,36	9,15E-05	4,74	1,73	20,06
4-5	0,63	23,35	53716,57	69,41	6,37E-05	1,75	0,91	20,34
5-6	0,80	24,23	53903,95	72,92	5,26E-05	1,32	0,84	20,53
6-7	0,96	25,09	54087,35	76,49	4,46E-05	1,17	0,88	20,71
7-8	1,13	25,99	54278,70	80,36	3,83E-05	1,05	0,91	20,90
8-10	1,32	27,02	54500,15	85,02	3,28E-05	1,14	1,16	21,12

4,90E-04 17,003

**Ensaio nº 9**

Tabela 46 – Valores obtidos por medição no ensaio nº9

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida	Calculada	Calculada
		Água	Água	Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	24,68	20,00	53000,00
2	0,220	25,05	21,15	53249,84
4	0,545	24,13	22,85	53618,91
5	0,717	25,14	23,75	53814,24
6	0,875	25,61	24,58	53993,66
7	1,040	26,85	25,44	54181,04
8	1,212	26,12	26,34	54376,37
10	1,430	27,29	27,48	54623,93

Tabela 47 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº9

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	ΔT	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	20,58	53124,92	59,11	1,67E-04	5,86	1,15	19,75
2-4	0,38	22,00	53434,37	64,24	9,26E-05	4,80	1,70	20,06
4-5	0,63	23,30	53716,57	69,19	6,46E-05	1,77	0,90	20,34
5-6	0,80	24,16	53903,95	72,64	5,34E-05	1,34	0,83	20,53
6-7	0,96	25,01	54087,35	76,14	4,54E-05	1,19	0,86	20,71
7-8	1,13	25,89	54278,70	79,92	3,90E-05	1,07	0,90	20,90
8-10	1,32	26,91	54500,15	84,48	3,34E-05	1,16	1,14	21,12
					4,95E-04	17,192		

**Ensaio nº 10**

Tabela 48 – Valores obtidos por medição no ensaio nº10

Termopares	Cota	Temp.	Temp.	Entalpia
		medida Água	Calculada Água	Calculada Ar
	m	°C	°C	J/kg
1	0,000	24,99	20,00	53000,00
2	0,220	25,77	21,14	53249,84
4	0,545	24,28	22,83	53618,91
5	0,717	25,03	23,72	53814,24
6	0,875	25,97	24,54	53993,66
7	1,040	26,87	25,39	54181,04
8	1,212	26,44	26,29	54376,37
10	1,430	27,65	27,42	54623,93

Tabela 49 – Valores calculados obtidos por cálculo para o ensaio nº10

Seccção	Cota Média	Temp. média Água	Entalpia média Ar	Entalpia Ar Saturado	1/(hi-har)	hA/cp	ΔT	Temp. Calculada Ar
	m	°C	J/kg	kJ/kg	kg/J	kg/min		°C
1-2	0,11	20,57	49714,92	59,10	1,07E-04	3,74	1,14	20,00
2-4	0,38	21,98	50024,37	64,18	7,07E-05	3,66	1,69	20,31
4-5	0,63	23,27	50306,57	69,09	5,32E-05	1,46	0,89	20,59
5-6	0,80	24,13	50493,95	72,50	4,54E-05	1,14	0,82	20,78
6-7	0,96	24,97	50677,35	75,96	3,95E-05	1,04	0,86	20,96
7-8	1,13	25,84	50868,70	79,71	3,47E-05	0,95	0,89	21,15
8-10	1,32	26,85	51090,15	84,23	3,02E-05	1,05	1,13	21,37
					3,80E-04	13,045		

**ANEXO F: Coeficiente  $h$ ,  $A_{gotas}$ ,  $T_{queda}$  e  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$**



Tabela 50 – Dados iniciais

Caudal de água =	0,120 (kg/s)
nº de aspersores =	54
Diâmetro da gota =	2,25 (mm)
$\rho$ água =	1000 (kg/m <sup>3</sup> )
Coefficiente de Arrasto =	0,69
Volume da Gota =	5,964E-09 (m <sup>3</sup> )
Área Frontal da Gota =	3,976E-06 (m <sup>2</sup> )
$\rho$ ar =	1,161 (kg/m <sup>3</sup> )
V inicial da gota =	0,559 (m/s)
$\Delta t$ =	0,001 (s)
a =	-0,266 (m <sup>-1</sup> )
b =	9,81 (m/s <sup>2</sup> )
cp médio do ar =	1000 (J/kg/K)
Caudal de ar =	2,340 (kg/s)
Velocidade do ar =	3,328 (m/s)

