

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM TUBO DE VÓRTICES

Rafael Angelo Polisel

São Paulo
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM TUBO DE VÓRTICES

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Rafael Angelo Polisel

Orientador: José Roberto Simões Moreira

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2005

TF_05
p 759e

078 v - 4978847

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011824

FICHA CATALOGRÁFICA

Polisel, Rafael Angelo

**Estudo experimental de um tubo de vórtices / R.A. Polisel. --
São Paulo, 2005.**

p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Refrigeração 2.Vórtices dos gases 3.Tubos I.Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecânica II.t.**

RESUMO

O objetivo deste trabalho é um estudo experimental paramétrico de um Tubo de Vórtices ou Tubo de Ranque-Hilsch, com a finalidade de se determinarem as melhores condições de projeto através da construção e testes de um protótipo. O equipamento consiste basicamente de um tubo cilíndrico no qual é injetado ar comprimido numa entrada tangencial ao mesmo, originando duas correntes de ar nas suas extremidades opostas. Onde a saída se dá pela periferia do tubo, origina-se um escoamento a uma temperatura superior à de entrada, enquanto que na saída onde a liberação se dá pelo centro, obtêm-se ar a uma temperatura inferior à de entrada. Os ensaios apresentaram resultados bastante satisfatórios possibilitando a seleção de uma faixa ótima de operação para a variável área quente.

ABSTRACT

The goal of this work is a parametric experimental study of a Vortex Tube or Ranque-Hilsch Tube, whose purpose is to find out the best operational conditions by the construction and tests of a prototype. The device is basically formed by a cylindrical body having a compressed air inlet machined perpendicularly to it, from which two flow streams are obtained that is driven to each one of the tube ends. In one of them, where the air leaves the tube in the peripheral cross sectional area, the air is warmer than the intake air temperature, while in the other end the exiting air is cooler, leaving the tube in the central area. Interesting and satisfactory results were gotten with the experiments, allowing to select a best range to the variable hot area.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Modelagem teórica	3
2.1	Primeira Lei da Termodinâmica	3
3	Bancada Experimental	5
3.1	Arranjo Experimental	5
3.1.1	Bancada Original	5
3.1.2	Nova Bancada	6
3.2	Instrumentos de Medição	7
3.2.1	Temperatura	7
3.2.2	Pressão	8
3.2.3	Velocidade	9
3.3	Equipamentos	9
3.3.1	Compressor	9
3.3.2	Tubo de Vórtices	10
4	Ensaaios	13
4.1	Ensaaios Iniciais	13
4.2	Ensaaios Gerais	14
5	Coleta de Dados	16
5.1	Procedimento Experimental	16
5.2	Manipulação dos dados obtidos	16
5.2.1	Determinação da “fração fria medida”	16
5.2.2	Primeira Lei da Termodinâmica – “Fração fria teórica”	17
6	Resultados	19
6.1	Ensaaios Iniciais	19
6.2	Ensaaios Gerais	21
6.2.1	Experimentos Originais	21
6.2.2	Novos Experimentos	30
7	Conclusões	36
8	Referências	38

Apêndices

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 - Esquema de funcionamento de um Tubo de Vórtices.....	2
Fig. 2 – Volume de controle	3
Fig. 3 - Esquema do aparato experimental original.....	5
Fig. 4 - Bancada experimental - SISEA.....	6
Fig. 5 - Melhorias no aparato experimental	7
Fig. 6 – Detalhe da seção de retificação	7
Fig. 7 - Bucim rosqueado no tubo de saída do escoamento (foto à esquerda).....	8
Fig. 8 - Válvula reguladora de pressão (foto à esquerda) e	8
Fig. 9 – Anemômetro de hélice	9
Fig. 10 - Tubo desmontado	11
Fig. 11 - Luva de injeção de ar comprimido unida à bucha.....	11
Fig. 12 - Detalhe do rebaixo nas bolachas	12
Fig. 13 - Bolacha fixa e concêntrica ao tubo	12
Fig. 14 - Tubo de Vórtices	12
Fig. 15 – EI - Influência do comprimento do tubo.....	19
Fig. 16 – EI - Influência da área fria com $A_q = 25,1 \text{ mm}^2$	20
Fig. 17 - EI - Influência da área quente com $A_f = 12,6 \text{ mm}^2$	20
Fig. 18 – EI - Influência da razão $R = A_f/A_q$ para $L = 300 \text{ mm}$	21
Fig. 19 – EGa - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 19,6 \text{ mm}^2$	22
Fig. 20 – EGa - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 28,3 \text{ mm}^2$	22
Fig. 21 – EGa - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 38,5 \text{ mm}^2$	23
Fig. 22 – EGa - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 63,6 \text{ mm}^2$	23
Fig. 23 – EGa - Influência da área quente para $L = 300 \text{ mm}$	24
Fig. 24 – EGa - Influência da área quente para $L = 400 \text{ mm}$	24
Fig. 25 – EGa - Influência da área quente para $L = 500 \text{ mm}$	25
Fig. 26 – EGa - Influência da área quente para $L = 600 \text{ mm}$	25
Fig. 27 – EGa - Influência da área quente para $L = 700 \text{ mm}$	26
Fig. 28 – EGa - Influência da área fria para $L = 300 \text{ mm}$	26
Fig. 29 – EGa - Influência da área fria para $L = 400 \text{ mm}$	27
Fig. 30 – EGa - Influência da área fria para $L = 500 \text{ mm}$	27

Fig. 31 – EGa - Influência da área fria para $L = 600$ mm.....	28
Fig. 32 – EGa - Influência da área fria para $L = 700$ mm.....	28
Fig. 33 – EGa - Primeira Lei da Termodinâmica – Comparação $\mu_{teo} \times \mu_{med}$	29
Fig. 34 – EGb - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 19,6$ mm ²	30
Fig. 35 – EGb - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 28,3$ mm ²	31
Fig. 36 – EGb - Influência da área quente para $L = 300$ mm.....	31
Fig. 37 – EGb - Influência da área quente para $L = 400$ mm.....	32
Fig. 38 – EGb - Influência da área quente para $L = 500$ mm.....	32
Fig. 39 – EGb - Influência da área quente para $L = 600$ mm.....	33
Fig. 40 – EGb - Influência da área quente para $L = 700$ mm.....	33
Fig. 41 – EGb - Primeira Lei da Termodinâmica – Comparação $\mu_{teo} \times \mu_{med}$	34
Fig. 42 – Erro percentual entre os valores de “fração fria teórica” e “medida”	35

LISTA DE TABELAS

Tab. 1 - Peças construídas para os ensaios iniciais	13
Tab. 2 - Testes iniciais	14
Tab. 3 - Bolachas quentes	15
Tab. 4 - Bolachas frias	15

1 INTRODUÇÃO

O Tubo de Vórtices (em inglês “Vortex Tube”), também conhecido como Tubo de Ranque-Hilsch, foi criado acidentalmente pelo físico francês Georges Ranque em meados de 1930. Georges Ranque fazia experimentos com uma bomba geradora de vórtices e observou a liberação de ar aquecido em uma saída e ar frio em outra. Montou então uma pequena companhia a fim de explorar o potencial comercial deste estranho equipamento capaz de produzir ar quente e frio sem utilização de peças móveis, porém, sem êxito, logo faliu.

Ranque ainda apresentou um artigo na Sociedade Científica na França em 1933 sobre o Tubo de Vórtices, porém, devido ao desinteresse de todos e incredulidade no fenômeno, seu invento ficou esquecido até que Rudolph Hilsch, físico alemão, mostrou interesse pelo assunto e, explorando-o mais profundamente, atraiu leitores que acreditavam que Hilsch tivesse inventado o aparato, passando a ser chamado então por “Tubo de Hilsch”. Esta concepção foi ocasionada devido a um erro na datilografia do primeiro artigo de Hilsch, referindo-se a Ranque datado de 1939, quando o correto seria 1933. Apesar das informações incorretas, o conceito do tubo de vórtices foi ganhando credibilidade e conquistou espaço em diversas pesquisas e publicações em todo o mundo.

O Tubo de Vórtices é composto basicamente de um tubo cilíndrico onde ar comprimido é injetado perpendicular e tangencialmente à parede interna do tubo por um bocal. Dentro do tubo, o ar escoia em uma trajetória em espiral gerando vórtices. Podendo atingir até 1.000.000 rpm, o ar gira avançando em direção à extremidade quente do tubo onde apenas uma fração deste é liberada pela borda. A vazão restante é forçada a retornar pelo interior do vórtice gerado inicialmente, porém, ainda na mesma rotação, pelo princípio da conservação do momento angular, tem-se que este novo fluxo perde energia na forma de calor para a corrente de ar que deixou o tubo, aquecendo-a.

Dessa forma, cada extremidade do cilindro possibilita uma saída para o escoamento. Em uma das saídas, onde o ar consegue sair apenas pela periferia do diâmetro do tubo, conforme a Fig. 1, a temperatura do ar é superior à temperatura de

entrada. Já na outra saída, na qual o ar consegue sair apenas pela região central da seção transversal do tubo, este se encontra a uma temperatura inferior à de entrada.



Fig. 1 - Esquema de funcionamento de um Tubo de Vórtices

Como exemplos de aplicações para o Tubo de Vórtices, pode-se citar:

- Coletes de resfriamento: alguns operários são obrigados a usar coletes que resfriam a pele como em algumas minas, por exemplo. Neste caso, o colete já vem equipado com o Tubo de Vórtices e o ar comprimido é retirado das linhas já existentes;
- Refrigeração de peças: no lugar de se utilizar fluidos refrigerantes na usinagem de peças, pode-se empregar o Tubo de Vórtices para uma refrigeração pontual da ferramenta e do local que está sendo usinado;
- Liquefação de gases: com as altas pressões disponíveis dos poços naturais, existem casos em que o Tubo de Vórtices é utilizado para obtenção de GLP liquefeito ou mesmo até nitrogênio e oxigênio liquefeitos;
- Separação de partículas: devido ao efeito centrífugo existente no equipamento, o Tubo de Ranque-Hilsch vem sendo utilizado também para separação de particulados presentes em gases;
- Caixa de força: refrigeração de caixas onde existem equipamentos elétricos em geral.

2 MODELAGEM TEÓRICA

2.1 Primeira Lei da Termodinâmica

Considerando o volume de ilustrado na Fig. 2 abaixo podemos escrever a Primeira Lei da Termodinâmica dada pela Eq.(1), onde os índices 'e' e 's' referem-se às condições de entrada e saída, respectivamente.

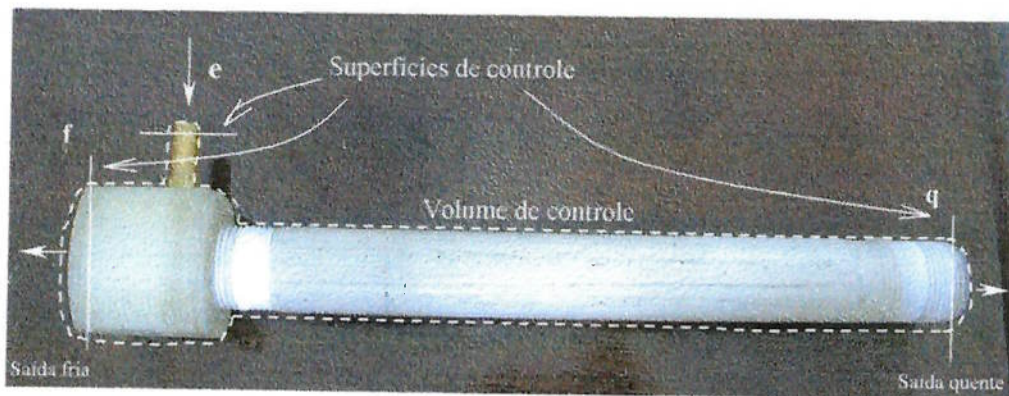


Fig. 2 – Volume de controle

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (1)$$

Adotando a hipótese de regime permanente, a Eq.(1) pode ser simplificada para a Eq.(2) a seguir.

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (2)$$

Admiti-se que o Tubo de Ranque-Hilsh é termicamente isolado do meio, ou seja, não troca calor com o meio e que não existe a realização de trabalho no processo. Com estas hipóteses a Primeira Lei evolui para a Eq.(3).

$$\dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \dot{m}_q \left(h_q + \frac{1}{2} V_q^2 + gZ_q \right) + \dot{m}_f \left(h_f + \frac{1}{2} V_f^2 + gZ_f \right) \quad (3)$$

Por fim, assumiu-se que a diferença de cota entre a entrada e saídas do escoamento é desprezível, bem como a variação de velocidade, resultando finalmente na Eq.(4) a seguir.

$$\dot{m}_e . h_e = \dot{m}_q . h_q + \dot{m}_f . h_f \quad (4)$$

A Eq.(4) mostra a simplicidade do processo olhado simplesmente como um volume de controle. Pode-se simplificar ainda mais a Eq.(4) adotando-se a hipótese de gás perfeito e assumindo que o calor específico a pressão constante (c_p) é constante. Assim, a Primeira Lei é representada pela Eq.(5):

$$\dot{m}_e . T_e = \dot{m}_q . T_q + \dot{m}_f . T_f \quad (5)$$

Definindo μ como a fração em massa da saída fria ($\mu = \dot{m}_f / \dot{m}_e$) e, sabendo que pela conservação de massa têm-se $\dot{m}_e = \dot{m}_q + \dot{m}_f$, pode-se simplificar a Eq.(5) para a Eq.(6).

$$T_e = (1 - \mu) . T_q + \mu . T_f \quad (6)$$

Conforme a seção 5.2, a Eq.(6) será utilizada para comparação entre os dados experimentalmente obtidos e os teoricamente calculados.

3 BANCADA EXPERIMENTAL

Utilizando-se dos recursos do Laboratório SISEA, uma bancada de testes foi montada para a realização dos ensaios com o Tubo de Ranque-Hilsch.

3.1 Arranjo Experimental

3.1.1 Bancada Original

A Fig. 3 mostrada a seguir esquematiza a bancada experimental montada inicialmente para a realização dos ensaios.

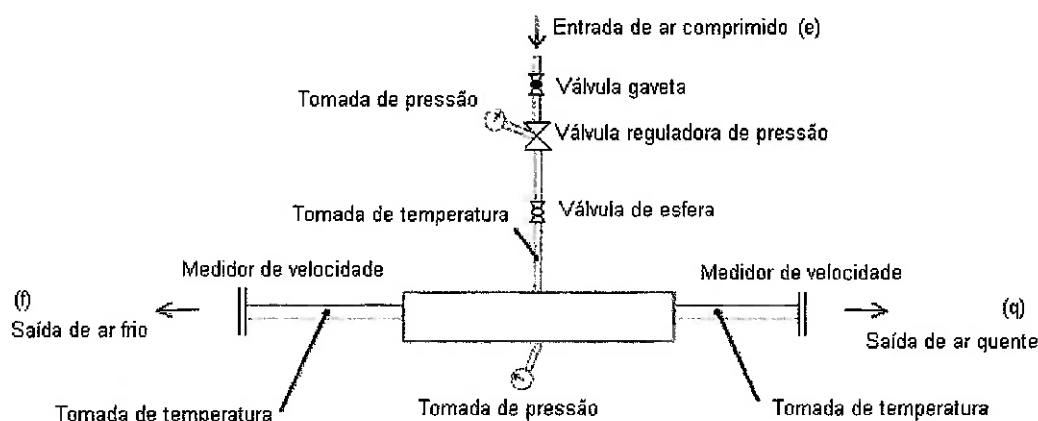


Fig. 3 - Esquema do aparato experimental original

O Tubo de Ranque-Hilsch está ligado a uma linha de ar comprimido pela seção *e*, através de uma válvula gaveta, seguida de uma válvula reguladora de pressão. Solidária a esta, há um manômetro onde foi regulada e tomada a pressão de entrada. Finalmente, no trecho entre o regulador de pressão e a entrada do tubo há uma válvula de esfera e uma tomada de temperatura (temperatura de entrada).

Uma tomada de pressão foi feita no corpo do tubo para observação da pressão interna.

As saídas fria e quente do Tubo de Vórtices, seções *f* e *q* respectivamente, estão conectadas a um tubo de PVC onde foram tomadas as respectivas medidas de temperatura através da imersão de um termopar no interior do escoamento e, na

descarga dos tubos, um anemômetro de hélice foi utilizado para a medição das velocidades de saída do ar e posterior cálculo das vazões.

A Fig. 4 abaixo mostra a bancada experimental montada no laboratório SISEA.

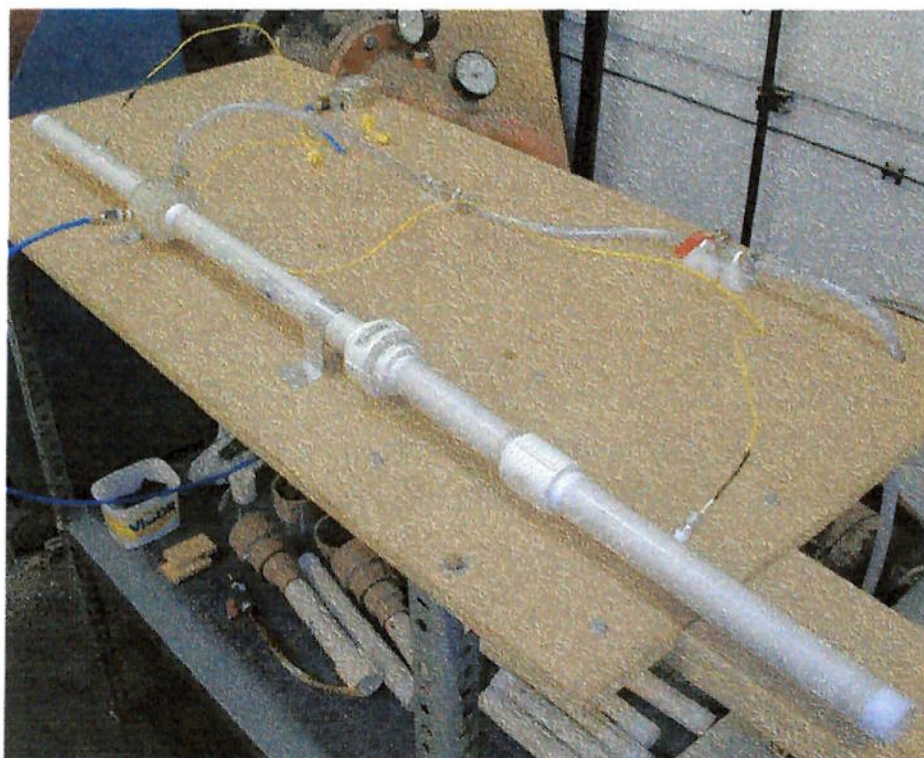


Fig. 4 - Bancada experimental - SISEA

3.1.2 Nova Bancada

Conforme será explicitado mais adiante, na seção 6.2.2, uma melhoria na bancada experimental original se mostrou necessária para a obtenção de dados mais confiáveis. Conforme a Fig. 5 abaixo, foi acrescentada uma seção de retificação do escoamento através de canudos fixados no interior dos tubos de PVC, seguida de um trecho retilíneo igual a dez vezes o diâmetro interno do tubo antes dos pontos de medição de velocidade nas saídas.

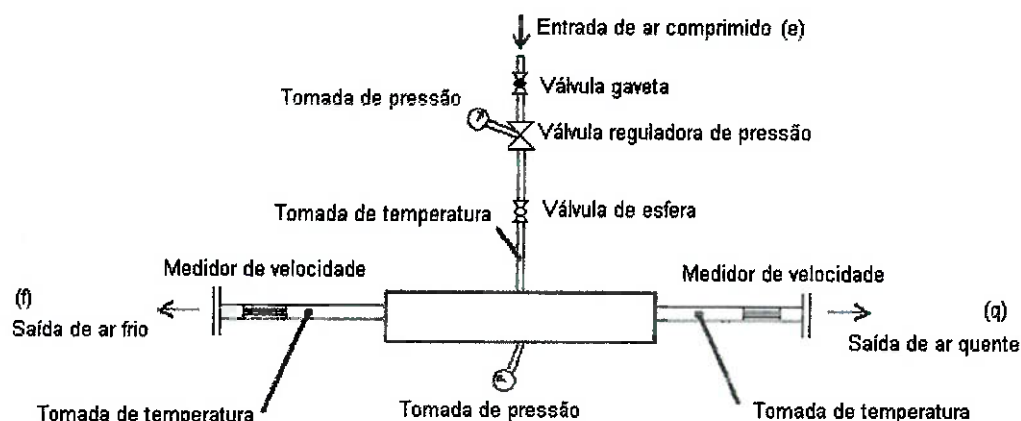


Fig. 5 - Melhorias no aparato experimental

A Fig. 6 mostra o conjunto de canudos fixados no interior do tubo representando a seção de retificação, com a finalidade de minimizar os erros da medição de velocidade devido ao efeito de vorticidade do ar.



Fig. 6 – Detalhe da seção de retificação

3.2 Instrumentos de Medição

3.2.1 Temperatura

Os pontos de tomada de dados de temperatura foram:

- entrada de ar comprimido: na mangueira de injeção imediatamente antes da entrada no tubo;
- saídas de ar frio e quente: através de um termopar fixado por um bucim rosqueado na parede do tubo, em cada uma das saídas;
- temperatura ambiente, tomada no local e hora de realização dos ensaios.

A Fig. 7 abaixo mostra um detalhe dos termopares para tomada de temperatura nas saídas e entrada do escoamento.

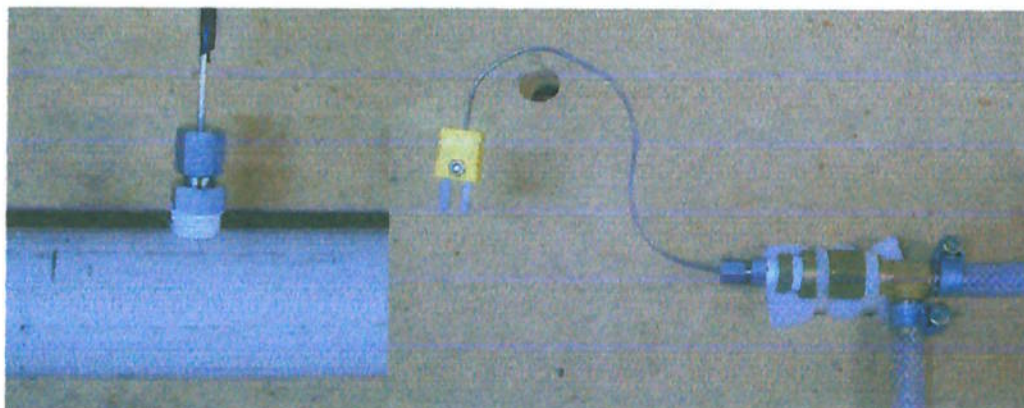


Fig. 7 - Bucim rosqueado no tubo de saída do escoamento (foto à esquerda) e termopar para tomada de temperatura na entrada (foto à direita)

3.2.2 Pressão

As tomadas de pressão foram feitas na entrada de ar, através do manômetro solidário à válvula reguladora de pressão, pressão interna do Tubo de Vórtices e pressão ambiente. A Fig. 8 apresenta a válvula reguladora de pressão e o manômetro para tomada da pressão interna.

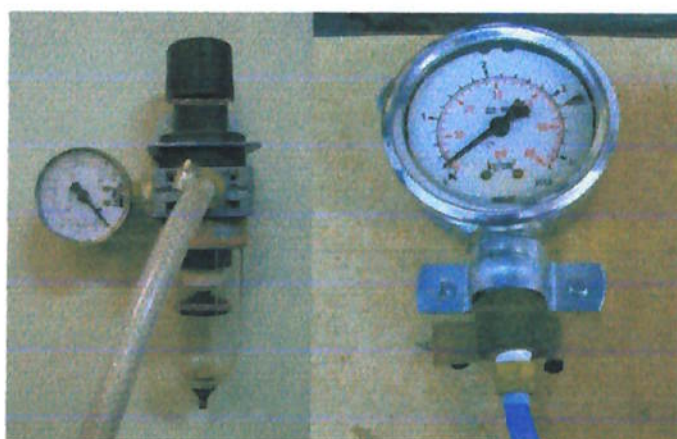


Fig. 8 - Válvula reguladora de pressão (foto à esquerda) e manômetro para leitura da pressão interna (foto à direita)

3.2.3 Velocidade

Nas saídas do tubo foram feitas as medições de velocidade através do anemômetro de hélice apresentado na Fig. 9 abaixo.

Observa-se a complicação de se utilizar nas saídas qualquer tipo de equipamento que gere uma perda de carga significativa, alterando a pressão de saída do Tubo de Vórtices e seu comportamento.



Fig. 9 – Anemômetro de hélice

3.3 Equipamentos

3.3.1 Compressor

O compressor utilizado nos experimentos é o compressor disponível no laboratório de máquinas térmicas da Escola Politécnica da USP.

Os dados de placa do compressor são:

Marca: Wayne

Modelo: W2S5960L0

Série: 5238

Pressão máxima: 7 kgf/cm²

3.3.2 *Tubo de Vórtices*

Com o objetivo de otimização do Tubo de Ranque-Hilsch, foi realizada uma pesquisa a fim de se restringir o estudo paramétrico ao redor de valores onde o tubo se comporte de maneira mais eficiente.

Fixado então alguns limites para as variáveis escolhidas (comprimento do tubo quente e áreas de saída quente e fria), selecionou-se quais seriam os valores a serem assumidos para que, através dos ensaios experimentais, seja possível determinar-se as melhores condições de projeto.

Para o caso do diâmetro interno do tubo, um estudo de seu comportamento no desempenho do Tubo de Vórtices exigiria a construção de tantos tubos quantos fossem os valores determinados para este. Para isso, seriam necessários dois, três ou quatro vezes o número de ensaios a serem realizados, inviabilizando o projeto no tempo previsto.

Alguns critérios foram estabelecidos para o projeto do Tubo de Vórtices, a saber:

- O protótipo teria que possibilitar uma fácil montagem e desmontagem;
- O protótipo deveria ser suscetível à variação em algumas de suas principais dimensões;
- O protótipo deveria ser resistente quanto aos esforços devido a pressão e quanto ao desgaste pela abrasão;
- Utilizar-se ao máximo de materiais facilmente disponíveis no mercado e dos recursos oferecidos.

A solução encontrada para a facilidade na montagem e troca de peças foi a fabricação de partes com roscas de forma que as junções fossem seguras e não originassem danos aos componentes na desmontagem. Uma foto do protótipo desmontado com suas partes rosqueadas pode ser visto na Fig. 10.

O material selecionado para fabricação das peças foi o plástico (PVC e Nylon), possibilitando uma fácil usinagem aliada a uma baixa condutividade térmica, evitando trocas demasiadas de calor com o ambiente. Tomou-se ainda o cuidado de observar a resistência dos materiais utilizados à alta pressão, uma vez que esta pode atingir até 5 bar.



Fig. 10 - Tubo desmontado

O material escolhido para a luva de injeção de ar comprimido foi o nylon. Voltando à necessidade de variação de alguns parâmetros, no caso, a área de saída fria e comprimento do tubo quente, os componentes precisariam ser rosqueados na luva. Surge, então, um problema para o furo de entrada de ar comprimido. A solução proposta foi a utilização de uma bucha, produzida a partir do próprio tubo de PVC, com 20mm de comprimento e rosca passante. Esta seria fixada permanentemente no interior da luva, para que então seja feito o furo de injeção de ar através das duas peças unidas, como mostrado na Fig. 11. A tomada de pressão interna do tubo será feita através de um pequeno furo na luva conectado por uma mangueira a um manômetro.

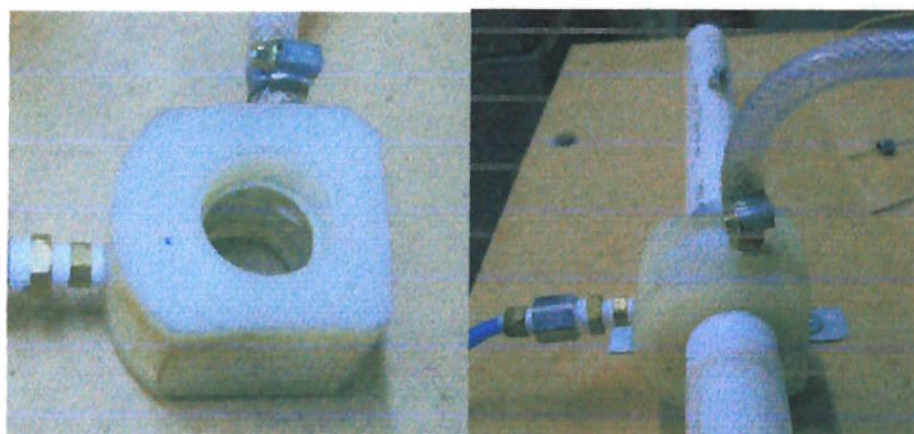


Fig. 11 - Luva de injeção de ar comprimido unida à bucha

As bolachas frias e quentes, responsáveis pela obstrução da passagem do ar pela periferia e pelo centro do diâmetro, respectivamente, foram usinadas em Nylon, com um rebaixo a ser encaixado no interior dos tubos, garantindo a concentricidade. Outro detalhe interessante é, para o caso das bolachas quentes, a utilização de um maior número de furos ao menor diâmetro possível, fazendo com que a saída do ar

seja sempre mais próxima da periferia. As Fig. 12 Fig. 13 mostram os detalhes das bolachas construídas.

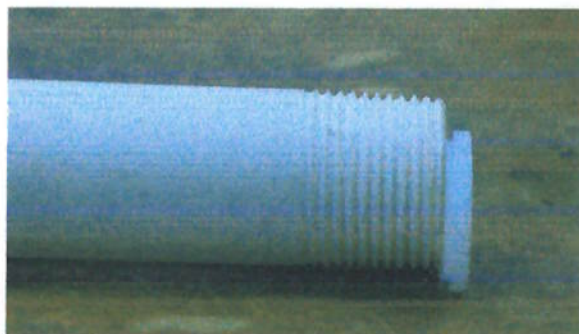


Fig. 12 - Detalhe do rebaixo nas bolachas



Fig. 13 - Bolacha fixa e concêntrica ao tubo

Precisou-se ainda considerar as tomadas de dados, como temperatura, pressão e velocidade. Para evitar erros devido à influência da temperatura externa, foram acrescentados os tubos de descargas quente e fria, que podem ser vistos nas extremidades direita e esquerda do tubo apresentado na Fig. 14, enquanto que as tomadas foram realizadas através da imersão de um termopar em seu interior.



Fig. 14 - Tubo de Vórtices

4 ENSAIOS

4.1 Ensaios Iniciais

Para a análise do desempenho do Tubo de Vórtices foi prevista uma bateria de testes para que se possa avaliar os parâmetros mais significativos do seu funcionamento e chegar a um dimensionamento no qual o tubo trabalhe em seu ponto ótimo.

Retornando aqui ao impasse de invariabilidade do diâmetro interno do Tubo de Ranque-Hilsch, conforme já citado, este foi fixado em 26,4 mm correspondente ao tubo de PVC de diâmetro nominal de 1" disponível no mercado.

Os testes foram divididos em dois grupos, os testes iniciais e os testes gerais. Os testes iniciais têm como principal objetivo avaliar o quão significativo é determinado parâmetro no desempenho do tubo, ou seja, selecionar as variáveis mais importantes em torno dos pontos de melhores resultados.

Já os testes gerais têm a finalidade de avaliar de forma mais refinada as variáveis mais significativas encontradas nos testes iniciais, na tentativa de limitar a resposta do equipamento dentro de uma região de interesse.

Tomando como referência o trabalho de Staschower e Rotter (2003), foram então construídas as seguintes peças apresentadas na Tab. 1 para a realização dos ensaios.

Tab. 1 - Peças construídas para os ensaios iniciais

Bolachas Frias		Bolachas Quentes			Tubo Quente
Diâmetro do furo (mm)	Área Fria (mm ²)	Diâmetro dos furos (mm)	Número de furos	Área quente (mm ²)	Comprimento (mm)
4	12,6	2	8	25,1	180
5	19,6	2	10	31,4	300
6	28,3	3	6	42,4	500
7	38,5	3	8	56,5	700
9	63,6	4	6	75,4	

Os testes iniciais a realizados estão apresentados na Tab. 2 a seguir.

Tab. 2 - Testes iniciais

Teste	Diâmetro interno do tubo - d_i (mm)	Comprimento do tubo - L (mm)	Área Fria - A_f (mm ²)	Área Quente - A_q (mm ²)	Razão de Áreas - R	Pressão de Entrada - p_e (bar)
1	26,4	180	38,5	56,5	0,68	3,0
2	26,4	300	38,5	56,5	0,68	3,0
3	26,4	500	38,5	56,5	0,68	3,0
4	26,4	700	38,5	56,5	0,68	3,0
5	26,4	180	28,3	75,4	0,38	3,0
6	26,4	300	28,3	75,4	0,38	3,0
7	26,4	500	28,3	75,4	0,38	3,0
8	26,4	700	28,3	75,4	0,38	3,0
9	26,4	300	28,3	31,4	0,90	3,0
10	26,4	300	38,5	42,4	0,91	3,0
11	26,4	300	63,6	75,4	0,84	3,0
12	26,4	300	12,6	25,1	0,50	3,0
13	26,4	300	28,3	56,5	0,50	3,0
14	26,4	300	38,5	75,4	0,51	3,0
15	26,4	300	19,6	25,1	0,78	3,0
16	26,4	700	19,6	25,1	0,78	3,0
17	26,4	700	12,6	25,1	0,50	3,0
18	26,4	300	12,6	31,4	0,40	3,0
19	26,4	700	12,6	31,4	0,40	3,0
20	26,4	180	63,6	75,4	0,84	3,0

Para que seja possível uma análise dos ensaios, deve-se rearranjar os experimentos em grupos específicos a fim de variar apenas um parâmetro, mantendo os demais constantes. Dessa forma, combinando-se os experimentos acima de forma conveniente, pôde-se verificar a influência do comprimento do tubo quente, assim como a influência da área quente e área fria, individualmente, e a importância da razão entre estas áreas.

4.2 Ensaios Gerais

O processo de escolha dos valores das variáveis que foram utilizados para os testes gerais está descrito na seção 6.1.

As Tab. 3 e Tab. 4 mostram os diâmetros e a quantidade de furos nas bolachas quente e fria utilizadas nestes experimentos, respectivamente.

Tab. 3 - Bolachas quentes

Bolachas Quentes		
Diâmetro dos Furos (mm)	Número de Furos	Área Total (mm ²)
4	8	100,5
4	6	75,4
3	8	56,5
3	6	42,4
2	10	31,4

Tab. 4 - Bolachas frias

Bolachas Frias	
Diâmetro dos Furos (mm)	Área Total (mm ²)
9	63,6
7	38,5
6	28,3
5	19,6

Em todos os experimentos foi utilizada a maior pressão de entrada viável que a aparelhagem disponível podia fornecer, visto que, conforme apresentado por Ahlborn et al (1994), a influência das pressões no Tubo de Vórtices está mais relacionada com a Queda de Pressão Normalizada, $(p_e - p_f)/p_f$ onde p_e e p_f são as pressões na entrada e saída fria, do que com as pressões absolutas e observando que maiores quedas de temperatura na saída fria podem ser obtidas para maiores valores de $(p_e - p_f)/p_f$, mesmo para pressões de entrada abaixo da atmosférica (Keller et al, 1996).

Dessa forma, as saídas foram mantidas na pressão atmosférica, alimentando-se o Tubo de Ranque-Hilsch com ar a uma pressão de 3 bar nos ensaios iniciais e nos ensaios gerais originais. Após as análises dos resultados e decisão pela tomada de novos dados, o reparo do segundo estágio do compressor disponível permitiu a realização das novas experiências com pressões de até 4 bar na entrada, até o colapso do compressor impossibilitando o fechamento destas.

5 COLETA DE DADOS

5.1 Procedimento Experimental

A seguir estão especificados os procedimentos utilizados para a realização dos ensaios experimentais.

- 1 – Montar a configuração a ser testada e verificar quanto a vazamentos;
- 2 – Ajustar a pressão de entrada desejável com a válvula reguladora de pressão;
- 3 – Realizar as medidas da pressão interna, velocidades, queda de pressão na placa de orifício e temperaturas;
- 4 – Atentar para que o procedimento experimental não dure mais que 2 minutos, para que a variação de pressão do cilindro não afete seus dados;
- 5 – Respeitar um intervalo de cerca de 3 minutos entre um ensaio e outro para enchimento do reservatório de ar comprimido.

5.2 Manipulação dos dados obtidos

Para validação e confiabilidade das medições realizadas, serão comparados os valores da fração fria obtida a partir de sua definição e medições de velocidade conforme a seção a seguir, com a calculada a partir do balanço da Primeira Lei da Termodinâmica, segundo a seção 5.2.2.

5.2.1 Determinação da “fração fria medida”

Partindo da definição de fração mássica fria, tem-se:

$$\mu_{med} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_e} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f + \dot{m}_q} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_q}{\dot{m}_f}} \quad (7)$$

onde os índices “e”, “f” e “q” indicam “entrada”, “fria” e “quente” para se referir às respectivas vazões mássicas. Por outro lado, tem-se que $\dot{m}_f = \rho_f \cdot A \cdot V_f$ e $\dot{m}_q = \rho_q \cdot A \cdot V_q$ são as vazões mássicas de ar nas saídas fria e quente,

respectivamente, ρ_f é a densidade do fluxo de ar frio, ρ_q a densidade do fluxo de ar quente e A as áreas de saída dos escoamentos de ar frio ou quente, neste caso, iguais.

A partir da Eq.(7) chega-se então à seguinte expressão que representa o valor da fração fria “medida”, μ_{med} , como função apenas das velocidades de saída do ar e de sua massa específica:

$$\mu_{med} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_q}{\dot{m}_f}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_q \cdot A \cdot V_q}{\rho_f \cdot A \cdot V_f}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_q \cdot V_q}{\rho_f \cdot V_f}} \quad (8)$$

No entanto, pode-se simplificar a Eq.(8) acima usando a hipótese de gás perfeito para o ar e admitindo que a pressão na saída do tubo é aproximadamente constante e igual à atmosférica. Dessa forma:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \Rightarrow \rho \propto \frac{1}{T} \quad (9)$$

Substituindo a Eq.(9) na Eq.(8) obtemos a seguinte expressão simplificada que foi utilizada para o cálculo da fração fria “medida”:

$$\mu_{med} = \frac{1}{1 + \frac{T_f \cdot V_q}{T_q \cdot V_f}} \quad (10)$$

5.2.2 Primeira Lei da Termodinâmica – “Fração fria teórica”

Utilizando agora a Eq.(6) determinada anteriormente a partir da Primeira Lei da Termodinâmica, pode-se isolar a variável T_f , obtendo a Eq.(11) abaixo que representa a temperatura fria teórica, admitindo as demais variáveis medidas como verdadeiras, que foi comparada com temperatura fria medida, para o fechamento da Primeira Lei.

$$T_{f_teo} = \frac{T_e - (1 - \mu) \cdot T_q}{\mu} \quad (11)$$

Fazendo uso da mesma metodologia utilizada acima, pode-se isolar agora a variável μ da Eq.(6), obtendo-se uma expressão para a fração fria teórica, admitindo agora que as temperaturas fria, quente e de entrada medidas são verdadeiras. que foi utilizada para comparação com os valores de fração fria “medida”.

$$\mu_{teo} = \frac{T_e - T_q}{T_f - T_q} \quad (12)$$

6 RESULTADOS

Observando que o principal interesse no Tubo de Ranque-Hilsch é a temperatura fria alcançada, os gráficos que seguem apresentam os resultados obtidos tendo como variável de referência para comparação de desempenho a diferença entre a temperatura de entrada e a de saída fria, ΔT_f , em função dos parâmetros em análise.

6.1 Ensaios Iniciais

As folhas de tomada de dados dos testes iniciais estão apresentadas no Apêndice A e os resultados podem ser vistos nos gráficos a seguir.