Tabela 51 – Integração segundo o método de Runge-Kutta de 4ª ordem

Tempo	v	K1	K2	K3	K4	v	h <sub>queda</sub>
(s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m)
0,000	0,314	0,007	0,007	0,007	0,007	0,322	0,000
0,001	0,322	0,007	0,007	0,007	0,007	0,329	0,000
0,002	0,329	0,007	0,007	0,007	0,007	0,336	0,001
0,003	0,336	0,007	0,007	0,007	0,007	0,343	0,001
0,004	0,343	0,007	0,007	0,007	0,007	0,351	0,001
0,005	0,351	0,007	0,007	0,007	0,007	0,358	0,002
0,006	0,358	0,007	0,007	0,007	0,007	0,365	0,002
0,007	0,365	0,007	0,007	0,007	0,007	0,372	0,002
0,008	0,372	0,007	0,007	0,007	0,007	0,380	0,003
0,009	0,380	0,007	0,007	0,007	0,007	0,387	0,003
0,010	0,387	0,007	0,007	0,007	0,007	0,394	0,004
0,011	0,394	0,007	0,007	0,007	0,007	0,401	0,004
0,012	0,401	0,007	0,007	0,007	0,007	0,408	0,004
0,013	0,408	0,007	0,007	0,007	0,007	0,415	0,005
0,014	0,415	0,007	0,007	0,007	0,007	0,423	0,005
0,015	0,423	0,007	0,007	0,007	0,007	0,430	0,006
0,016	0,430	0,007	0,007	0,007	0,007	0,437	0,006
0,017	0,437	0,007	0,007	0,007	0,007	0,444	0,006
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
0,749	2,517	0,001	0,001	0,001	0,001	2,517	1,385
0,750	2,517	0,001	0,001	0,001	0,001	2,518	1,388
0,751	2,518	0,001	0,001	0,001	0,001	2,519	1,391
0,752	2,519	0,001	0,001	0,001	0,001	2,520	1,393
0,753	2,520	0,001	0,001	0,001	0,001	2,520	1,396
0,754	2,520	0,001	0,001	0,001	0,001	2,521	1,398
0,755	2,521	0,001	0,001	0,001	0,001	2,522	1,401
0,756	2,522	0,001	0,001	0,001	0,001	2,522	1,403
0,757	2,522	0,001	0,001	0,001	0,001	2,523	1,406
0,758	2,523	0,001	0,001	0,001	0,001	2,524	1,408
0,759	2,524	0,001	0,001	0,001	0,001	2,525	1,411
0,760	2,525	0,001	0,001	0,001	0,001	2,525	1,413
0,761	2,525	0,001	0,001	0,001	0,001	2,526	1,416
0,762	2,526	0,001	0,001	0,001	0,001	2,527	1,418
0,763	2,527	0,001	0,001	0,001	0,001	2,527	1,421
0,764	2,527	0,001	0,001	0,001	0,001	2,528	1,423
0,765	2,528	0,001	0,001	0,001	0,001	2,529	1,426
0,766	2,529	0,001	0,001	0,001	0,001	2,530	1,428
0,767	2,530	0,001	0,001	0,001	0,001	2,530	1,430

Tabela 52 – Cálculo de  $\frac{hA_{gotas}}{cP_{médio}}$

Propriedades do ar a 300 K	
$\rho_{ar} =$	1,161 (kg/m <sup>3</sup> )
Pr =	0,707
Condutibilidade Térmica (k) =	2,63E-02 (W/m.K)
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) =	1,85E-05 (N.s/m <sup>2</sup> )
V média das gotas =	1,866 (m/s)
Re <sub>D</sub> =	735
Nu <sub>D</sub> =	16,5
h =	192,8 (W/m <sup>2</sup> .K)
Massa de água dentro da torre =	0,09204 (kg)
nº de gotas dentro da torre =	15432
Área total de gotas =	0,245 (m <sup>2</sup> )
$h.A_{gotas}/c_{pm} =$	2,839 (kg/min)
$h.A_{gotas}/c_{pm} - \text{global de ensaio} =$	2,970 (kg/min)