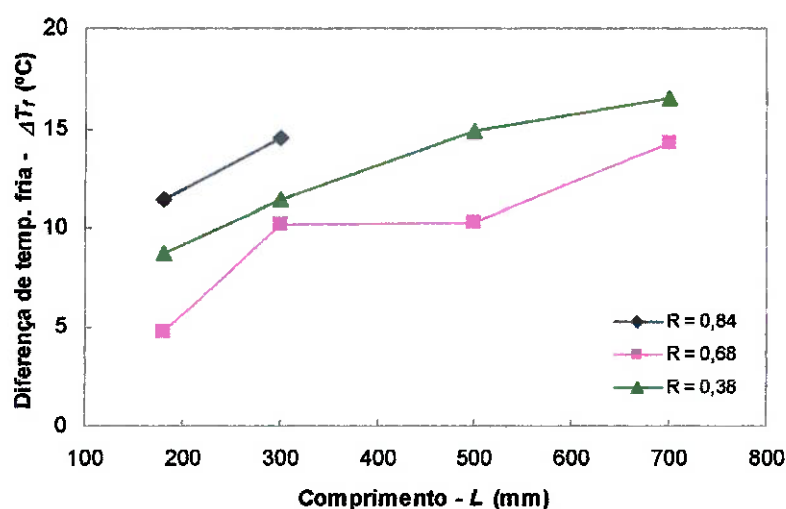


Fig. 15 – EI - Influência do comprimento do tubo

A partir do gráfico apresentado na Fig. 15 acima, ressaltando que em todos os testes, a temperatura de entrada oscilou apenas de 21°C a 23°C, pode-se observar que maiores são as diferenças de temperatura entre a entrada e a saída de ar frio quanto maior o comprimento do tubo, independentemente das áreas quente e fria. Dessa forma, pode-se eliminar o tubo de 180 mm, focando de maneira mais apurada a região entre os comprimentos de 300 e 700 mm, refinando o intervalo e incluindo os comprimentos de 400 e 600 mm.

O gráfico da Fig. 16 visa mostrar a influência da área fria. Eliminou-se então a bolacha fria de menor área fria, $12,6 \text{ mm}^2$, em decorrência de seu baixo desempenho quando comparado com a bolacha de área fria imediatamente superior, $19,6 \text{ mm}^2$, em ambos os comprimentos, 300 e 700 mm.

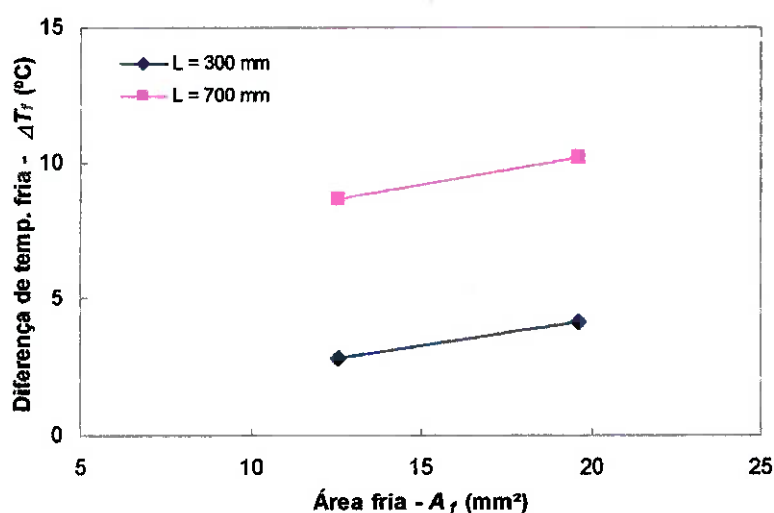


Fig. 16 – EI - Influência da área fria com $A_q = 25,1 \text{ mm}^2$

Também foi eliminada a bolacha quente com menor área, visto seu comportamento semelhante ao caso acima, conforme gráfico da Fig. 17.

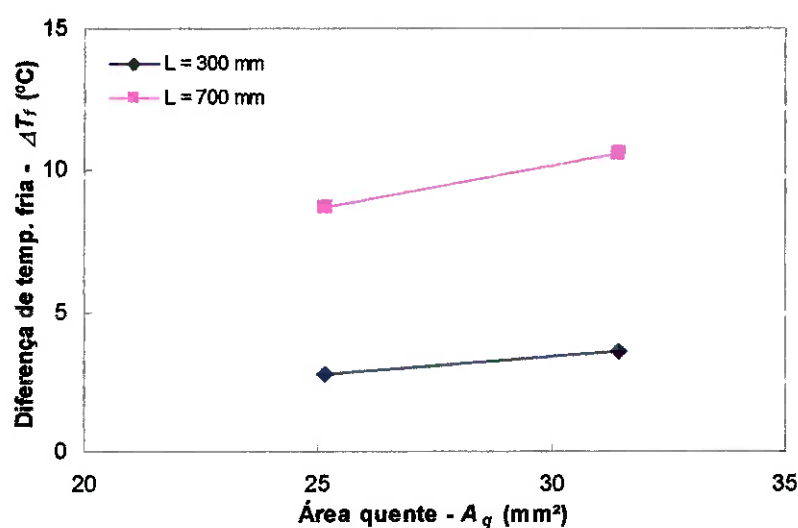


Fig. 17 – EI - Influência da área quente com $A_f = 12,6 \text{ mm}^2$

Já o gráfico apresentado na Fig. 18 mostra apenas que a diferença de temperatura não depende apenas da razão entre as áreas fria e quente, mas também do valor absoluto destas, visto que a diferença de temperatura não se manteve constante quando se variavam as áreas fria e quente enquanto se mantinha constante a razão $R = A_f / A_q$, para os dois casos ensaiados, 0,50 e 0,91.

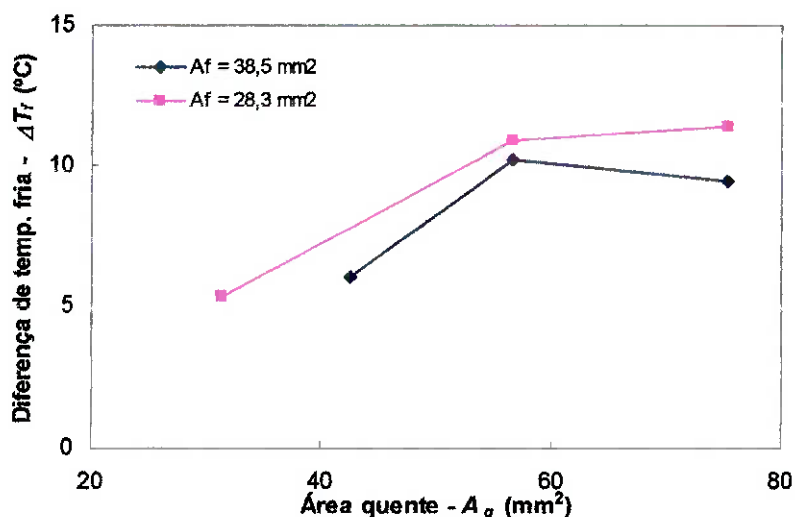


Fig. 18 – EI - Influência da razão $R = A_f/A_q$ para $L = 300$ mm

6.2 Ensaios Gerais

6.2.1 Experimentos Originais

As folhas de tomada de dados dos experimentos gerais originais estão apresentadas no Apêndice B. Convém observar que em todos os casos, a temperatura de entrada se manteve sempre entre 19°C e 22°C, com uma pressão de alimentação de 3 bar.

Agrupando então os dados de forma estratégica a fim de permitir um foco na variável em análise, foram levantados diversos gráficos que serão apresentados a seguir.

Pelas Fig. 19 a Fig. 22 abaixo, pode-se concluir que, para qualquer combinação, independentemente do valor da área fria ou quente ensaiada, os resultados são melhores quanto maior o comprimento do tubo, salvo algumas descontinuidades obtidas.

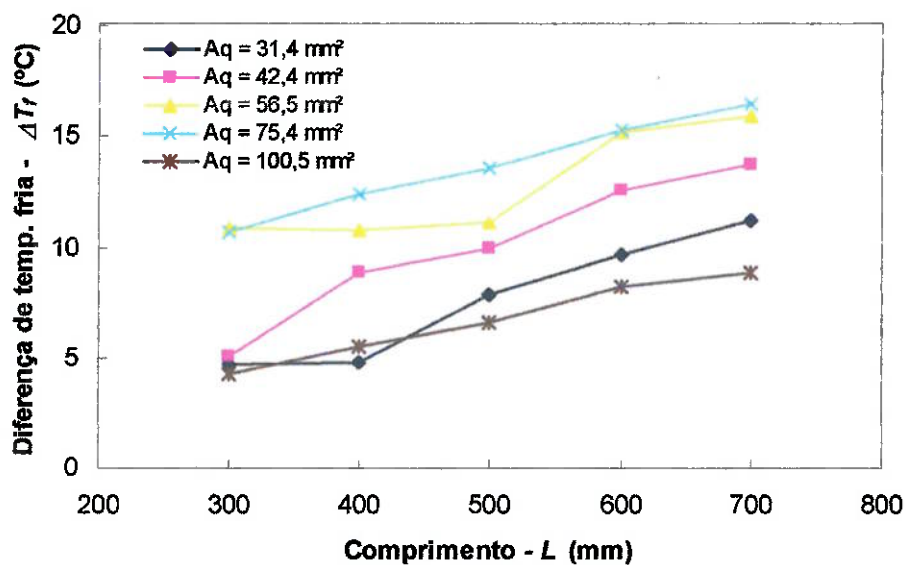


Fig. 19 – EGA - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 19,6 \text{ mm}^2$

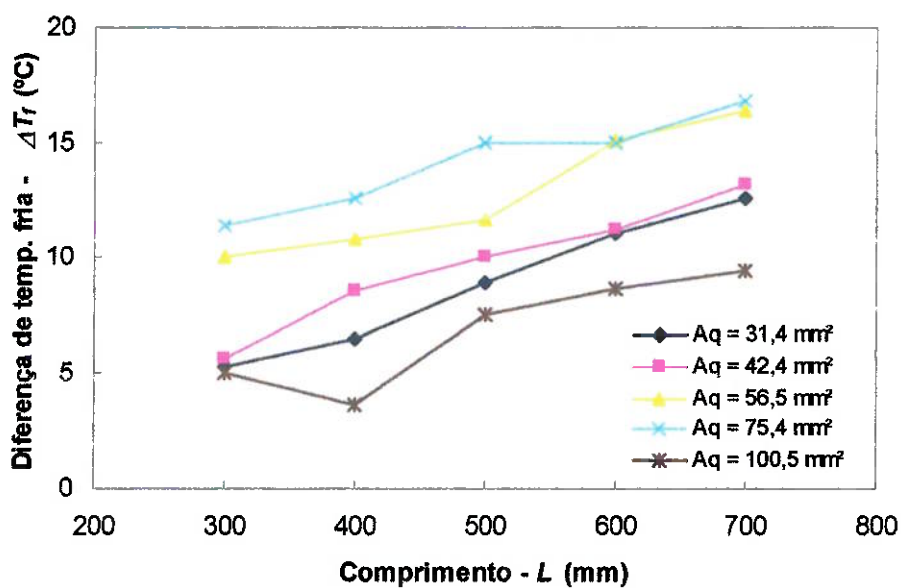


Fig. 20 – EGA - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 28,3 \text{ mm}^2$

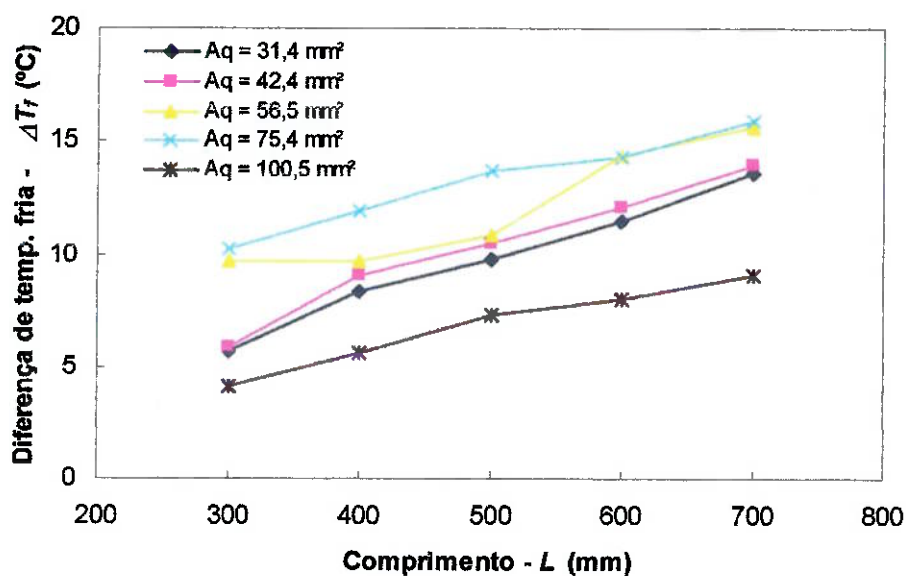


Fig. 21 – EGA - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 38,5 \text{ mm}^2$

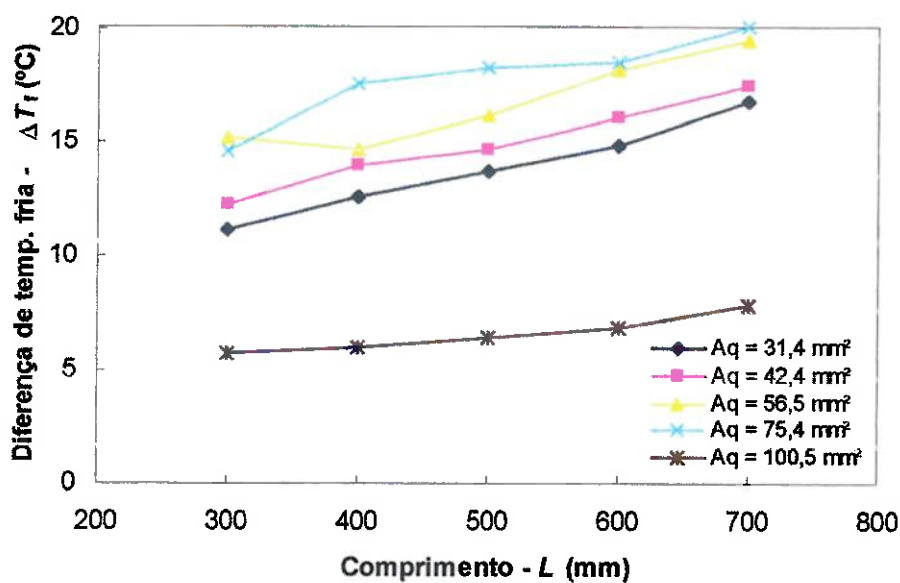


Fig. 22 – EGA - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 63,6 \text{ mm}^2$

Um aspecto interessante e muito importante nos gráficos acima é o bom desempenho do tubo para os casos de área quente igual a $75,4 \text{ mm}^2$. Uma análise pode ser melhor realizada rearranjando-se os pontos para a construção dos gráficos mostrados nas Fig. 23 a Fig. 27, tendo-se a diferença de temperatura fria como função da área quente. Todas as curvas têm um comportamento semelhante, de forma que as diferenças de temperatura tendem a aumentar com o aumento da área

quente, passam por um máximo para então decair, mantidas as demais variáveis constantes.

Tal característica se mostrou forte em todas as combinações de área fria ($19,6 \text{ mm}^2$, $28,3 \text{ mm}^2$, $38,5 \text{ mm}^2$ e $63,6 \text{ mm}^2$) e comprimento (300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm e 700 mm), com o máximo sempre em torno de uma mesma região, de 55 a 80 mm^2 , limitando uma faixa de melhores resultados independentemente das demais variáveis.

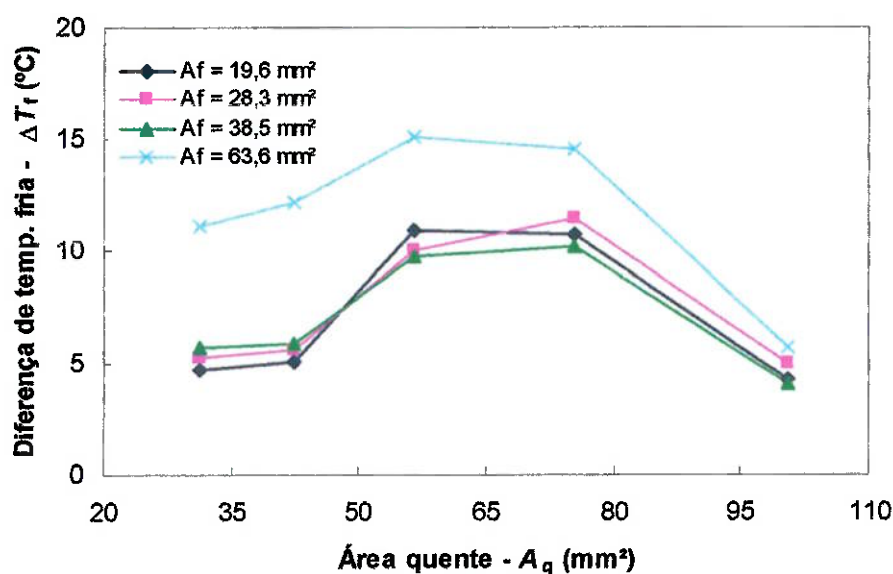


Fig. 23 – EGa - Influência da área quente para $L = 300 \text{ mm}$

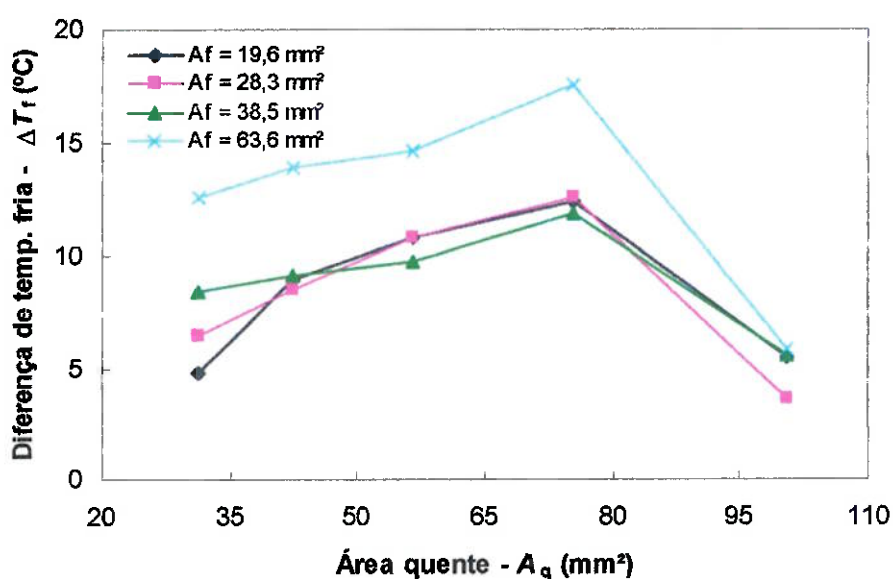


Fig. 24 – EGa - Influência da área quente para $L = 400 \text{ mm}$

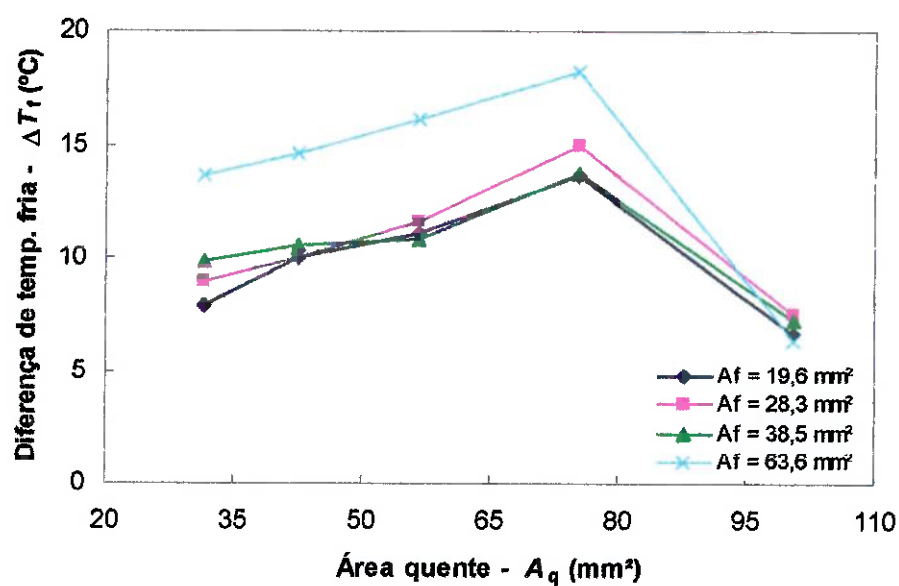


Fig. 25 – EGA - Influência da área quente para $L = 500 \text{ mm}$

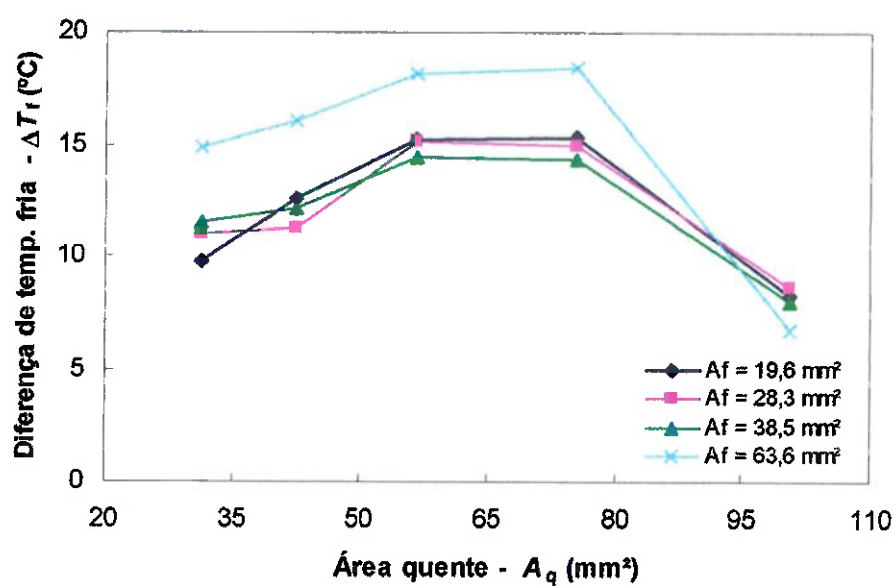


Fig. 26 – EGA - Influência da área quente para $L = 600 \text{ mm}$

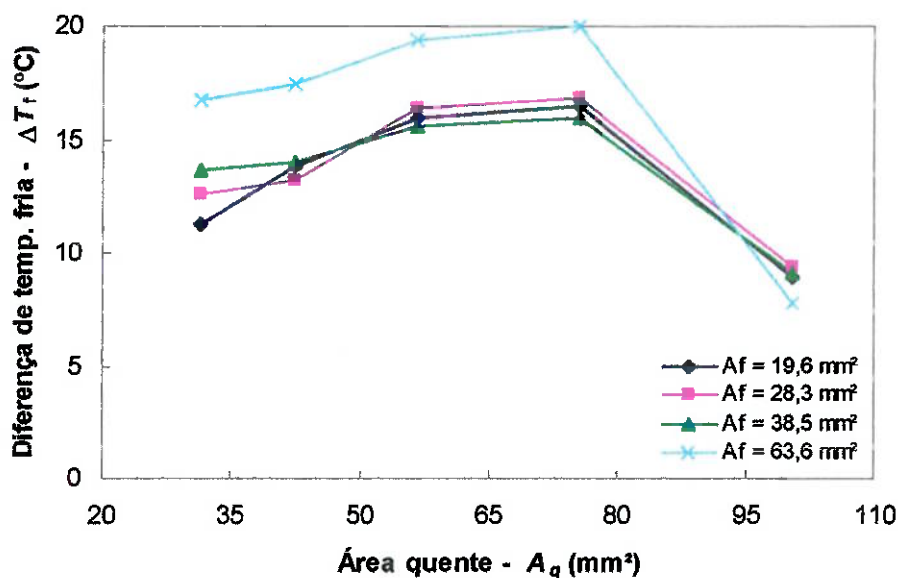


Fig. 27 – EGa - Influência da área quente para $L = 700$ mm

Um outro fator que se mostra importante agora é o bom desempenho para o caso da área fria igual a $63,6 \text{ mm}^2$, como pode ser observado pelas posições das curvas correspondentes acima das demais curvas nos gráficos das Fig. 23 a Fig. 27 já apresentadas. Aprofundando na análise desta variável, foram construídos os gráficos das Fig. 28 a Fig. 32 a seguir.

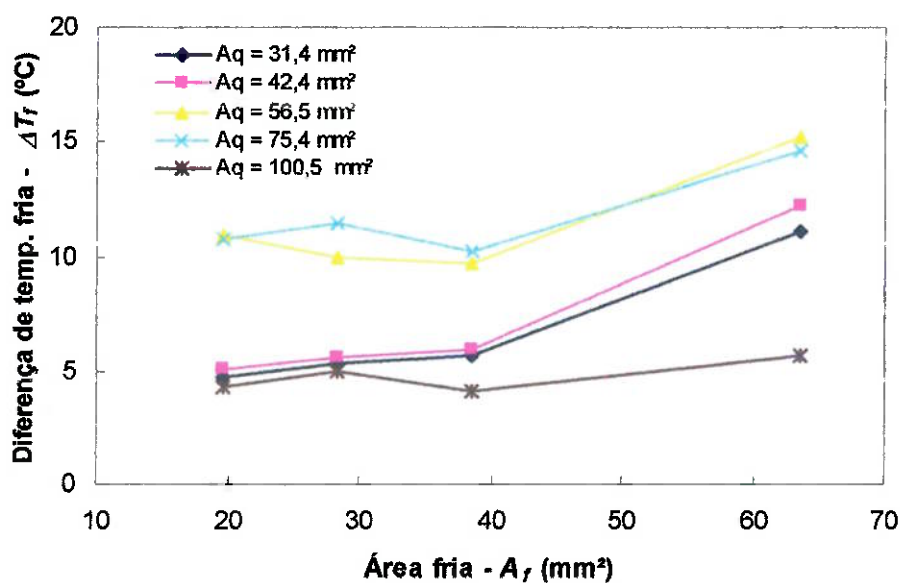
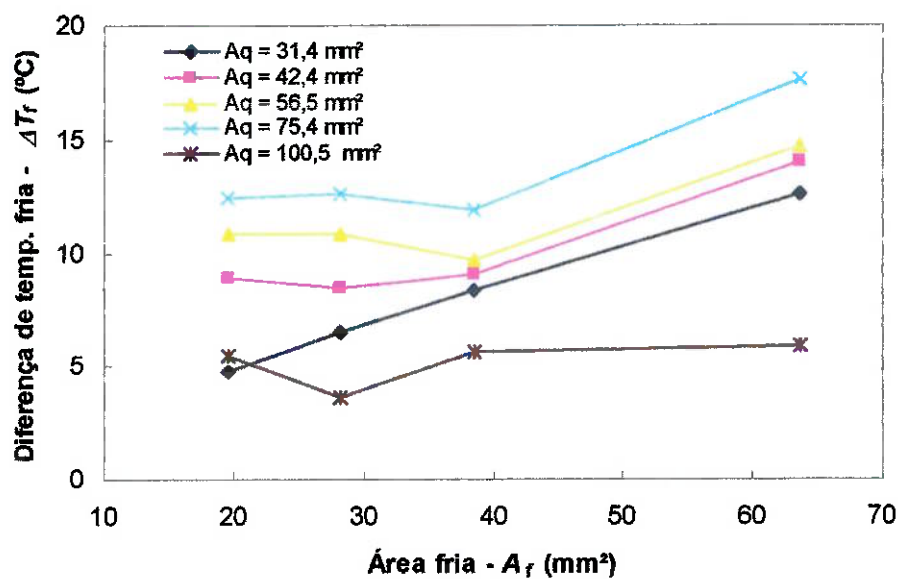
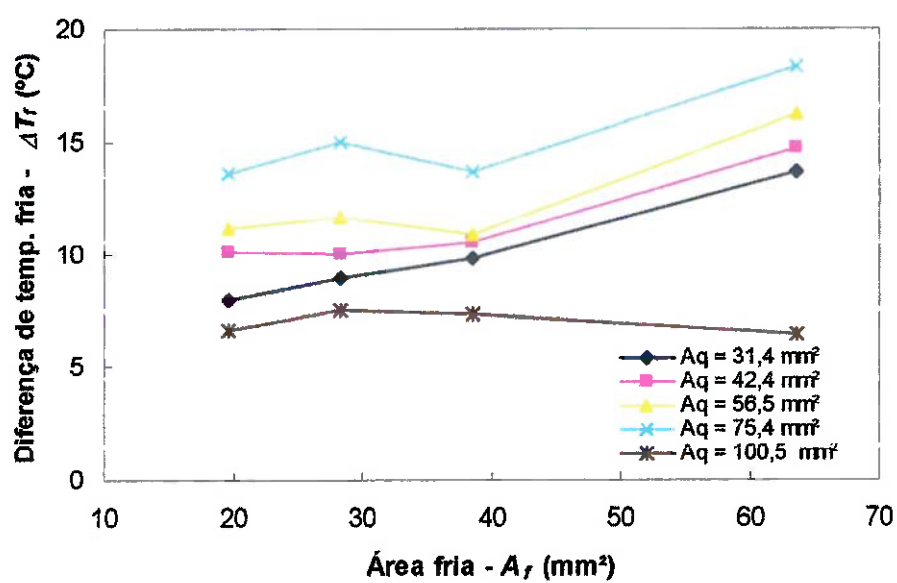


Fig. 28 – EGa - Influência da área fria para $L = 300$ mm

Fig. 29 - EGA - Influência da área fria para $L = 400 \text{ mm}$ Fig. 30 - EGA - Influência da área fria para $L = 500 \text{ mm}$

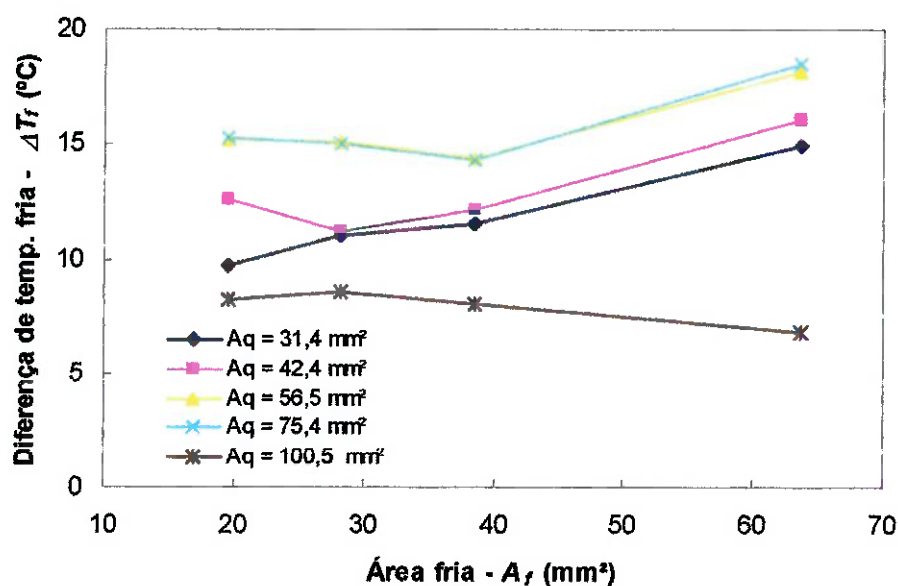


Fig. 31 - EGA - Influência da área fria para $L = 600$ mm

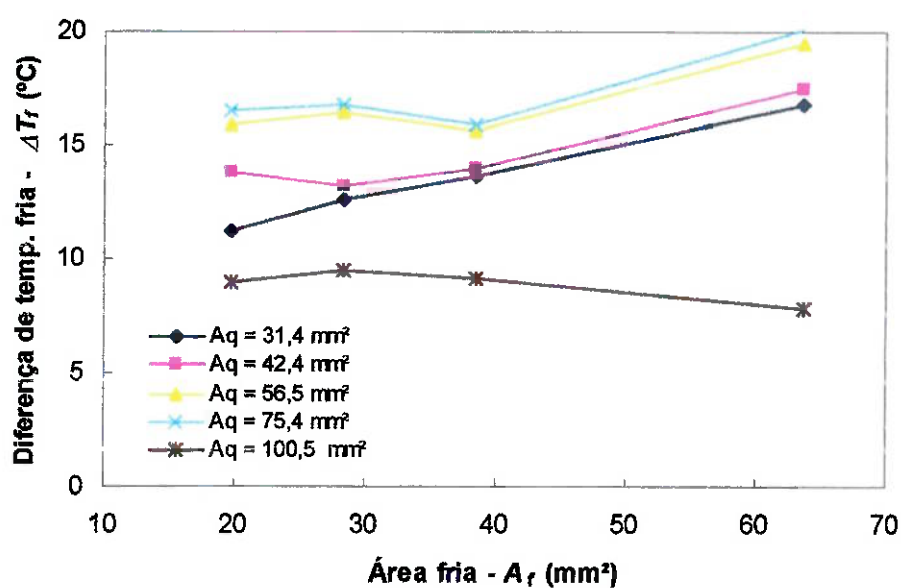


Fig. 32 - EGA - Influência da área fria para $L = 700$ mm

Os resultados obtidos na análise da área fria não foram tão conclusivos quanto no estudo da área quente, mas pode-se observar que, apesar de um existir um comportamento irregular na região de menores áreas frias, como regra geral, há uma nítida melhora dos resultados para o máximo valor de área fria. Com isso, não foi possível achar um máximo nas curvas e limitar uma região de melhor desempenho.

Analisando agora a pressão interna do Tubo de Vórtices, chegou-se a conclusão que esta teve pouco efeito nos experimentos, dada a baixa variação de pressão entre os diversos experimentos, com valores oscilando de 0,6 a 1,1 kgf/cm². Entretanto, sabe-se que este é um parâmetro muito importante e cuja influência não foi analisada aqui.

Utilizando agora as Eqs.(10) e (12) apresentadas na seção 5.2, montou-se o gráfico da Fig. 33 com o objetivo de comparar os resultados experimentais com os teóricos.

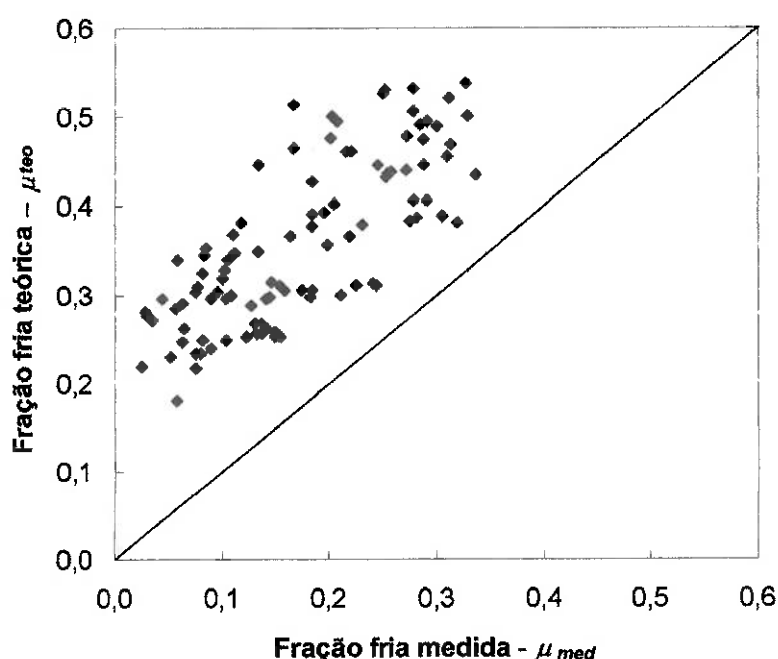


Fig. 33 – EGa - Primeira Lei da Termodinâmica – Comparação μ_{teo} x μ_{med}

Nitidamente, os pontos que deveriam estar posicionados em cima da reta $y(x) = x$, apresentam um deslocamento vertical para a região superior da diagonal, com uma grande dispersão, evidenciando a existência de erros sistemáticos nas medições.

Com a inconsistência obtida acima, optou-se por uma adaptação da bancada experimental para uma retomada dos dados na tentativa de melhorar a qualidade destes. Propôs-se então a adição de uma seção de retificação do escoamento na saída do tubo com o objetivo de minimizar o efeito de vorticidade do ar, o qual pode ter forte influência nas medições de velocidade, propiciando os erros sistemáticos observados na Fig. 33.

6.2.2 Novos Experimentos

Conforme já mencionado anteriormente, com o conserto do segundo estágio do compressor, foi possível a realização dos novos ensaios com uma pressão injeção de 4 bar. No entanto, problemas técnicos com o compressor impediram a finalização de todos os testes, de forma que serão apresentados nesta seção apenas os resultados parciais obtidos, num total de 50 experimentos, cujas folhas de dados encontram-se no Apêndice C. Dessa forma, pelo acima exposto, ressalta-se que não foi possível a realização dos ensaios com as áreas frias de $38,5 \text{ mm}^2$ e $63,6 \text{ mm}^2$.

As Fig. 34 e Fig. 35 mostram a diferença de temperatura para as áreas frias de $19,6 \text{ mm}^2$ e $28,3 \text{ mm}^2$, respectivamente, em função do comprimento do tubo e para cada uma das áreas quentes. Como pode ser observado, a tendência das curvas de ambos os gráficos é a mesma que a observada nos gráficos das Fig. 19 e Fig. 20 correspondentes dos ensaios originais, levando à conclusão de que maiores comprimentos de tubo resultam em maiores diferenças de temperatura qualquer que seja a combinação de áreas quente e fria ensaiada.

Um fato interessante a ser ressaltado é a pequena variação das temperaturas medidas frente ao aumento da pressão de entrada, que pode ser explicado pelo também aumento da pressão de saída do Tubo de Vórtices ocasionado pela perda de carga imposta pela seção de retificação inserida no escoamento.

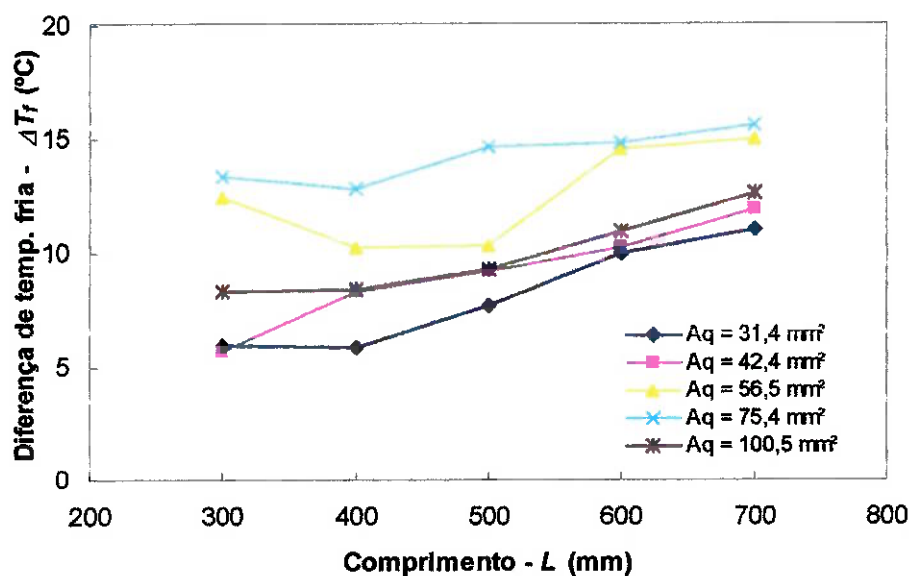


Fig. 34 – EGb - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 19,6 \text{ mm}^2$

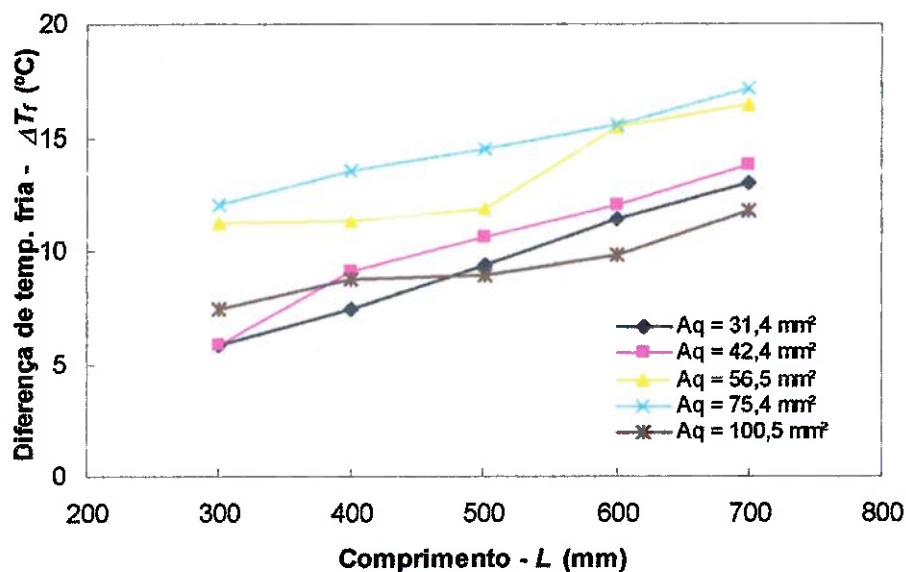


Fig. 35 – EGb - Influência do comprimento do tubo para $A_f = 28,3 \text{ mm}^2$

Rearranjando-se agora os pontos de forma a colocar a diferença de temperatura como função da área quente, levantou-se os gráficos das Fig. 36 a Fig. 40 a seguir. Novamente, assim como nos experimentos correspondentes aos ensaios originais, é possível notar uma região de máximo desempenho para a variável área quente, como regra geral, na faixa de 55 mm^2 a 80 mm^2 .

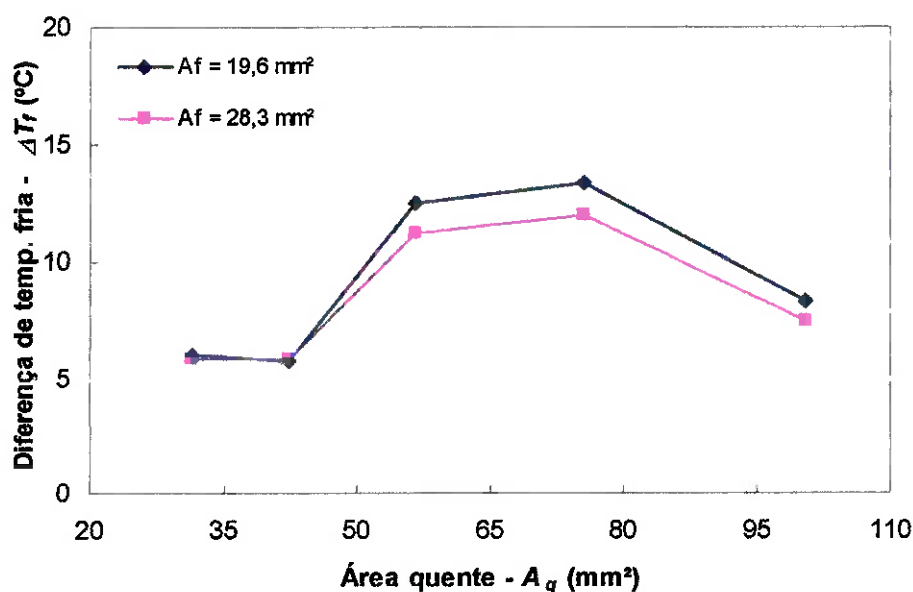


Fig. 36 – EGb - Influência da área quente para $L = 300 \text{ mm}$

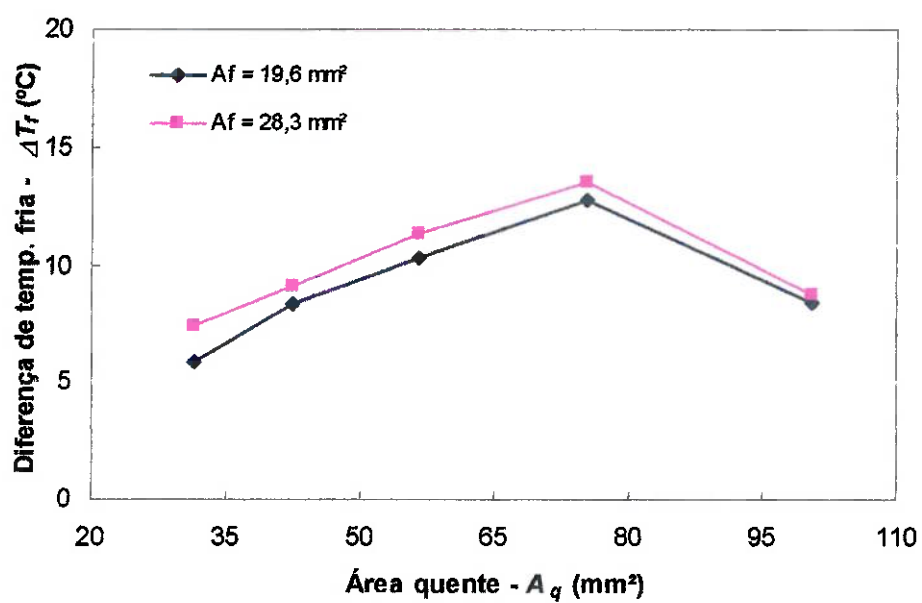


Fig. 37 – EGb - Influência da área quente para $L = 400$ mm

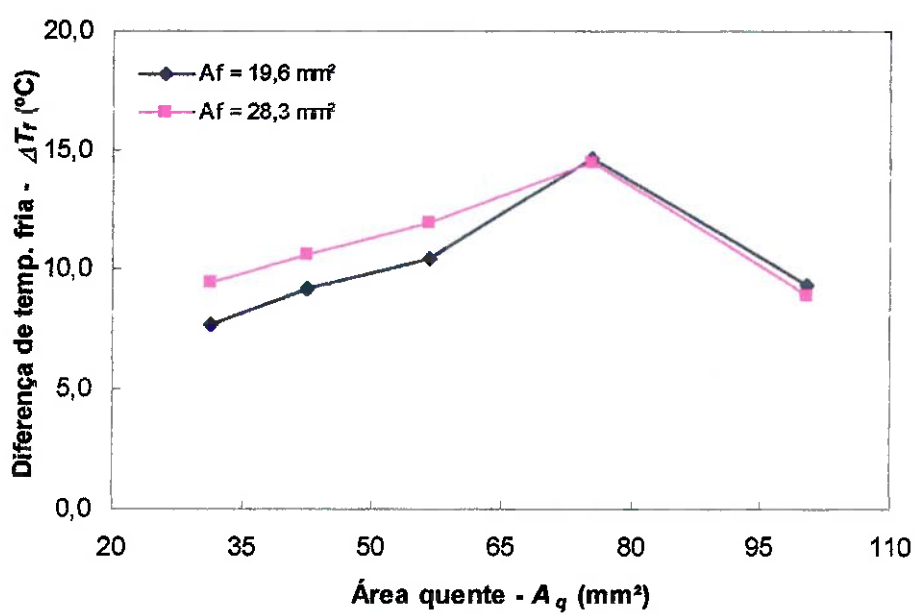


Fig. 38 – EGb - Influência da área quente para $L = 500$ mm

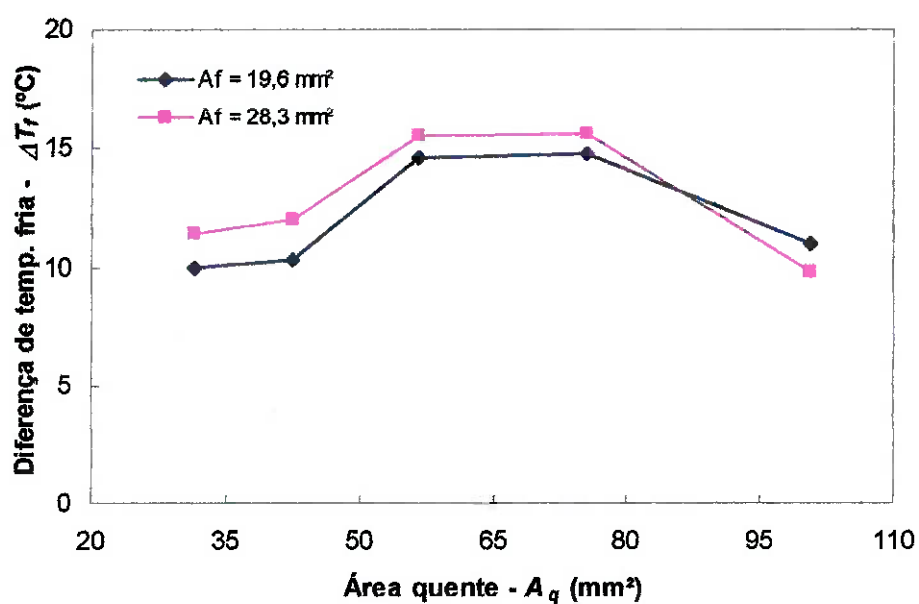


Fig. 39 – EGb - Influência da área quente para $L = 600$ mm

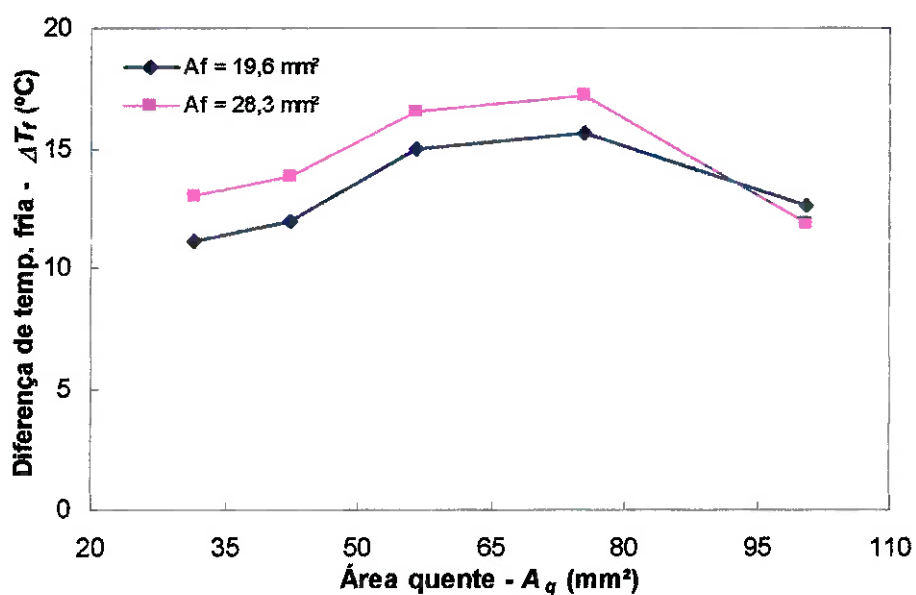


Fig. 40 – EGb - Influência da área quente para $L = 700$ mm

Voltando-se para a variável área fria, devido ao fato de terem sido ensaiados apenas dois valores distintos, $19,6 \text{ mm}^2$ e $28,3 \text{ mm}^2$, torna-se inviável uma análise de comportamento ou tendências do Tubo de Vórtices com relação a tal parâmetro.

Apesar dos resultados semelhantes do desempenho do Tubo, pela Fig. 41 abaixo, pode-se notar que os erros encontrados anteriormente para os ensaios

originais foram reduzidos de forma significativa, estando os pontos bem mais próximos da situação ideal, sobre a reta a 45°, confirmando a hipótese de forte influência do efeito de vorticidade do ar nas medições de velocidade.

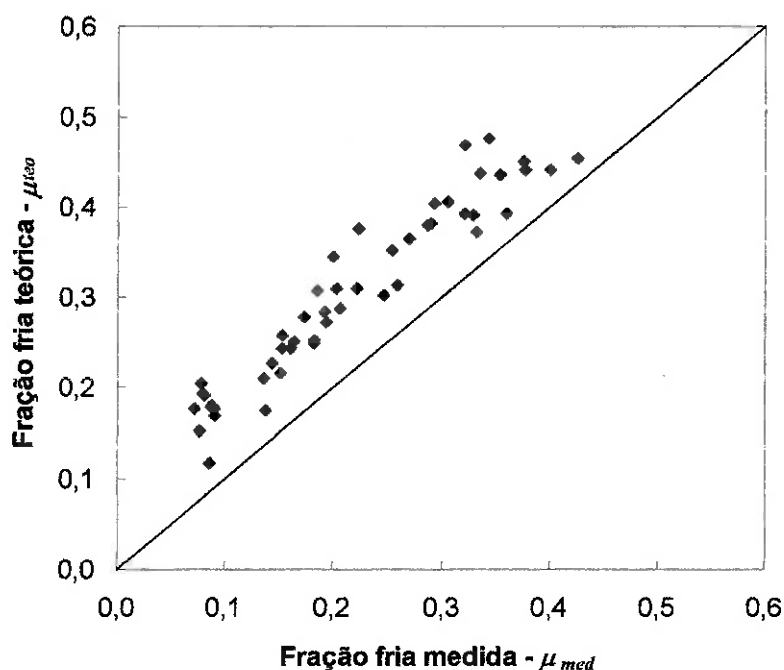


Fig. 41 – EGb - Primeira Lei da Termodinâmica – Comparação μ_{teo} x μ_{med}

Finalmente, pela Fig. 42, pode-se concluir que há um comportamento característico nos erros ainda existentes. Mantendo-se a área fria, o comprimento do tubo e as pressões de entrada e saída constantes, o erro no fechamento da Primeira Lei aumenta significativamente com o aumento da área quente e conseqüente diminuição da fração fria. Fato que se repete, salvo algumas exceções, para a grande maioria dentre as diversas combinações entre área fria e comprimento do tubo.

Logo, admitindo-se que o erro nas medidas realizadas pelos termopares seja praticamente constante na faixa de variação das temperaturas medidas, foca-se a atenção para uma maior dificuldade de medição de velocidades, induzindo à conclusão de que os erros da medição do equipamento utilizado aumentaram com a queda da velocidade na saída fria a ser medida e proximidade do limite inferior da faixa de medição do anemômetro utilizado.

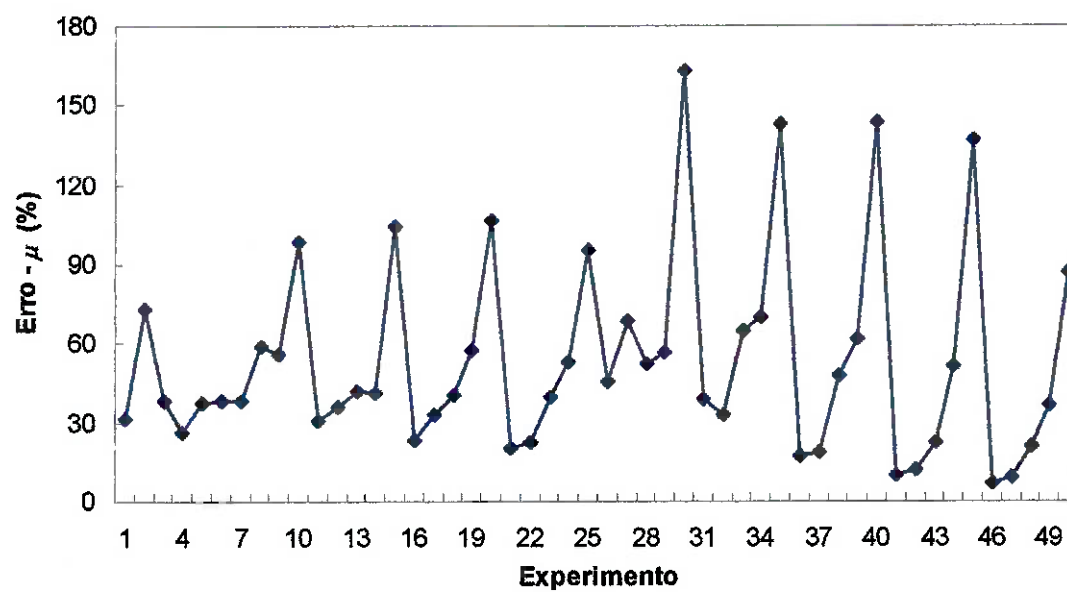


Fig. 42 – Erro percentual entre os valores de “fração fria teórica” e “medida”

7 CONCLUSÕES

Com resultados bastante satisfatórios, pode-se dizer que este estudo atingiu seu objetivo, onde foi possível obter alguns dados experimentais e ser realizada toda uma análise.

A partir dos testes iniciais, foi possível observar que o Tubo de Vórtices tem seu desempenho debilitado para comprimentos de tubo muito pequenos, mesmo para diversas combinações de áreas fria e quente. Tal fato se repete para os casos de áreas fria e quente também pequenas, de forma que foi possível eliminar o tubo de 180 mm e as bolachas fria de 12,6 mm² e quente de 25,1 mm² para realização dos testes gerais, permitindo focar o estudo na região de melhores resultados.

Já nos ensaios gerais, conclusões importantes se verificaram. Em relação à variável comprimento do tubo quente, os resultados foram melhores quanto maior o comprimento estudado, independentemente das demais variáveis, sendo 700 mm o melhor comprimento para o Tubo de Vórtices, atingindo diferenças de temperatura de até 20°C.

O mesmo se observou para a variável área fria, onde maiores diferenças entre a temperatura de entrada e a saída fria foram obtidas para maiores áreas frias, com o máximo em 63,6 mm².

No caso da área quente, obteve-se um pico nas curvas, com um crescimento e posterior decréscimo. Com tal fato se repetindo em todas as combinações estudadas, sempre em torno de uma mesma região, pode-se afirmar que a melhor faixa para se trabalhar com o Tubo de Vórtices nas condições apresentadas se dá para áreas quentes na faixa de 55 a 80 mm².

Observa-se então que melhores resultados poderiam ser obtidos estudando-se uma faixa de maiores valores tanto para comprimentos de tubo quente como para valores de área de saída fria, em uma possível continuação do trabalho, podendo-se chegar, assim como para o caso da área quente, numa faixa ótima para todos os aspectos construtivos do Tubo de Vórtices.

Convém ainda ressaltar que as conclusões acima são válidas para ambos os casos estudados, com pressões de alimentação de 3 e 4 bar, exceto para a variável

área fria na caso da maior pressão de entrada, devido à existência de poucos valores estudados e inviabilidade de se realizar qualquer dedução.

Para verificação dos dados, foram então comparados os valores da fração fria medida com a teoricamente calculada a partir do balanço da Primeira Lei da Termodinâmica. Os resultados originais não foram muito satisfatórios, sendo possível notar um forte erro sistemático em todos os pontos. Com isso, mostrou-se necessária a realização de novos experimentos com algumas melhoras na bancada experimental.

Então, com os novos experimentos, ainda que incompletos devido à problemas com o compressor utilizado, concluiu-se que o efeito de vorticidade do ar que é liberado nas saídas do Tubo de Vórtices influenciou significativamente as medições de velocidade e, conseqüentemente, os erros obtidos anteriormente. E, ainda neste contexto, foi possível observar que o instrumento utilizado para tal se mostrou bastante inadequado para este caso, dilatando os erros de medição conforme se reduzia a velocidade de saída do ar frio e se aproximava do limite inferior da faixa de medição do anemômetro.

Finalmente, como último comentário, convém salientar que o presente trabalho também gerou divulgação em encontros técnicos com a publicação do artigo intitulado “Experimental Study of a Vortex Tube”, e do resumo “Estudo Experimental de um Tubo de Vórtices”, os quais seguem nos Apêndices D e E, respectivamente.

8 REFERÊNCIAS

AHIBORN, B. et al. **Limits of temperature separation in a vortex tube.** Germany: Institut für Theoretische Physik, Universität Düsseldorf, 1993.

BUCHLER, J. R. **Coherent transport of angular momentum: The Ranque-Hilsch Tube as a paradigm.** United States of America: University of Florida, 1999.

RIU, Kap-Jong. et al. **Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube.** JSME International Journal, 2004, Vol. 47, pp. 29-36.

LEWIS, J.; Bejan, A. **Vortex tube optimization theory.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, pp. 931-943.

PIRALISHVILI, Sh. A.; POLAYEV, V. M. **Flow and thermodynamics characteristics of energy separation in a double-circuit vortex tube – An experimental investigation.** Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier Science, 1996.

POLISEL, R. A.; SIMÕES-MOREIRA, J. R. **Experimental Study of a Vortex Tube.** COBEM 2005, Ouro Preto, 2005.

POLISEL, R. A. **Estudo Experimental de um Tubo de Vórtices.** SIICUSP 2005, São Carlos, 2005.

STASCHOWER, M.; ROTTER, B. **Estudo de um Tubo de Ranque-Hilsch.** Trabalho de Formatura, EPUSP, São Paulo, 2003.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, G. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** Edgard Blucher, 5ª edição, São Paulo, 1998.

ATRX - THE AIR RESEARCH TECHNOLOGY COMPANY. Funcionamento do Tubo de Vórtices. Disponível em: <<http://www.artxLtd.com/vortex/principle.shtml>>. Acesso em: 15 de abr.

ATRX - THE AIR RESEARCH TECHNOLOGY COMPANY. Aplicações do Tubo de Vórtices. Disponível em: <<http://www.artxLtd.com/vortex/apps.shtml>>. Acesso em: 15 de abr.

EXAIR. Funcionamento do Tubo de Vórtices. Disponível em: <http://www.exair.com/vortextube/vt_frmmain.htm>. Acesso em: 18 de mar.

EXAIR. Teoria sobre o fenômeno no Tubo de Vórtices. Disponível em: <http://www.exair.com/vortextube/vt_theory.htm>. Acesso em: 18 de mar.

NEWMAN TOOLS Inc. O fenômeno no Tubo de Vórtices. Disponível em: <<http://www.newmantools.com/vortex.htm>>. Acesso em: 18 de mar.

RANQUE-HILSCH VORTEX TUBE. Funcionamento do Tubo de Vórtices. Disponível em: <<http://www.southstreet.freemove.co.uk/rhvtmatl/rhvtinfo.htm>>. Acesso em: 04 de maio.

APÊNDICE A

Folha de Dados – Testes Iniciais

Apêndice A – Folha de Dados – Testes Iniciais

Experimento: 1 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 180 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,1 °C Entrada (Te): 22,2 °C Saída Quente (Tq): 25,2 °C Saída Fria (Tf): 17,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,09 m/s Saída Fria (Vf): 0,30 m/s	Experimento: 2 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,2 °C Entrada (Te): 22,8 °C Saída Quente (Tq): 28,3 °C Saída Fria (Tf): 12,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,26 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 3 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,7 °C Entrada (Te): 22,5 °C Saída Quente (Tq): 28,6 °C Saída Fria (Tf): 12,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,74 m/s Saída Fria (Vf): 0,43 m/s
Experimento: 4 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,7 °C Entrada (Te): 22,3 °C Saída Quente (Tq): 31,3 °C Saída Fria (Tf): 8,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,34 m/s Saída Fria (Vf): 1,02 m/s	Experimento: 5 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 180 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 25,0 °C Saída Fria (Tf): 12,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,49 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 6 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 25,3 °C Saída Fria (Tf): 10,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,71 m/s Saída Fria (Vf): 0,52 m/s
Experimento: 7 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 6,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,26 m/s Saída Fria (Vf): 0,98 m/s	Experimento: 8 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 27,2 °C Saída Fria (Tf): 4,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,39 m/s Saída Fria (Vf): 0,80 m/s	Experimento: 9 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25 °C Entrada (Te): 22,4 °C Saída Quente (Tq): 27,3 °C Saída Fria (Tf): 17,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 0,76 m/s

Apêndice A – Folha de Dados – Testes Iniciais

Experimento: 10 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,3 °C Entrada (Te): 22,3 °C Saída Quente (Tq): 27,3 °C Saída Fria (Tf): 16,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,09 m/s Saída Fria (Vf): 0,30 m/s	Experimento: 11 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27,2 °C Saída Fria (Tf): 7,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,69 m/s Saída Fria (Vf): 0,18 m/s	Experimento: 12 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,7 °C Entrada (Te): 22,8 °C Saída Quente (Tq): 25,8 °C Saída Fria (Tf): 20,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,63 m/s Saída Fria (Vf): 1,61 m/s
Experimento: 13 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,0 °C Entrada (Te): 22,3 °C Saída Quente (Tq): 27,5 °C Saída Fria (Tf): 11,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,61 m/s Saída Fria (Vf): 1,09 m/s	Experimento: 14 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 25,2 °C Entrada (Te): 22,2 °C Saída Quente (Tq): 26,7 °C Saída Fria (Tf): 12,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,53 m/s	Experimento: 15 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 17,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,97 m/s Saída Fria (Vf): 1,89 m/s
Experimento: 16 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 30,7 °C Saída Fria (Tf): 11,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,55 m/s Saída Fria (Vf): 2,18 m/s	Experimento: 17 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 27,1 °C Saída Fria (Tf): 13,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,34 m/s Saída Fria (Vf): 1,85 m/s	Experimento: 18 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 24,7 °C Saída Fria (Tf): 18,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,97 m/s Saída Fria (Vf): 1,33 m/s

Apêndice A – Folha de Dados – Testes Iniciais

Experimento: 19	Experimento: 20
Configuração	Configuração
Área Quente: 75,398 mm ²	Área Quente: 100,53 mm ²
Área Fria: 19,635 mm ²	Área Fria: 19,635 mm ²
Comprimento: 700 mm	Comprimento: 180 mm
Pressões	Pressões
Ambiente (Pamb): 696 mmHg	Ambiente (Pamb): 696 mmHg
Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ²	Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ²
Temperaturas	Temperaturas
Ambiente (Tamb): 24,7 °C	Ambiente (Tamb): 24,3 °C
Entrada (Te): 21,8 °C	Entrada (Te): 21,4 °C
Saída Quente (Tq): 27,5 °C	Saída Quente (Tq): 26,3 °C
Saída Fria (Tf): 11,2 °C	Saída Fria (Tf): 10,0 °C
Velocidades	Velocidades
Saída Quente (Vq): 4,61 m/s	Saída Quente (Vq): 2,72 m/s
Saída Fria (Vf): 1,76 m/s	Saída Fria (Vf): 0,16 m/s

APÊNDICE B

Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 1 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 1,1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,1 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 25,8 °C Saída Fria (Tf): 16,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,40 m/s Saída Fria (Vf): 1,11 m/s	Experimento: 2 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,1 °C Entrada (Te): 21,1 °C Saída Quente (Tq): 24,4 °C Saída Fria (Tf): 16 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,61 m/s Saída Fria (Vf): 1,08 m/s	Experimento: 3 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,1 °C Entrada (Te): 21,00 °C Saída Quente (Tq): 25,8 °C Saída Fria (Tf): 10,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,84 m/s Saída Fria (Vf): 1,03 m/s
Experimento: 4 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25,1 °C Saída Fria (Tf): 10,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,74 m/s Saída Fria (Vf): 0,90 m/s	Experimento: 5 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24 °C Entrada (Te): 21,1 °C Saída Quente (Tq): 23,2 °C Saída Fria (Tf): 16,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,17 m/s Saída Fria (Vf): 0,69 m/s	Experimento: 6 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 697 mmHg Interna (Pi): 1,10 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,8 °C Entrada (Te): 21,10 °C Saída Quente (Tq): 26,3 °C Saída Fria (Tf): 16,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,61 m/s Saída Fria (Vf): 2,01 m/s
Experimento: 7 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 697 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27,2 °C Saída Fria (Tf): 12,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,83 m/s Saída Fria (Vf): 1,80 m/s	Experimento: 8 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 697 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 26,1 °C Saída Fria (Tf): 10,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,09 m/s Saída Fria (Vf): 1,07 m/s	Experimento: 9 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,50 °C Saída Quente (Tq): 25,7 °C Saída Fria (Tf): 9,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,40 m/s Saída Fria (Vf): 0,89 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 10 Configuração Área Quente: 100,53 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 23,7 °C Saída Fria (Tf): 15,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,17 m/s Saída Fria (Vf): 0,64 m/s	Experimento: 11 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 1,1 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 27,7 °C Saída Fria (Tf): 13,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,26 m/s Saída Fria (Vf): 1,52 m/s	Experimento: 12 Configuração Área Quente: 42,412 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,90 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,60 °C Saída Quente (Tq): 27,7 °C Saída Fria (Tf): 11,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,76 m/s Saída Fria (Vf): 1,35 m/s
Experimento: 13 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 26,2 °C Saída Fria (Tf): 10,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,13 m/s Saída Fria (Vf): 1,02 m/s	Experimento: 14 Configuração Área Quente: 75,398 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,1 °C Entrada (Te): 21,1 °C Saída Quente (Tq): 26,1 °C Saída Fria (Tf): 7,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,26 m/s Saída Fria (Vf): 0,78 m/s	Experimento: 15 Configuração Área Quente: 100,53 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,10 °C Saída Quente (Tq): 23,3 °C Saída Fria (Tf): 14,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,07 m/s Saída Fria (Vf): 0,52 m/s
Experimento: 16 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,9 °C Entrada (Te): 21,9 °C Saída Quente (Tq): 29,3 °C Saída Fria (Tf): 12,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,24 m/s Saída Fria (Vf): 1,35 m/s	Experimento: 17 Configuração Área Quente: 42,412 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,9 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 29,6 °C Saída Fria (Tf): 9,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,22 m/s Saída Fria (Vf): 1,49 m/s	Experimento: 18 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 19,635 mm² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm² Entrada (Pe): 3 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,9 °C Entrada (Te): 21,80 °C Saída Quente (Tq): 28,3 °C Saída Fria (Tf): 6,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,07 m/s Saída Fria (Vf): 1,26 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 19 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,7 °C Saída Quente (Tq): 27 °C Saída Fria (Tf): 6,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,63 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 20 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,9 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 24,3 °C Saída Fria (Tf): 13,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,28 m/s Saída Fria (Vf): 0,49 m/s	Experimento: 21 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 1,00 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,20 °C Saída Quente (Tq): 29,8 °C Saída Fria (Tf): 10 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,15 m/s Saída Fria (Vf): 1,97 m/s
Experimento: 22 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 29,7 °C Saída Fria (Tf): 7,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,28 m/s Saída Fria (Vf): 1,85 m/s	Experimento: 23 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 28,4 °C Saída Fria (Tf): 5,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,86 m/s Saída Fria (Vf): 1,30 m/s	Experimento: 24 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,10 °C Saída Quente (Tq): 26,7 °C Saída Fria (Tf): 4,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,30 m/s Saída Fria (Vf): 0,89 m/s
Experimento: 25 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 698 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 24 °C Saída Fria (Tf): 12,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,11 m/s Saída Fria (Vf): 0,58 m/s	Experimento: 26 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 1,1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 26,2 °C Saída Fria (Tf): 16,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,40 m/s Saída Fria (Vf): 1,07 m/s	Experimento: 27 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 1,00 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,40 °C Saída Quente (Tq): 24,8 °C Saída Fria (Tf): 15,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,51 m/s Saída Fria (Vf): 0,98 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 28 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 26 °C Saída Fria (Tf): 11,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,07 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 29 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25,1 °C Saída Fria (Tf): 9,9 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,70 m/s Saída Fria (Vf): 0,63 m/s	Experimento: 30 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,20 °C Saída Quente (Tq): 23,6 °C Saída Fria (Tf): 16,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,22 m/s Saída Fria (Vf): 0,54 m/s
Experimento: 31 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 1,1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 27,7 °C Saída Fria (Tf): 15 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,55 m/s Saída Fria (Vf): 1,87 m/s	Experimento: 32 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27 °C Saída Fria (Tf): 13,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 1,70 m/s	Experimento: 33 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,50 °C Saída Quente (Tq): 26,1 °C Saída Fria (Tf): 10,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,80 m/s
Experimento: 34 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,7 °C Saída Quente (Tq): 26,1 °C Saída Fria (Tf): 9,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,45 m/s Saída Fria (Vf): 0,90 m/s	Experimento: 35 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 23,1 °C Saída Fria (Tf): 17,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,34 m/s Saída Fria (Vf): 0,57 m/s	Experimento: 36 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1,00 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,50 °C Saída Quente (Tq): 29,3 °C Saída Fria (Tf): 12,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 1,75 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 37 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 28,3 °C Saída Fria (Tf): 11,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,18 m/s Saída Fria (Vf): 1,52 m/s	Experimento: 38 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 26,5 °C Saída Fria (Tf): 9,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,13 m/s Saída Fria (Vf): 0,91 m/s	Experimento: 39 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,1 °C Entrada (Te): 21,2 °C Saída Quente (Tq): 26,7 °C Saída Fria (Tf): 6,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,38 m/s Saída Fria (Vf): 0,75 m/s
Experimento: 40 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,1 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 23,7 °C Saída Fria (Tf): 13,9 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,40 m/s Saída Fria (Vf): 0,54 m/s	Experimento: 41 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 31,2 °C Saída Fria (Tf): 10,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,95 m/s Saída Fria (Vf): 1,04 m/s	Experimento: 42 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,90 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,7 °C Saída Quente (Tq): 29,2 °C Saída Fria (Tf): 10,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 0,98 m/s
Experimento: 43 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 28,5 °C Saída Fria (Tf): 6,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,93 m/s Saída Fria (Vf): 1,44 m/s	Experimento: 44 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 6,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,47 m/s Saída Fria (Vf): 0,71 m/s	Experimento: 45 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,4 °C Saída Quente (Tq): 23,3 °C Saída Fria (Tf): 12,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,47 m/s Saída Fria (Vf): 0,39 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 46 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,7 °C Saída Quente (Tq): 32,2 °C Saída Fria (Tf): 9,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,84 m/s Saída Fria (Vf): 1,59 m/s	Experimento: 47 Configuração Área Quente: 42,412 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 30,5 °C Saída Fria (Tf): 8,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,99 m/s Saída Fria (Vf): 1,52 m/s	Experimento: 48 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,00 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,7 °C Saída Quente (Tq): 29,1 °C Saída Fria (Tf): 5,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,78 m/s Saída Fria (Vf): 1,42 m/s
Experimento: 49 Configuração Área Quente: 75,398 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 27,3 °C Saída Fria (Tf): 4,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,38 m/s Saída Fria (Vf): 0,76 m/s	Experimento: 50 Configuração Área Quente: 100,53 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,3 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 24,2 °C Saída Fria (Tf): 12,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,32 m/s Saída Fria (Vf): 0,49 m/s	Experimento: 51 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 1,00 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,9 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 25,2 °C Saída Fria (Tf): 13,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,98 m/s
Experimento: 52 Configuração Área Quente: 42,412 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,8 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 23,9 °C Saída Fria (Tf): 13,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,09 m/s Saída Fria (Vf): 0,89 m/s	Experimento: 53 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,9 °C Entrada (Te): 19,4 °C Saída Quente (Tq): 25,0 °C Saída Fria (Tf): 9,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,49 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 54 Configuração Área Quente: 75,398 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,6 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 23,8 °C Saída Fria (Tf): 9,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,34 m/s Saída Fria (Vf): 0,59 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 55 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,6 °C Entrada (Te): 19,4 °C Saída Quente (Tq): 21,5 °C Saída Fria (Tf): 15,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,36 m/s	Experimento: 56 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,8 °C Entrada (Te): 19,3 °C Saída Quente (Tq): 27,9 °C Saída Fria (Tf): 10,9 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,57 m/s Saída Fria (Vf): 1,30 m/s	Experimento: 57 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,9 °C Entrada (Te): 19,3 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 10,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,55 m/s Saída Fria (Vf): 1,09 m/s
Experimento: 58 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,9 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 24,5 °C Saída Fria (Tf): 9,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,65 m/s Saída Fria (Vf): 0,52 m/s	Experimento: 59 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,0 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 24,6 °C Saída Fria (Tf): 7,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,22 m/s Saída Fria (Vf): 0,60 m/s	Experimento: 60 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,9 °C Entrada (Te): 19,3 °C Saída Quente (Tq): 21,6 °C Saída Fria (Tf): 13,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,15 m/s Saída Fria (Vf): 0,40 m/s
Experimento: 61 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 29,1 °C Saída Fria (Tf): 9,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,51 m/s Saída Fria (Vf): 1,35 m/s	Experimento: 62 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,4 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 27,7 °C Saída Fria (Tf): 9,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,40 m/s Saída Fria (Vf): 1,09 m/s	Experimento: 63 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 25,4 °C Saída Fria (Tf): 8,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,61 m/s Saída Fria (Vf): 0,67 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 64 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,80 °C Entrada (Te): 19,30 °C Saída Quente (Tq): 25,50 °C Saída Fria (Tf): 5,60 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,90 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 65 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 21,80 °C Entrada (Te): 19,60 °C Saída Quente (Tq): 22,20 °C Saída Fria (Tf): 12,30 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,24 m/s Saída Fria (Vf): 0,41 m/s	Experimento: 66 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,90 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,20 °C Entrada (Te): 19,60 °C Saída Quente (Tq): 30,70 °C Saída Fria (Tf): 8,10 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,38 m/s Saída Fria (Vf): 1,24 m/s
Experimento: 67 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 29,0 °C Saída Fria (Tf): 7,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,63 m/s Saída Fria (Vf): 1,17 m/s	Experimento: 68 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 27,5 °C Saída Fria (Tf): 5,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,40 m/s Saída Fria (Vf): 1,00 m/s	Experimento: 69 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,0 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 25,4 °C Saída Fria (Tf): 5,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,20 m/s Saída Fria (Vf): 0,71 m/s
Experimento: 70 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,0 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 22,0 °C Saída Fria (Tf): 11,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,07 m/s Saída Fria (Vf): 0,32 m/s	Experimento: 71 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,4 °C Entrada (Te): 19,7 °C Saída Quente (Tq): 33,3 °C Saída Fria (Tf): 6,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,25 m/s Saída Fria (Vf): 1,45 m/s	Experimento: 72 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 38,485 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,3 °C Entrada (Te): 19,7 °C Saída Quente (Tq): 30,9 °C Saída Fria (Tf): 5,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,51 m/s Saída Fria (Vf): 1,30 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 73 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,4 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 28,6 °C Saída Fria (Tf): 4,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,40 m/s Saída Fria (Vf): 1,13 m/s	Experimento: 74 Configuração Área Quente: 75,398 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,3 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 26,3 °C Saída Fria (Tf): 3,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,76 m/s	Experimento: 75 Configuração Área Quente: 100,53 mm² Área Fria: 38,485 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,3 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 22,6 °C Saída Fria (Tf): 10,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,07 m/s Saída Fria (Vf): 0,39 m/s
Experimento: 76 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 63,617 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 33,3 °C Saída Fria (Tf): 10,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,45 m/s Saída Fria (Vf): 0,64 m/s	Experimento: 77 Configuração Área Quente: 42,412 mm² Área Fria: 63,617 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,8 °C Saída Quente (Tq): 31,6 °C Saída Fria (Tf): 9,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,43 m/s Saída Fria (Vf): 0,49 m/s	Experimento: 78 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 63,617 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,5 °C Saída Quente (Tq): 29,8 °C Saída Fria (Tf): 6,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,47 m/s Saída Fria (Vf): 0,38 m/s
Experimento: 79 Configuração Área Quente: 75,398 mm² Área Fria: 63,617 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27,4 °C Saída Fria (Tf): 7,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,67 m/s Saída Fria (Vf): 0,32 m/s	Experimento: 80 Configuração Área Quente: 100,53 mm² Área Fria: 63,617 mm² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,5 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 24,0 °C Saída Fria (Tf): 15,9 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,20 m/s Saída Fria (Vf): 0,28 m/s	Experimento: 81 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 63,617 mm² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm² Entrada (Pe): 3,0 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 35,8 °C Saída Fria (Tf): 9,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,12 m/s Saída Fria (Vf): 0,96 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 82 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 33,5 °C Saída Fria (Tf): 7,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,19 m/s Saída Fria (Vf): 0,80 m/s	Experimento: 83 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,4 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 29,4 °C Saída Fria (Tf): 6,9 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,38 m/s Saída Fria (Vf): 0,51 m/s	Experimento: 84 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,70 °C Saída Quente (Tq): 29,1 °C Saída Fria (Tf): 4,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,13 m/s Saída Fria (Vf): 0,46 m/s
Experimento: 85 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 695 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 23,8 °C Saída Fria (Tf): 15,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,22 m/s Saída Fria (Vf): 0,22 m/s	Experimento: 86 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 34,7 °C Saída Fria (Tf): 5,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 2,89 m/s Saída Fria (Vf): 0,87 m/s	Experimento: 87 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,40 °C Saída Quente (Tq): 32,1 °C Saída Fria (Tf): 4,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,12 m/s Saída Fria (Vf): 0,57 m/s
Experimento: 88 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,2 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 28,9 °C Saída Fria (Tf): 3,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,36 m/s Saída Fria (Vf): 0,49 m/s	Experimento: 89 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 28,2 °C Saída Fria (Tf): 1,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,74 m/s Saída Fria (Vf): 0,48 m/s	Experimento: 90 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,50 °C Saída Quente (Tq): 22 °C Saída Fria (Tf): 13,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,30 m/s Saída Fria (Vf): 0,18 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento: 91 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 36,5 °C Saída Fria (Tf): 4,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 2,84 m/s Saída Fria (Vf): 0,98 m/s	Experimento: 92 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22 °C Entrada (Te): 19,3 °C Saída Quente (Tq): 34 °C Saída Fria (Tf): 3,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,04 m/s Saída Fria (Vf): 1,02 m/s	Experimento: 93 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,30 °C Saída Quente (Tq): 30,5 °C Saída Fria (Tf): 1,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,13 m/s Saída Fria (Vf): 0,50 m/s
Experimento: 94 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,6 °C Saída Quente (Tq): 27,7 °C Saída Fria (Tf): 1,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,37 m/s	Experimento: 95 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22 °C Entrada (Te): 19,3 °C Saída Quente (Tq): 21,2 °C Saída Fria (Tf): 12,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 6,20 m/s Saída Fria (Vf): 0,16 m/s	Experimento: 96 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22 °C Entrada (Te): 19,30 °C Saída Quente (Tq): 38,8 °C Saída Fria (Tf): 2,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 2,80 m/s Saída Fria (Vf): 1,20 m/s
Experimento: 97 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 35,2 °C Saída Fria (Tf): 2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,08 m/s Saída Fria (Vf): 1,11 m/s	Experimento: 98 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,5 °C Saída Quente (Tq): 32 °C Saída Fria (Tf): 0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,13 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 99 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 63,617 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 701 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 3 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 22,1 °C Entrada (Te): 19,50 °C Saída Quente (Tq): 28,5 °C Saída Fria (Tf): -0,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,86 m/s Saída Fria (Vf): 0,37 m/s

Apêndice B – Folha de Dados – Testes Gerais Originais

Experimento:	100
Configuração	
Área Quente:	100,53 mm ²
Área Fria:	63,617 mm ²
Comprimento:	700 mm
Pressões	
Ambiente (Pamb):	701 mmHg
Interna (Pi):	0,6 kgf/cm ²
Entrada (Pe):	3 kgf/cm ²
Temperaturas	
Ambiente (Tamb):	22,1 °C
Entrada (Te):	19,5 °C
Saída Quente (Tq):	22,5 °C
Saída Fria (Tf):	11,7 °C
Velocidades	
Saída Quente (Vq):	6,26 m/s
Saída Fria (Vf):	0,19 m/s

APÊNDICE C

Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Apêndice C – Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Experimento: 1 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25 °C Saída Fria (Tf): 15,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 1,61 m/s	Experimento: 2 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 24,3 °C Saída Fria (Tf): 15,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,51 m/s Saída Fria (Vf): 1,09 m/s	Experimento: 3 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 25,5 °C Saída Fria (Tf): 8,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,76 m/s Saída Fria (Vf): 1,00 m/s
Experimento: 4 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 24,1 °C Saída Fria (Tf): 8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,03 m/s Saída Fria (Vf): 0,76 m/s	Experimento: 5 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,5 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 22,4 °C Saída Fria (Tf): 13 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,22 m/s Saída Fria (Vf): 0,47 m/s	Experimento: 6 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1,10 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 25,3 °C Saída Fria (Tf): 15,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 1,63 m/s
Experimento: 7 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25,8 °C Saída Fria (Tf): 13 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,40 m/s Saída Fria (Vf): 1,44 m/s	Experimento: 8 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 24,6 °C Saída Fria (Tf): 11 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,95 m/s Saída Fria (Vf): 0,85 m/s	Experimento: 9 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 24,7 °C Saída Fria (Tf): 8,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,95 m/s Saída Fria (Vf): 0,73 m/s

Apêndice C – Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Experimento: 10 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,5 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,7 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 23,7 °C Saída Fria (Tf): 15,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,49 m/s Saída Fria (Vf): 0,44 m/s	Experimento: 11 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 27,3 °C Saída Fria (Tf): 13,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,88 m/s Saída Fria (Vf): 1,87 m/s	Experimento: 12 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,90 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 12,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,26 m/s Saída Fria (Vf): 1,50 m/s
Experimento: 13 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25,2 °C Saída Fria (Tf): 10,9 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,93 m/s Saída Fria (Vf): 1,12 m/s	Experimento: 14 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25,3 °C Saída Fria (Tf): 6,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,95 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 15 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,50 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 23,3 °C Saída Fria (Tf): 12 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,59 m/s Saída Fria (Vf): 0,51 m/s
Experimento: 16 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 29 °C Saída Fria (Tf): 11,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,72 m/s Saída Fria (Vf): 1,92 m/s	Experimento: 17 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 27,6 °C Saída Fria (Tf): 11 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,20 m/s Saída Fria (Vf): 1,59 m/s	Experimento: 18 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 27,2 °C Saída Fria (Tf): 6,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,68 m/s Saída Fria (Vf): 1,13 m/s

Apêndice C – Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Experimento: 19 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 25,6 °C Saída Fria (Tf): 6,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,99 m/s Saída Fria (Vf): 0,78 m/s	Experimento: 20 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,5 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 23,7 °C Saída Fria (Tf): 10,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,40 m/s Saída Fria (Vf): 0,49 m/s	Experimento: 21 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1,00 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 30,4 °C Saída Fria (Tf): 10,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,66 m/s Saída Fria (Vf): 2,05 m/s
Experimento: 22 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 29 °C Saída Fria (Tf): 9,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,93 m/s Saída Fria (Vf): 1,74 m/s	Experimento: 23 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 28 °C Saída Fria (Tf): 6,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,55 m/s Saída Fria (Vf): 1,20 m/s	Experimento: 24 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,70 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,30 °C Saída Quente (Tq): 26,5 °C Saída Fria (Tf): 5,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,93 m/s Saída Fria (Vf): 0,90 m/s
Experimento: 25 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 19,635 mm ² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,6 °C Entrada (Te): 21,3 °C Saída Quente (Tq): 24 °C Saída Fria (Tf): 8,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,51 m/s Saída Fria (Vf): 0,52 m/s	Experimento: 26 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 26,7 °C Saída Fria (Tf): 15,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,86 m/s Saída Fria (Vf): 1,76 m/s	Experimento: 27 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1,00 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,60 °C Saída Quente (Tq): 25,1 °C Saída Fria (Tf): 15,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,53 m/s Saída Fria (Vf): 1,26 m/s

Apêndice C – Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Experimento: 28 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 21,6 °C Saída Fria (Tf): 10,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,70 m/s Saída Fria (Vf): 1,13 m/s	Experimento: 29 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 25,1 °C Saída Fria (Tf): 9,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,01 m/s Saída Fria (Vf): 0,80 m/s	Experimento: 30 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 300 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,60 °C Saída Quente (Tq): 23,5 °C Saída Fria (Tf): 14,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,51 m/s Saída Fria (Vf): 0,45 m/s
Experimento: 31 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 1 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 28,3 °C Saída Fria (Tf): 14,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,74 m/s Saída Fria (Vf): 1,86 m/s	Experimento: 32 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27,8 °C Saída Fria (Tf): 12,5 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,07 m/s Saída Fria (Vf): 1,70 m/s	Experimento: 33 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,60 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 10,3 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,72 m/s Saída Fria (Vf): 1,02 m/s
Experimento: 34 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 26,3 °C Saída Fria (Tf): 8,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,93 m/s Saída Fria (Vf): 0,83 m/s	Experimento: 35 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 400 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 23,7 °C Saída Fria (Tf): 12,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,55 m/s Saída Fria (Vf): 0,46 m/s	Experimento: 36 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,90 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,60 °C Saída Quente (Tq): 29 °C Saída Fria (Tf): 12,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,55 m/s Saída Fria (Vf): 2,03 m/s

Apêndice C – Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Experimento: 37 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 28,4 °C Saída Fria (Tf): 11,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,95 m/s Saída Fria (Vf): 1,83 m/s	Experimento: 38 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 26,3 °C Saída Fria (Tf): 9,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,76 m/s Saída Fria (Vf): 1,07 m/s	Experimento: 39 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27,2 °C Saída Fria (Tf): 7,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,84 m/s Saída Fria (Vf): 0,94 m/s
Experimento: 40 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 500 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 23,5 °C Saída Fria (Tf): 12,7 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,47 m/s Saída Fria (Vf): 0,41 m/s	Experimento: 41 Configuração Área Quente: 31,416 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 30,6 °C Saída Fria (Tf): 10,2 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,49 m/s Saída Fria (Vf): 2,18 m/s	Experimento: 42 Configuração Área Quente: 42,412 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,80 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 28,7 °C Saída Fria (Tf): 9,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,88 m/s Saída Fria (Vf): 1,80 m/s
Experimento: 43 Configuração Área Quente: 56,549 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 28,3 °C Saída Fria (Tf): 6,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,45 m/s Saída Fria (Vf): 1,35 m/s	Experimento: 44 Configuração Área Quente: 75,398 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 26,6 °C Saída Fria (Tf): 6,0 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,90 m/s Saída Fria (Vf): 0,87 m/s	Experimento: 45 Configuração Área Quente: 100,53 mm ² Área Fria: 28,274 mm ² Comprimento: 600 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,60 kgf/cm ² Entrada (Pe): 4 kgf/cm ² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 23,9 °C Saída Fria (Tf): 11,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,49 m/s Saída Fria (Vf): 0,46 m/s

Apêndice C – Folha de Dados – Testes Gerais Aperfeiçoados

Experimento: 46 Configuração Área Quente: 31,416 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,9 kgf/cm² Entrada (Pe): 4 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 32,4 °C Saída Fria (Tf): 8,6 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,38 m/s Saída Fria (Vf): 2,31 m/s	Experimento: 47 Configuração Área Quente: 42,412 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,8 kgf/cm² Entrada (Pe): 4 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 30,5 °C Saída Fria (Tf): 7,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 3,74 m/s Saída Fria (Vf): 1,94 m/s	Experimento: 48 Configuração Área Quente: 56,549 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,7 kgf/cm² Entrada (Pe): 4 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 29,1 °C Saída Fria (Tf): 5,1 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,36 m/s Saída Fria (Vf): 1,40 m/s
Experimento: 49 Configuração Área Quente: 75,398 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm² Entrada (Pe): 4 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 27,3 °C Saída Fria (Tf): 4,4 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 4,74 m/s Saída Fria (Vf): 0,98 m/s	Experimento: 50 Configuração Área Quente: 100,53 mm² Área Fria: 28,274 mm² Comprimento: 700 mm Pressões Ambiente (Pamb): 696 mmHg Interna (Pi): 0,6 kgf/cm² Entrada (Pe): 4 kgf/cm² Temperaturas Ambiente (Tamb): 24,2 °C Entrada (Te): 21,6 °C Saída Quente (Tq): 24,0 °C Saída Fria (Tf): 9,8 °C Velocidades Saída Quente (Vq): 5,38 m/s Saída Fria (Vf): 0,51 m/s	

APÊNDICE D

Artigo Publicado no
18th International Congress of Mechanical Engineering -
COBEM 2005 / Ouro Preto, MG,
intitulado “Experimental Study of a Vortex Tube”

EXPERIMENTAL STUDY OF A VORTEX TUBE

Rafael Angelo Polisel

SISEA – Alternative Energy Systems Laboratory - Mechanical Eng. Dept. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Av. Prof Mello Moraes 2231, CEP 05508-900 - São Paulo, SP - Brasil
rafael.polisel@poli.usp.br

José R. Simões-Moreira

SISEA – Alternative Energy Systems Laboratory - Mechanical Eng. Dept. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Av. Prof Mello Moraes 2231, CEP 05508-900 - São Paulo, SP - Brasil
jrsimoes@usp.br

Abstract. Vortex tube or Ranque-Hilsch tube is a quite simple moving parts free mechanical device which is basically formed by a cylindrical body having a compressed air inlet machined perpendicularly to it. As compressed air flows into the inlet it reaches the inner part of the tube tangentially describing a swirling path, which splits the incoming air into two flow streams to each one of the tube ends. In one of the ends the air is cooler than the intake air temperature, while in the other end the exiting air is warmer.

The goal of this experimental study is to find out the best operational conditions by a parametric analysis. The variables studied are: different "hot" and "cold" cross sections; tube length; and intake compressed air pressure. In some cases, it was found a temperature difference of 36 °C between the "hot" and "cold" exits for a feeding air pressure of about 3.5 bar abs.

The tests have shown that the lengthier the tube, the higher the temperature difference. Increasing pressure also increases the temperature difference. An interesting find is that as the "hot" cross section was increased, there was a point where the device operated the best as seen from an analysis of the "cold" air exit. The paper reports several experimental results.

Keywords: Ranque, Hilsch, Vortex, Air cooling.

1. Introduction

The Vortex tube, also known as Ranque-Hilsch tube, was accidentally developed by the French physicist Gorges Ranque around the year 1930. Georges Ranque was carrying out experiments with a vortex generating device and noticed that cold air was released in the end of a tube while hot air left the tube in the other extremity. Ranque presented a paper to the Cientifique Society in 1933 describing his findings about the Vortex tube, but it raised questions about the authenticity of the phenomenon. His finding went without any notice until Rudolph Hilsch, a German physicist, showed a great interest for it exploring the subject more deeply, which drew attention to many people who erroneously believed he was the inventor of the vortex tube giving the name of "Hilsch Tube" to the device. (http://www.exair.com/vortextube/vt_theory.htm)

The Vortex tube is formed by a cylindrical tube in which compressed air is injected perpendicularly and tangentially to the internal tube wall trough a nozzle as schematically shown in Fig. 1. As the air reaches the inner part it describes a swirling path reaching up to 1.000.000 rpm as it advances in direction to the hot end exit, where only a fraction of it is released. The remaining air flow reflects back taking the central axial region and still rotating in the same direction to exit in the other end (cold exit). As illustrated in Fig. 1, swirling hot air leaves the tube in the peripheral cross sectional area at a higher temperature compared to the inlet air while swirling cold air leaves the tube in the central area of the other exit at a lower temperature.

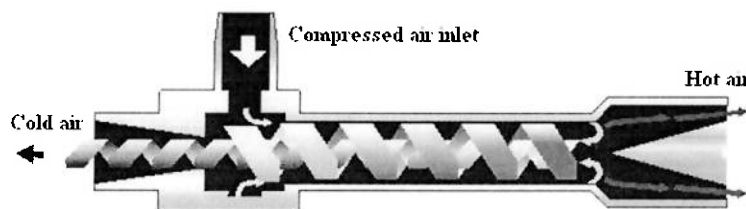


Figure 1. Working principle of a Vortex tube. Compressed air is injected tangentially to the tube. The air stream is split into two other streams, one hot (right side) and the other cold (left side).

2. Experimental Facility

2.1. Test Rig

Figure 2 shows a diagram of the test rig used to carry out the experiments. The Ranque-Hilsch tube is connected to a compressed air line and the injection pressure is set by a pressure controlling valve. Air injection pressure and temperature can be measured as indicated. A shut off valve blocks off the air if necessary.

Cold and hot air exits are connected to a PVC tube where instrumentation was fixed. A thermocouple was inserted in the flow. Exit velocities were taken using a digital anemometer.

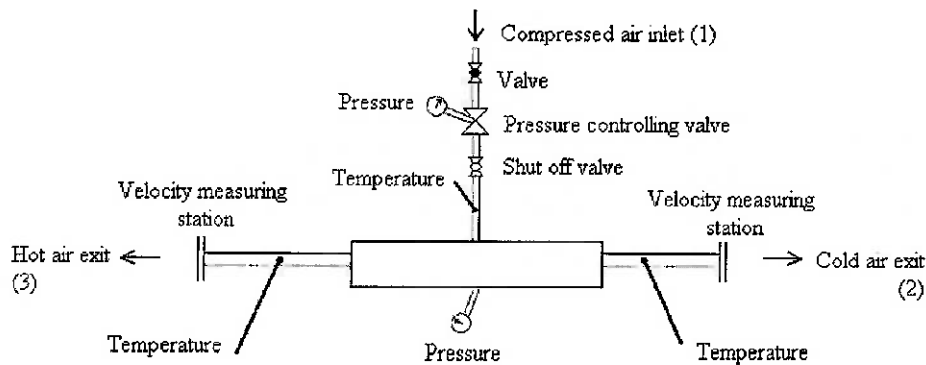


Figure 2. Diagram of the test rig

2.2. Prototype

Figure 3 presents a still picture of the Vortex tube assembled on the test rig base. Cold air exited on the left side and hot air on the right side. Inlet compressed air connection is also shown. Instrumentation taps can also be seen in that picture.

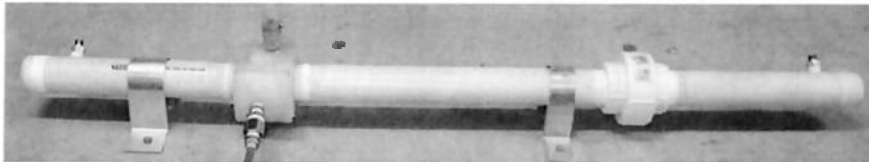


Figure 3. Vortex tube prototype

Figures 4 and 5 show details of some of the main parts of the Vortex tube. Fig. 4 shows details of the injection sleeve and the compressed air intake tap. Fig. 5 displays two still pictures of the inserts from which air flows out the device. Left insert is for cold air, while the other is for hot air. Notice that cold air flows out through the central part, where hot air leaves in the peripheral area of the tube.



Figure 4. Compressed air injection sleeve

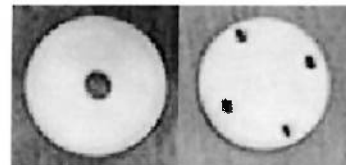


Figure 5. Inserts from which cold air (left) and hot air (right) flows through before leaving the vortex tube

3. Physical Modelling

3.1. Energy and Mass Balances

Considering the control volume enveloping the tube as illustrated in Fig. 6, a balance energy yields the following equation (Eq. 1):

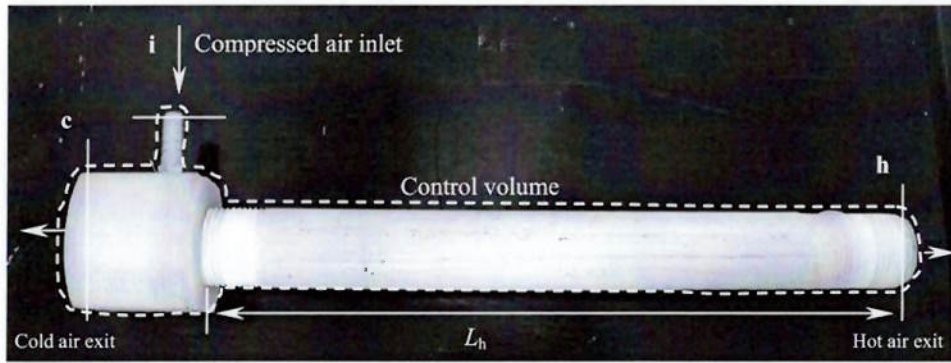


Figure 6. Control volume enveloping the Ranque-Hilsch tube

$$\frac{dE_{C.V.}}{dt} = \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} + \sum \dot{m}_i (h_i + \frac{1}{2}V_i^2 + gZ_i) - \sum \dot{m}_o (h_o + \frac{1}{2}V_o^2 + gZ_o), \quad (1)$$

where, indexes “i” and “o” refer to inlet and outlet conditions, respectively. $E_{C.V.}$ is the instantaneous control volume total energy, $\dot{Q}_{C.V.}$ is the control volume heat exchange with the environment, $\dot{W}_{C.V.}$ is the shaft power, $\dot{m}$ is the mass flow rate, h is the specific enthalpy, V is the velocity in and out the control volume, Z is elevation, and g acceleration of gravity. The usual assumptions of steady state, adiabatic control volume, no shaft power and negligible kinetic and potential energy, the simple equation comes out.

$$\dot{m}_i h_i = \dot{m}_h h_h + \dot{m}_c h_c, \quad (2)$$

since there are two exits, one “cold” and the other “hot”, the outlets are indicated by the indexes “c” and “h”, respectively. A further hypothesis may be assumed based on the ideal gas behavior. By assuming a constant specific heat at constant pressure, C_p , one may obtain the equation (Eq. 3),

$$\dot{m}_i T_i = \dot{m}_h T_h + \dot{m}_c T_c. \quad (3)$$

Let μ be defined as the mass flow ratio between “cold” and inlet mass flow rates, i. e., ($\mu = \dot{m}_c / \dot{m}_i$), which is called “cold mass ratio”. That magnitude in combination with the mass conservation equation, $\dot{m}_i = \dot{m}_h + \dot{m}_c$, Eq. (3) yield the following equation (Eq. 4),

$$T_i = (1 - \mu) T_h + \mu T_c, \quad (4)$$

which implies that

$$\mu = \frac{T_i - T_h}{T_c - T_i}. \quad (5)$$

The set of equations above were used to compare experimental results.

3.2. Experimental Data Reduction

Values of cold mass ratio, μ , were obtained experimentally from exit velocity measurements as shown below. Eq. (6) is obtained directly from μ definition,

$$\mu_{meas} = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i} = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_c + \dot{m}_h} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_c}}, \quad (6)$$

where, $\dot{m}_c = \rho_c \cdot A_c \cdot V_c$ and $\dot{m}_h = \rho_h \cdot A_h \cdot V_h$ are the mass flow rates. By substituting these equations into Eq. (6), also considering that $A_c = A_h$ for the tested setup, then one can obtain the (indirectly) measured cold mass ratio, μ_{meas} , which is given by

$$\mu_{meas} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_c}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_h \cdot A_h \cdot V_h}{\rho_c \cdot A_c \cdot V_c}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_h \cdot V_h}{\rho_c \cdot V_c}}. \quad (7)$$

Since both “cold” and “hot” exits are discharging into local environment, it is possible to show that the density ρ is the reciprocal of the absolute temperature, i. e.,

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \Rightarrow \rho \approx \frac{1}{T}. \quad (8)$$

Finally, by substituting this last equation into Eq. (7), it results in

$$\mu_{meas} = \frac{1}{1 + \frac{T_c \cdot V_h}{T_h \cdot V_c}}. \quad (9)$$

4. Parametric Analysis

A parametric study was carried out in order to find out the best operational conditions of the Ranque-Hilsch tube. The study had its starting point based on the works of Staschower and Rotter (2003) and Piralishvili (1994). These previous work identified that three geometrical parameters dominate tube operation. The first two important parameters are the exit cold and hot areas, which comprise the first two columns in Table 1. The third governing geometrical parameter is the “hot” side tube length. Table 1 shows the magnitude values used in this work. As far as feeding pressure concerns, it has been found (Staschower and Rotter, 2003) that the higher the pressure, the higher the temperature difference between “hot” and “cold” exits. The present experiments were carried out at the highest possible pressure the compressor would supply at the mass flow rate being tested (0.35 MPa).

A experiment matrix was setup by combining all possibilities of the geometrical parameters, i. e., $4 \times 5 \times 5$, giving a total of 100 experiments.

Table 1. Geometrical magnitudes tested

Cold area (mm ²)	Hot area (mm ²)	Hot tube length (mm)
19.6	31.4	300
28.3	42.4	400
38.5	56.5	500
63.6	75.4	600
-	100.5	700

5. Experimental Results and Analysis

Figures 7 to 11 show the main experimental results for all the possible combinations. In all cases the graphics has ΔT_c as function of hot area (A_h), where ΔT_c is the difference between the inlet temperature and the cold exit temperature. Fig. 7 is for hot tube length (L_h) of 300 mm, Fig. 8 for $L_h = 400$ mm, Fig. 9 for $L_h = 500$ mm, Fig. 10 for $L_h = 600$ mm, and Fig. 11 for $L_h = 700$ mm. As seen in figures sequence, for each hot tube length four test sequences were carried out having the cold area exit values indicated in Table 1. Exit temperatures were also measured, but only the cold ones are shown for sake of saving space. For all tests, it has been shown that the highest temperature difference, i.e., the smallest cold temperature, systematically occurred for the larger area exit tested ($A_c = 63.6$ mm²).

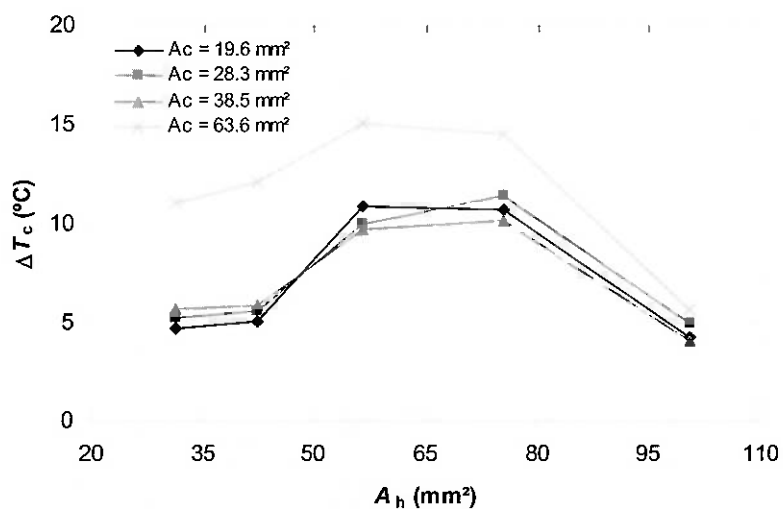


Figure 7. Temperature drop for $L_h = 300$ mm

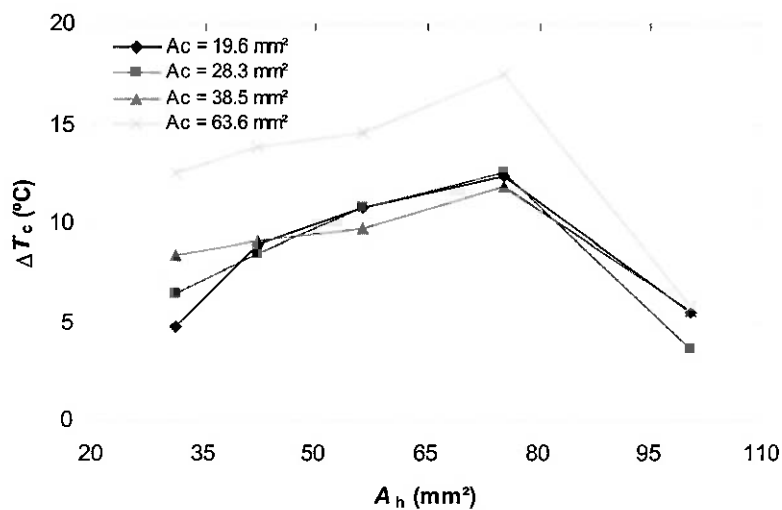


Figure 8. Temperature drop for $L_h = 400$ mm

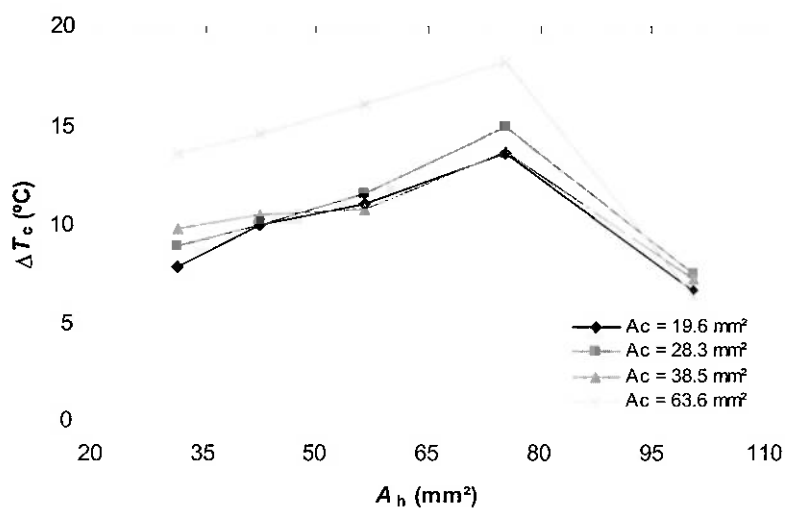


Figure 9. Temperature drop for $L_h = 500$ mm

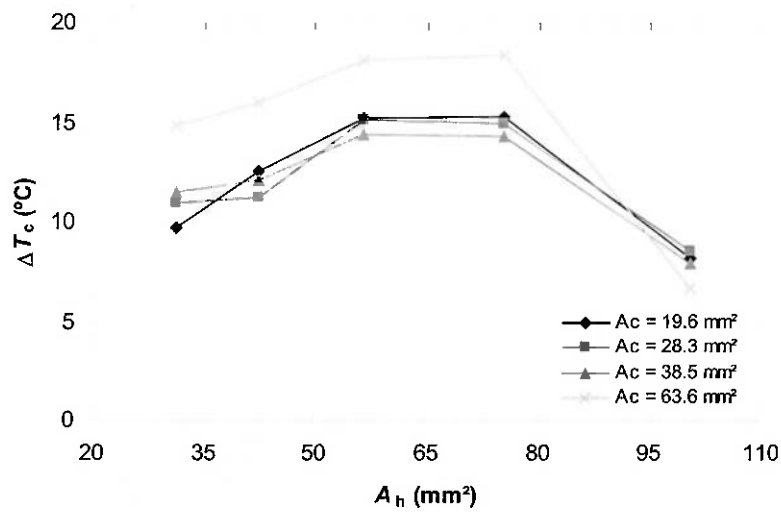


Figure 10. Temperature drop for $L_h = 600$ mm

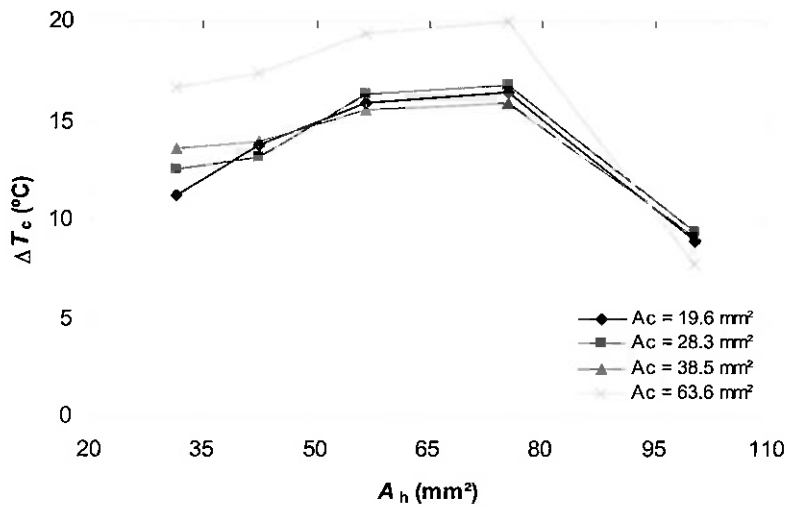


Figure 11. Temperature drop for $L_h = 700$ mm

Another important conclusion one can draw refers to the influence of the hot area (A_h). As a general rule, as the hot area is increased, the temperature difference increases as well up to a point of maximum, to decrease afterwards. From an analysis of Figs. 7 to 11, the maximum ΔT_c occurred between the hot areas $A_h = 56.5$ mm² and 75.4 mm², for all the conducted tests. Finally, the last important observation regarding optimal operation conditions can be drawn observing the graphics in Fig. 12. This graphics was devised from experiments with the best cold area, i. e., $A_c = 63.9$ mm² for all studied cases. As one can see in that figure, the lengthier the hot tube portion, L_h , the better the tube operate. A maximum temperature drop ΔT_c of 20 °C was achieved with the device designed in here.

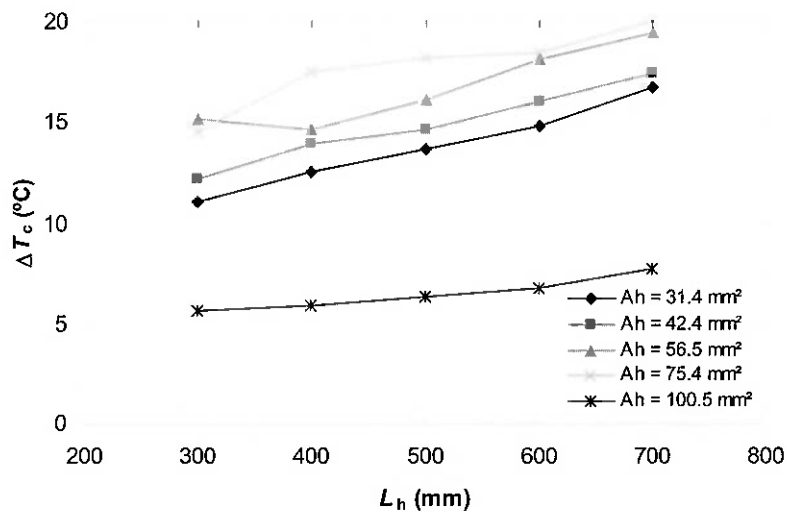


Figure 12. Hot tube length influence for $A_c = 63.6 \text{ mm}^2$

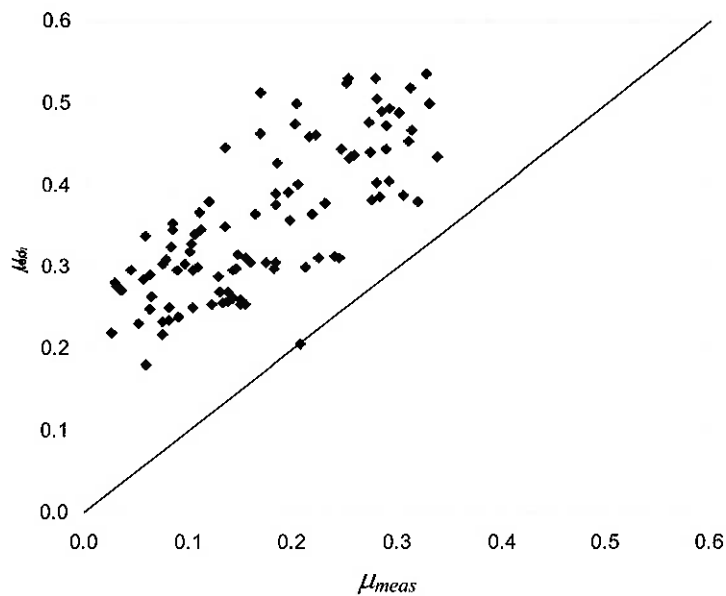


Figure 13. First Law of Thermodynamics – Comparison of μ_{th} x μ_{meas}

A last analysis was carried out regarding closing the First Law of Thermodynamics. The graphics in Fig. 13 indicated the measured cold mass ratio, μ_{meas} , versus the theoretical value, μ_{th} . Measured value was inferred from velocity and temperature measurements of cold and hot exits and data reduction according to Eq. (9). Theoretical cold mass ratio, μ_{th} , was calculated from Eq. (5), which is derived from the First Law. A perfect correlation would furnish all the experimental data lining up over the 45° line in the graphics in Fig. 13. However, for authors' surprise the graphics clearly shows that the measured value systematically felt always below the theoretical one. This finding made the authors to question the velocity measuring equipment. It is now under investigation to find out the reason why such a discrepancy.

6. Conclusions

The present parametric study of a Ranque-Hilsch or Vortex tube set the limits of some important operational performance and established a geometrical influence over the overall behavior. As a first conclusion, it was found that a larger exiting cold air area increases the temperature drop, i.e., the difference between the inlet and cold air exit temperatures at least for the device and the area range studied here. Another important conclusion is that the lengthier the hot portion of the tube the colder is the air. On the other hand, an interesting finding was related to the hot air exit area. For the area range tested here, there was a hot area range for which the temperature drop reached a point of maximum. The best operating conditions were: hot tube length equals to 700 mm, cold air exit area equals to 63.6 mm², and hot air exit area within the range of 56.5 to 75.4 mm². Of course these values must be refined in future through a test mapping procedure to thoroughly cover all the range of interest with experimental data. However, it is good to recall that this is a real time consuming task. New checks will be done with the velocity measuring system which showed to be inadequate for the present tests.

Finally, as a last comment, the influence of the feeding pressure was not properly analyzed due to the limitations of the air compressor that could not deliver enough mass flow rate at certain pressure levels.

7. Acknowledgments

The authors would like to acknowledge FAPESP and CNPq (Brazil) for personal support, respectively.

8. References

- ATRX - THE AIR RESEARCH TECHNOLOGY COMPANY (www.artxlt.com/vortex/principle.shtml). First access: Dec/2003.
- ATRX - THE AIR RESEARCH TECHNOLOGY COMPANY (www.artxlt.com/vortex/apps.shtml). First access: Dec/2003.
- EXAIR (www.exair.com/vortextube/vt_theory.htm). First access: Nov/2003.
- Lewis, J. and Bejan, A., 1999, "Vortex tube optimization theory", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 931-943.
- Piralishvili, Sh. A. and Polayev, V. M., 1996, "Flow and thermodynamics characteristics of energy separation in a double-circuit vortex tube – An experimental investigation", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier Science.
- Staschower, M. and Rotter, B., 2003, "Estudo de um Tubo de Ranque-Hilsch", Mech Eng. Dept. at Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Final Graduation Project, São Paulo, Brasil.
- Wylen, G. J. V., Sonntag, R. E. and Borgnakke, G., 2003, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 6^a ed., New York.

APÊNDICE E

Artigo Publicado no
13º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo -
SIICUSP / São Carlos, SP,
intitulado “Estudo Experimental de um Tubo de Vórtices”

Título em Português: Estudo Experimental de um Tubo de Vórtices
Título em Inglês: Experimental Study of a Vortex Tube
Área de Pesquisa: ENGENHARIAS E EXATAS / Engenharia Mecânica Plena
Resumo do Trabalho:

Objetivos:
Estudo paramétrico de um Tubo de Vórtices ou de Ranque-Hilsh com a finalidade de se determinar as melhores condições operacionais.

Material e/ou métodos:

Um protótipo do Tubo de Vórtices foi construído de forma a permitir a variação de alguns parâmetros construtivos, quais sejam: comprimento do tubo quente e área das seções de saída do escoamento. Nos ensaios, para cada combinação de valores das variáveis, ar comprimido é injetado perpendicular e tangencialmente à parede do tubo e em cada uma das saídas do ar (extremidades tubo) são tomadas as medidas de temperatura e vazão.

Resultados:

Retirando-se apenas uma parcela do ar em uma das extremidades do tubo, pela periferia do diâmetro, obteve-se um escoamento a uma temperatura superior à temperatura de entrada, enquanto que na outra extremidade, retirando-se ar apenas pela região central do diâmetro, obteve-se uma corrente de ar a uma temperatura inferior à temperatura de entrada, atingindo-se diferenças de até 20 °C para uma pressão de entrada de 3 bar.

Conclusões:

Dentre as dimensões ensaiadas, os resultados têm se mostrado melhores para maiores comprimentos do tubo quente e maiores áreas frias. Excelentes resultados foram obtidos para a variável área quente, para a qual foi possível se determinar uma faixa ótima de operação caracterizada pela concavidade negativa da curva Diferença de Temperatura Fria X Área Quente obtida.

Palavras Chave: Ranque - Hilsh - Vórtices - Resfriamento
Ag. Financiadora do Projeto: FAPESP

ORIENTADOR

Nome:	José Roberto Simões Moreira	Instituição/Sigla:	Universidade de São Paulo / USP
Abrev.:	Simões-Moreira, J. R.	Unidade/Sigla:	Escola Politécnica / EP
Bolsa/Ag.:		Departamento:	Engenharia Mecânica / PME
Cidade/País:	São Paulo/Brasil	Labor./Setor	Laboratório SISEA (Sistemas Energéticos Alternativos)

AUTOR(1)

Nome:	Rafael Angelo Polisel	Instituição/Sigla:	Universidade de São Paulo / USP
Abrev.:	Polisel, R. A.	Unidade/Sigla:	Escola Politécnica / EP
Bolsa/Ag.:	FAPESP	Departamento:	Engenharia Mecânica / PME
Cidade/País:	São Paulo/Brasil	Labor./Setor	Laboratório SISEA (Sistemas Energéticos Alternativos)

CONTATO

Nome: Rafael Angelo Polisel
Telefone: 11 - 37651320 **Email:** rafael.polisel@poli.usp.br
Data de Validação do Trabalho:

