

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

Estudo de um Tubo de Ranque-Hilsch

**Boris Rotter
Márcio Staschower**

Orientador: J. R. Simões Moreira

**São Paulo
2003**

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

Estudo de um Tubo de Ranque-Hilsch

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

**Boris Rotter
Márcio Staschower**

Orientador: J. R. Simões Moreira

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2003**

1356138

cad.

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010608

Tubo (Comprimento)

TF-03
R 747e

Staschower, Márcio

Rotter, Boris

Ranque-
Estudo de um Tubo de Hilsch,

por B. Rotter e M. Staschower. São Paulo : EPUSP, 2003.

43P. + anexos

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tubo de Hilsch
2. Tubo de Ranque
3. Vortex Tube

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecânica II. t.

Valeu a pena? Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena.
Quem quer passar além do Bojador
Tem que passar além da dor.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a nossos Pais e Mães por proporcionarem este momento memorável em
nossas vidas.

RESUMO

Tubo de Hilsch, Tubo de Ranque-Hilsch ou ainda Tubo de Vortex foi criado por Georges Ranque, físico francês, em 1930, entretanto só tomou-se conhecido pelo meio acadêmico quando estudado por Rudolph Hilsch em 1939. O equipamento consiste basicamente de um tubo cilíndrico onde ar comprimido é injetado tangencialmente à parede do tubo por um bocal. Dentro do tubo o ar escoar em uma trajetória espiral gerando um vortex. Cada extremidade do tubo possibilita uma saída para o escoamento. Em uma das saídas, a temperatura do escoamento é inferior à temperatura de entrada, já na outra a temperatura é superior à da entrada. Este trabalho tem por objetivo investigar quais e como alguns parâmetros como: pressão de entrada, razões entre as vazões de saída e comprimento do tubo influenciam o desempenho do Tubo de Hilsch.

SUMÁRIO

LISTA DE VARIÁVEIS

LISTA DE ÍNDICES SUBSCRITOS

1. Introdução	1
2. Histórico	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1. Primeira Lei da Termodinâmica	3
3.2. Segunda Lei da Termodinâmica	4
3.3. Equações de Navier Stokes	5
4. Instalação Experimental	9
4.1. Instrumentos de Medição	9
4.1.1. Temperatura	10
4.1.2. Pressão	10
4.1.3. Velocidade	11
4.2. Instrumentos de Controle	11
4.3. Equipamentos	12
4.3.1. Compressor Alternativo	12
4.3.2. Protótipo do Tubo de Hilsch	12
5. Dimensionamento dos Protótipos	14
5.1. Protótipo P-01	14
5.1.1. Dados dimensionais do Protótipo P-01	15
5.1.2. Problemas de construção do Protótipo P-01	16
5.2. Protótipo P-02	18
5.2.1. Modificações Realizadas	18
5.2.2. Dados dimensionais do Protótipo P-02	20
6. Coleta de Dados	22
6.1. Fluxograma de Engenharia	22
6.2. Procedimento para realização de ensaios	22

6.2.1. Preparação Inicial	22
6.2.2. Realização do ensaio	23
6.3. Manipulação dos dados Obtidos	24
6.3.1. Densidade	24
6.3.2. Vazão	24
6.3.3. Primeira Lei da Termodinâmica	25
6.3.4. Segunda Lei da Termodinâmica	26
6.3.5. COP	28
6.3.6. Expansão Isoentrópica	29
7. Resultados Obtidos	30
7.1. Protótipo P-01	30
7.2. Protótipo P-02	30
7.3. Análise dos Resultados	30
7.3.1. Diferença de Temperatura	31
7.3.2. Afastamento da Primeira Lei	31
7.3.3. Rendimento Isoentrópico	31
7.3.4. COP	32
8. Custos	33
8.1. Custos de Fabricação do Tubo de Hilsch	33
8.2. Custos de Operação do Tubo de Hilsch	34
8.3. Comparação de Custos	35
9. Aplicações	38
10. Conclusão	41
11. Referências Bibliográficas	43
12. Anexos	44
Anexo A	44
Anexo B	47
Anexo C	52
Anexo D	57
Anexo E	63

Anexo F	65
Anexo G	87
Anexo H	145
Anexo I	154
Anexo J	168

LISTA DE VARIÁVEIS

A	Área	[m ²]
c _p	Calor específico a pressão cte.	[J/kg.K]
E	Energia	[J]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Entalpia específica	[J/kg]
m	Fluxo de massa	[kg/s]
P	Pressão	[Pa]
Q	Fluxo de Calor	[J/s]
s	Entropia específica	[J/kg.K]
t	tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
V	Velocidade	[m/s]
W	Potencia	[w]
Z	Altitude	[m]

ÍNDICES SUBSCRITOS

e	Entrada
S	Saída
C	Saída Fria
H	Saída Quente
V.C.	Volume de Controle

1 INTRODUÇÃO

O Tubo de Ranque-Hilsch, doravante Tubo de Hilsh, consiste basicamente de um tubo cilíndrico onde ar comprimido é injetado tangencialmente à parede do tubo por um bocal. Dentro do tubo o ar escoar em uma trajetória espiral gerando um vórtice. Cada extremidade do tubo possibilita uma saída para o escoamento.

Na saída mais próxima à entrada, onde o ar consegue sair apenas pela região central (fig. 1), a temperatura do escoamento é inferior à temperatura de entrada. Já na outra saída, mais distante da entrada, o ar somente consegue sair pela periferia do tubo e a temperatura do escoamento é superior a da entrada.

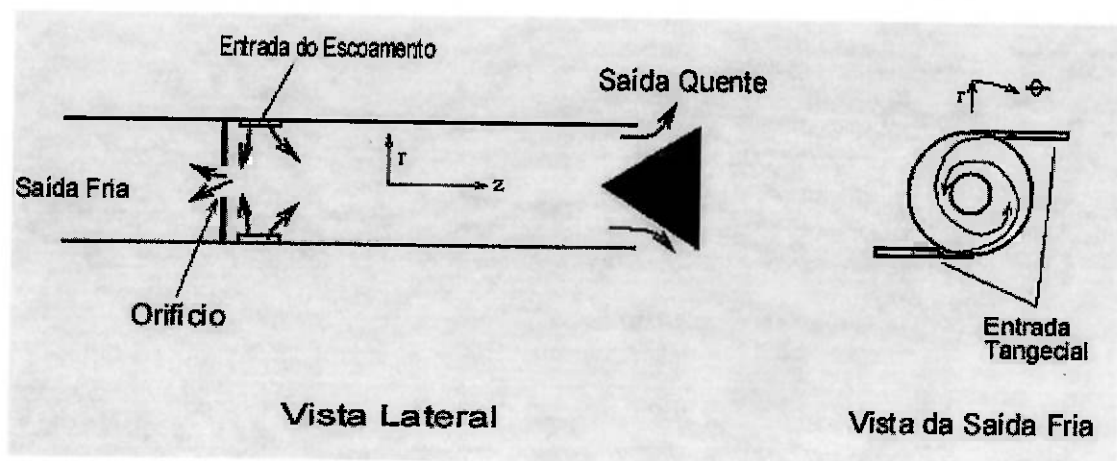


Fig 1: Vista esquemática de um tubo de Hilsch.

2 HISTÓRICO

O primeiro homem que observou os efeitos e fenômenos que aconteciam em um Tubo de Vórtice foi Georges Ranque, físico francês, em meados de 1930. Ele montou uma pequena companhia para explorar o tubo, no entanto, não obteve sucesso e acabou rapidamente por falir.

Ranque, em 1933, apresentou um artigo contendo informações sobre o Tubo de Vórtice na Sociedade Científica na França. Infelizmente não houve interessados neste assunto e poucos acreditaram em sua descoberta. O tubo de vórtice ficou desaparecido por diversos anos, até que em meados da década de quarenta Rudolph Hilsch voltou a estudá-lo e logo publicou seus achados.

Logo, Hilsch começou a gerar um interesse maior que Ranque, talvez porque deveria ser um melhor escritor que Ranque ou por ser mais organizado. O fato foi que os leitores dos artigos de Hilsch acharam que ele havia inventado o aparato, passando a ser popularmente conhecido como “Tubo de Hilsch”. Este fato foi gerado por um erro na datilografia do primeiro artigo de Hilsch que ao se referir ao artigo de Ranque o datou de 1939, quando a data correta seria 1933. Apesar das informações incorretas, muitas pessoas procuraram por mais informações, e à partir disso o conceito do tubo de vórtice ficou mais bem exemplificado para os pesquisadores técnicos.

A partir de então obteve-se um considerável aumento nas pesquisas e publicações deste assunto pelo mundo. Na década de 80 já haviam mais de 100 pesquisadores sérios que estavam escrevendo matérias nos jornais científicos e de engenharia em todo o mundo. Alguns dos artigos e comentários que foram publicados estão em escolas de engenharia, indústrias e em grupos científicos que estariam trabalhando em cima do tubo de vórtice.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão discutidas as leis de termodinâmica e da mecânica dos fluidos aplicadas ao Tubo de Hilsch.

3.1. PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Considerando um volume de controle com “n” entradas e “m” saídas pode-se escrever a primeira lei da termodinâmica conforme a Eq.1.

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum_0^n \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e) - \sum_0^m \dot{m}_s (h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s) \quad (1)$$

Adotando a hipótese de regime permanente a Eq.1 pode ser simplificada para a Eq.2.

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum_0^n \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e) = \sum_0^m \dot{m}_s (h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s) \quad (2)$$

Admite-se que o Tubo de Hilsch é termicamente isolado, ou seja, não troca calor com o meio, e que não existe a realização de trabalho no processo. Ainda adota-se o índice “e” referindo-se às condições de entrada do escoamento, “H” e “S” referindo-se respectivamente às condições de saída do escoamento quente e frio. Com estas hipóteses a primeira lei evolui para a Eq.3 abaixo.

$$\dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e) = \dot{m}_H (h_H + \frac{1}{2} V_H^2 + gZ_H) + \dot{m}_C (h_C + \frac{1}{2} V_C^2 + gZ_C) \quad (3)$$

Por fim, assumi-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.

$$\dot{m}_e . h_e = \dot{m}_H . h_H + \dot{m}_C . h_C \quad (4)$$

A Eq.4 mostra a simplicidade do processo olhado simplesmente como um volume de controle. Esta mostra ainda que, se em uma das saídas a temperatura é inferior à temperatura de entrada, temos que contra balancear com uma saída quente que satisfaça a equação acima.

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 igual para todos os estados, assim a primeira lei é representada pela Eq.5.

$$\dot{m}_e . T_e = \dot{m}_H . T_H + \dot{m}_C . T_C \quad (5)$$

Definindo ainda μ como a fração em massa da saída fria ($\mu = m_C / m_e$) e pela conservação de massa sabe-se que $m_e = m_C + m_H$ pode-se simplificar a Eq.5 para a Eq.6.

$$T_e = (1 - \mu) . T_H + \mu . T_C \quad (6)$$

A Eq.6 será utilizada para comparação entre os dados experimentalmente obtidos e os teoricamente calculados.

3.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

A Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle poder ser escrita de maneira generalizada pela Eq.7.

$$S_{GERADA} + \sum \frac{Q_{V.C.}}{T} = \dot{m} . (s_s - s_e) \quad (7)$$

Como uma primeira aproximação pode-se assumir a hipótese de processo é isoentrópico, ou seja, não ocorre variação da entropia como mostrado na Eq.8.

$$s_e = (1 - \mu).s_H + \mu.s_C \quad (8)$$

Para uma análise um pouco mais correta do fenômeno, assumi-se que o processo não é isoentrópico. Aplicando novamente a Segunda Lei para as condições de Contorno do Tubo de Hilsch chega-se na Eq.9.

$$S_{GERADO} = \dot{m}.(\mu.s_C + (1 - \mu).s_H - s_e) \quad (9)$$

Mais uma vez fazendo a hipótese de gás perfeito, a Eq.9 pode ser simplificada para a Eq.(10)

$$\frac{S_{GERADO}}{\dot{m}.c_p} = \frac{R}{c_p} \cdot \ln\left(\frac{p_e}{p_s}\right) + (1 - \mu) \cdot \ln\left(\frac{T_H}{T_C}\right) \quad (10)$$

3.3 EQUAÇÕES DE NAVIER STOKES

As equações de Navier stokes regem o movimento dos fluidos nas três direções do espaço. Não é objetivo deste trabalho um estudo muito aprofundado do escoamento dentro do interior do Tubo de Hilsch, mas com algumas simplificações pode-se resolver as equações e se chegar em resultados interessantes.

Está-se interessado em uma solução simplificada das equações de Navier Stokes. Segundo Batchelor (1970), se for adotada as hipóteses de escoamento bidimensional, incompressível e com velocidades radiais desprezíveis, a equação do movimento pode

ser escrita segundo duas componentes: uma componente radial, Eq. 11, comumente conhecida como equilíbrio radial simples, e outra componente circunferencial, Eq. 12.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho.V^2}{r} \quad (11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} = V \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} \right) \quad (12)$$

A Eq. 12 pode ser resolvida adicionando a hipótese de que o fluido escoar entre dois cilindros, um de raio r_1 com velocidade angular Ω_1 e outro com raio r_2 e com velocidade angular Ω_2 .

Com estas condições de contorno integra-se a Eq. 12 e chegando então na Eq. 13.

$$V = \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{r_1^{-2} - r_2^{-2}} \right) + r \cdot \left(\frac{\Omega_1 \cdot r_1^2 - \Omega_2 \cdot r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \right) \quad (13)$$

A Eq. 13 representa o movimento do fluido na direção circunferencial (tangencial) de um sistema de coordenadas cilíndricas.

Se forem analisados alguns casos extremos para esta equação chega-se a resultados interessantes.

Primeiramente, se r_2 tender a infinito e Ω_2 tender a zero, obtendo a Eq. 14.

$$V = \frac{r_1^2 \cdot \Omega_1}{r} \quad (14)$$

Esta equação representa o movimento de um vórtice livre, no qual cada partícula move-se com trajetórias circulares e com velocidades variando inversamente proporcional à distância do centro.

Fazendo o extremo oposto, ou seja, r_1 tender a zero e Ω_1 tender a infinito, obtendo a Eq. 15.

$$V = \Omega_2 \cdot r \quad (15)$$

A Eq. 15 representa o movimento de um vórtice forçado. Neste caso, todas as partículas do fluido têm a mesma velocidade angular e o fluido se comporta como um corpo rígido.

Muitos movimentos de vórtice são bem mais complexos que este que foi modelado, envolvendo mecânica dos fluidos compressíveis, velocidades nas três dimensões e outros.

Na prática o que se observa é exatamente o que foi descrito pelas equações anteriores, onde o centro se comporta como um corpo rígido (vórtice forçado) e na periferia um movimento circunferencial mas sem organização. A figura 2, abaixo, mostra esquematicamente como é a variação da velocidade angular em função do raio.

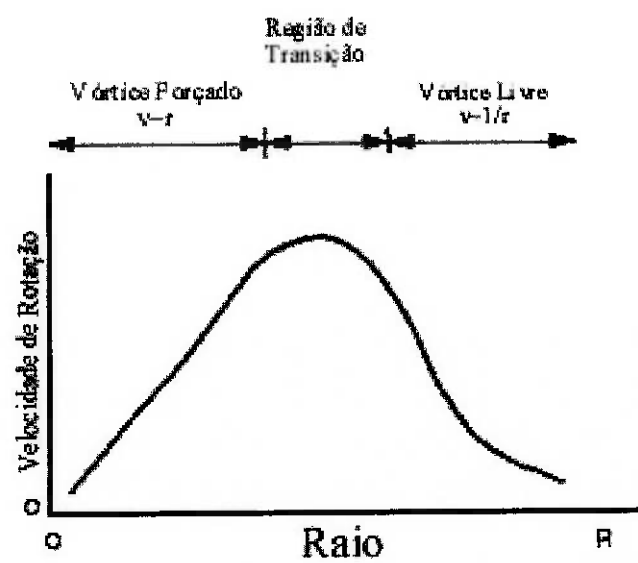


Figura 2: Variação da velocidade angular com o raio

4 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A instalação experimental adotada é relativamente simples, procurou-se ao máximo utilizar-se de equipamentos já disponíveis no Laboratório SISEA (Sistemas Energéticos Alternativos), local onde foram realizados os experimentos.

Para uma abordagem mais organizada, os dispositivos utilizados nos experimentos serão divididos em dois grupos, equipamentos e instrumentos de medição, a fim de caracterizá-los e descrevê-los.

Ainda, os equipamentos serão divididos em dois sub-grupos: o sub-grupo das máquinas que compreende o protótipo do Tubo de Hilsch e o compressor alternativo e o sub-grupo dos instrumentos de controle que envolve as válvulas de controle.

A função de cada equipamento e instrumento é descrita a seguir nos item 4.1 (Instrumentos de Medição), 4.2 (Instrumentos de controle) e 4.3 (Equipamentos). A posição e “Tag” de chamada para cada equipamento pode ser observada no Fluxograma de Engenharia, no Anexo A ao final deste relatório.

4.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Um bom sistema no mundo da engenharia deve possuir instrumentos que mostrem como se comportam parâmetros que influenciam seu desempenho. Nesta seção serão apresentados os instrumentos que foram utilizados neste experimento para medição de algumas grandezas.

4.1.1 Temperatura:

A temperatura foi medida em quatro pontos distintos do sistema: na entrada do tubo de Hilsch, quando o ar ainda está a alta pressão (TE-01), junto à saída quente (TE-02) e à saída fria (TE-03) e por fim a temperatura ambiente de onde estão sendo realizado os ensaios (TE-04).

Todas estas medições foram realizadas com um termopar tipo K e visualizadas com um display digital da marca Instrutherm.

4.1.2 Pressão:

Os locais de interesse para medição de pressão são os mesmos onde foram realizadas as medidas de temperatura: na entrada e saídas do ar e pressão ambiente.

A pressão na entrada do Tubo de Hilsch (ar comprimido) foi medida com um manômetro de diafragma (PI-01) solidário à uma válvula reguladora de pressão (PCV-01). Este manômetro está conectado a jusante do escoamento, ou seja, posteriormente à válvula de controle.

A pressão nas saídas, tanto quente como fria, foram admitidas iguais e igual à pressão ambiente. Para realizar a medida da pressão ambiente foi utilizado um manômetro de coluna de mercúrio (PI-02).

4.1.3 Velocidade:

A velocidade nas saídas do tubo de Hilsch foi medida com o intuito de se calcular posteriormente a vazão mássica em cada saída. A velocidade foi medida com um anemômetro a hélice com display digital (SI-01 e SI-02).

Maiores detalhes sobre os instrumentos de medição, ver folhas de especificação em anexo a este relatório (Anexo D).

4.2 INSTRUMENTOS DE CONTROLE

Um bom sistema para a engenharia deve possuir também mecanismos que possibilitem mudanças nos parâmetros que influenciam seu desempenho, mecanismos estes que chamaremos de dispositivos de controle do sistema.

Os ensaios são controlados basicamente por duas válvulas: uma válvula esfera (VE-01) e uma válvula reguladora de pressão (PCV-01).

A válvula esfera tem função de isolar o sistema de ar comprimido para realização de ajustes.

A jusante da válvula esfera existe uma válvula reguladora de pressão, a qual regula a pressão de entrada no tubo de Hilsch. Esta válvula está equipada com um filtro tipo cesto e com um manômetro conectado à jusante do escoamento.

Informações mais específicas sobre cada uma destas válvulas podem ser encontradas nas folhas de especificação em anexo a este relatório (Anexo D).

4.3 EQUIPAMENTOS

4.3.1 Compressor Alternativo:

O compressor utilizado nos experimentos é o compressor que em tempos passados era utilizada no ciclo Ranquini com vapor de água disponível para estudo no laboratório de máquinas térmicas da Escola Politécnica da USP.

Os dados de placa do compressor são:

Marca: Wayne

Modelo: W2S5960L0

Série: 5238

P_{max}: 7,03 kgf/cm²

4.3.2 Protótipo de Tubo de Hilsch:

A construção de um protótipo do Tubo de Hilsch é um dos pontos principais deste trabalho. Algumas metas foram estabelecidas pelo grupo com relação à construção do protótipo, a saber:

- O protótipo teria que possibilitar uma rápida montagem e desmontagem;
- O protótipo deveria ser suscetível a variações em algumas de suas principais dimensões;
- O protótipo deveria ser resistente ao tempo e robusto quanto a desgaste pela abrasão;
- Utilizar-se ao máximo de materiais facilmente disponíveis no mercado;
- Menor custo final possível.

Estas metas foram estabelecidas para tornar a parte experimental mais fácil de ser realizada e possibilitar um maior detalhamento e mapeamento de condições de funcionamento do Tubo de Hilsch.

Procurando seguir ao máximo estas metas, sem comprometer a qualidade do protótipo e seu princípio de funcionamento, foram construídos dois modelos para realização dos ensaios. Suas principais características e dimensões seguem explicadas no item a seguir.

5 DIMENSIONAMENTO DOS PROTÓTIPOS

5.1 PROTÓTIPO P-01

Para a elaboração do primeiro protótipo foram adotadas as dimensões segundo o Trabalho de Soni e Thomson [06], a fim de se ter uma referência de medidas que possam fornecer resultados satisfatórios. Posteriormente, com os resultados obtidos com este primeiro protótipo, pretende-se fazer modificações a fim de melhorar o desempenho do aparelho.

Algumas modificações foram feitas na forma construtiva do projeto original (sem alterar cotas de interesse) para possibilitar variações em algumas de suas dimensões principais: área de saída quente, área de saída fria e comprimento do tubo quente. Diâmetro do tubo quente, diâmetro do bocal de entrada não podem ser variados. Outros parâmetros como pressão e vazão serão controlados por outros mecanismos.

Este protótipo foi inteiramente construído em materiais metálicos (cobre e latão) e utilizando apenas peças comercialmente disponíveis no mercado, visando o menor custo final do aparelho.

Um dispositivo com dois pequenos flanges e três parafusos tirantes foi desenvolvido para facilitar a montagem e desmontagem do protótipo, prevendo as modificações que seriam feitas em suas dimensões principais. Estas peças tiveram que ser usinadas, mas não entrarão na conta do custo final do aparelho pois estas tem apenas a função de facilitar a realização dos experimentos.

5.1.1 Dados dimensionais do Protótipo P-01

O Protótipo P-01 foi construído com tubos de cobre de diâmetro externo 42mm e uma parede de espessura 1mm.

No lado da saída quente um cap foi utilizado para vedar a região central e foram feitos furos em sua periferia, permitido assim o escoamento.

A entrada tangencial e saída fria foram construídas à partir de uma luva conectada de um lado ao tubo quente e do outro a uma redução concêntrica de 42mm para 15mm de diâmetro interno. O diâmetro do bocal de entrada de ar comprimido é de 6mm. A área da saída fria é alterada encaixando-se espigões de diferentes diâmetros na redução concêntrica.

Os desenhos do protótipo P-01 encontram-se no Anexo B ao final deste relatório. Os principais dados dimensionais do protótipo podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dimensionais do Protótipo P-01

Protótipo	P - 01
Diâmetro do Tubo quente	42mm
Diâmetro da entrada	6mm
Área da saída quente	508 mm ² (nominal)
Área da saída fria	176,7 mm ² (nominal)
Comprimentos do tubo quente	400, 300 e 200 mm

O Protótipo P-01 pronto pode ser observado na Figura 3 abaixo.

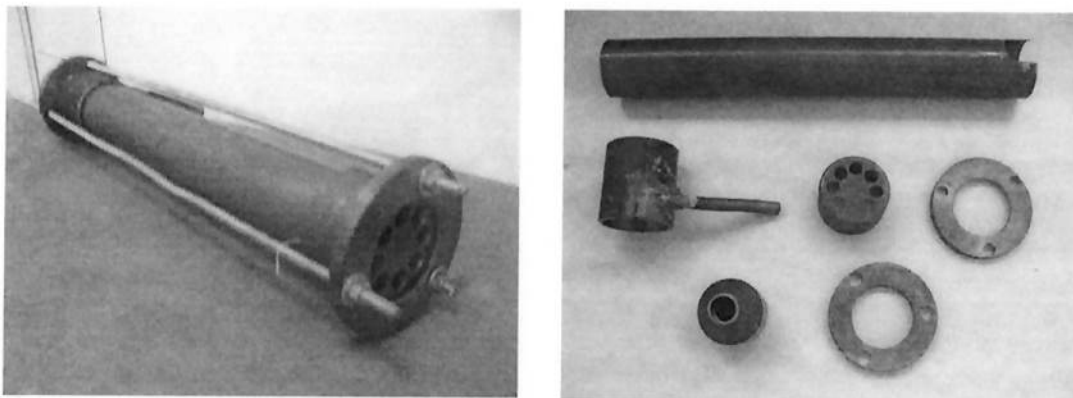


Figura 3 – Protótipo P-01

Os resultados dos experimentos com o Protótipo P-01 se encontram no Item Dados Experimentais deste relatório.

5.1.2 Problemas de construção do Protótipo P-01

Alguns problemas foram detectados na parte construtiva do Tubo de Hilsch que devem ser melhorados, quais sejam:

-A entrada tangencial possui um degrau em sua concordância com a luva, fazendo com que haja perturbações desnecessárias ao escoamento. Ainda, pelo fato de ter-se aproveitado uma luva comercial para fazer a entrada tangencial, teve-se que fazer um rasgo no tubo quente (ver figura 4), caso contrário o ar não entraria no mesmo. Este rasgo também prejudica o escoamento.

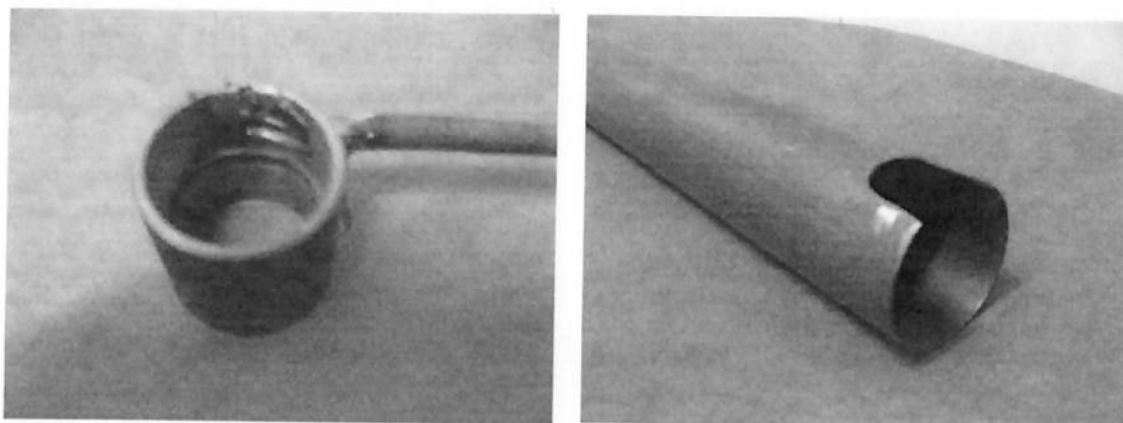


Figura 4 – Entrada tangencial e rasgo no Tubo Quente

-O fato de o protótipo ter sido construído em materiais metálicos dificultou a realização de acabamentos mais finos em algumas regiões onde o escoamento não poderia sofrer perturbações.

A demais, o processo de construção e montagem do Protótipo P-01 ocorreu sem problemas.

5.2 PROTÓTIPO P-02:

O protótipo P-02 foi construído com o objetivo de melhorar o desempenho do Tubo de Hilsch. Foi elaborado um novo projeto visando solucionar problemas obtidos na construção do Protótipo P-01 e também realizadas melhorias no seu design, que o grupo acredita que possam trazer benefícios para o funcionamento do aparelho.

Nos Itens a seguir são explicadas as modificações que foram realizadas para este novo projeto e também todos os dados referentes a este novo protótipo.

5.2.1 Modificações realizadas:

Após ter ensaiado o protótipo P-01 e analisado os resultados obtidos foram elaboradas modificações que visam o melhor desempenho do Tubo de Hilsch. As modificações realizadas entre o protótipo P-01 e P-02 estão abaixo listadas.

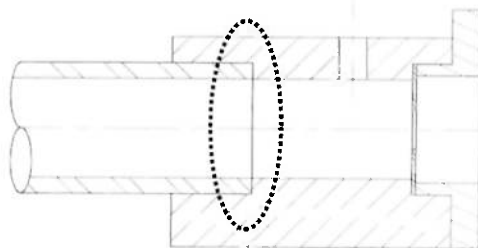
A- Material: O material de fabricação do Tubo de Hilsch foi trocado de metálico para plástico (PVC e Nylon). Esta troca se deve a elevada condução de calor que estava ocorrendo pelas paredes do Tubo. Construindo agora o protótipo com material de baixa condutividade espera-se que o escoamento não troque muito calor com as paredes e com o exterior. Ainda, tomou-se o cuidado de se observar a resistência dos materiais utilizados à alta pressão, uma vez que em algumas partes esta pode chegar até a 4,0 bar.

B- Comprimento: Verificou-se que o comprimento do tubo quente tem grande influência no desempenho do Tubo de Hilsch, desta forma decidiu-se aumentar a quantidade de comprimentos de tubos para realização de ensaios.

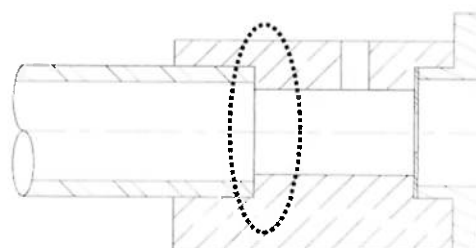
C- Diâmetro interno: O diâmetro interno do tubo quente foi diminuído tomando como referencia artigos mais recentemente publicados (Brodyansky [1994] e Piralishvili [1996]).

D- A peça que contém a entrada tangencial foi usinada para garantir dois aspectos importantes com relação à distúrbios no escoamento:

=> Equalização do diâmetro interno desta peça com o diâmetro interno do tubo quente, deste modo o escoamento não encontrará nenhum “degrau”, descontinuidade, que afete seu perfil de velocidade (Fig 5);



CERTO



ERRADO

Figura 5 – Modo correto de construção do acoplamento do tubo quente

=> Fazer com que a entrada de ar comprimido seja o mais tangencial possível ao diâmetro interno da peça, evitando ressalto que causem distúrbios ao escoamento (Fig 6).

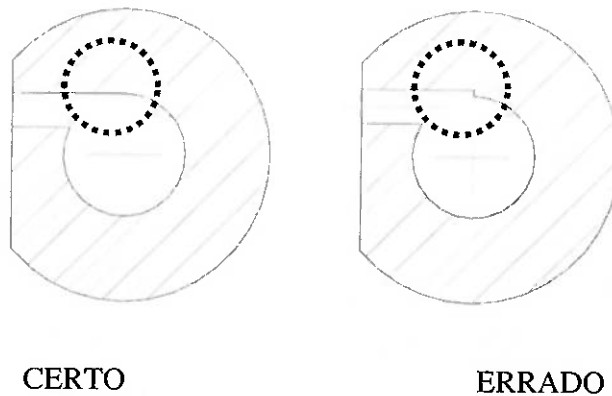


Figura 6 – Modo correto de se construir a entrada tangencial ao Tubo de Hilsch

E- O protótipo foi construído inteiramente com extremidades que possibilitam o encaixe uma na outra, facilitando assim, ainda mais, a montagem e desmontagem e diminuindo o número total de peças do protótipo.

5.2.2 Dados dimensionais do protótipo P-02:

O protótipo P-02 foi construído com tubos de PVC de 1" de diâmetro nominal (diâmetro externo de 33,0mm e interno de 25,0mm).

Mais uma vez foi utilizado um cap para vedar a região central da saída quente.

A peça que contém a entrada tangencial e a saída fria foi usinada e possui um comprimento de 70mm. A saída fria é ajustada por “bolachas” de polipropileno que tem diâmetros diversificados e são presas à peça central por um flange.

Os desenhos do Protótipo P-02 encontram-se no Anexo C ao final deste relatório. Os principais dados dimensionais do Protótipo P-02 pode ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados dimensionais do Protótipo P-02

Protótipo	P-02
Diâmetro do Tubo quente	1" ($\varnothing_e=33,0$ mm)
Diâmetro da entrada	6 mm
Área da saída quente	157,1 mm ² (nominal)
Área da saída fria	38,5 mm ² (nominal)
Comprimentos do tubo quente	500, 400, 300 e 200 mm

O Protótipo P-02 pronto pode ser observado na Figura 7 abaixo.

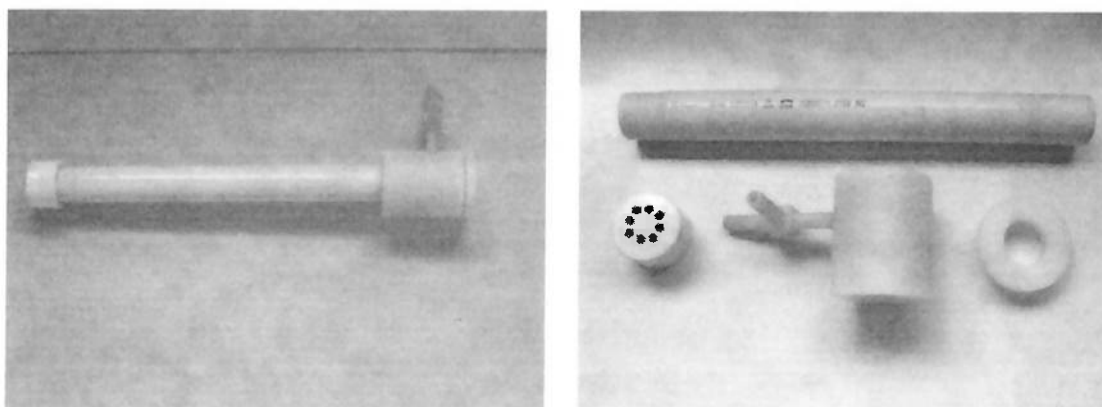


Figura 7 – Protótipo P-02

Os resultados dos experimentos com o Protótipo P-02 se encontram no Item Dados Experimentais deste relatório.

6 COLETA DE DADOS

Em cada experimento foram realizadas medições de grandezas físicas para caracterização do equipamento. Neste item serão mostrados os pontos onde foram realizadas as medições e o procedimento seguido em cada experimento.

6.1 FLUXOGRAMA DE ENGENHARIA

O fluxograma de engenharia do processo é uma ferramenta que auxilia a visualização do sistema como um todo, ou seja, com ele fica mais fácil compreender a iteração que existe entre os instrumentos de controle, de medição e o sistema propriamente dito.

O fluxograma de engenharia proposto pelo grupo segue em anexo, ao final deste relatório (Anexo A).

6.2 PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS

A seguir serão especificados os procedimentos que foram utilizados para realização dos ensaios experimentais. Estas medidas foram adotadas na tentativa de minimizar os erros que podem ocorrer durante o experimento e também para que o experimento real se aproxime ao máximo do modelo matemático elaborado para o processo.

6.2.1 Preparação Inicial:

Escolhida a configuração a ser testada, ela deve ser montada e primeiramente testada quanto a vazamentos. Verificar também as conexões da tubulação quanto a vazamentos.

O compressor deve permanecer ligado por no mínimo 8 minutos, com suas válvulas de saída fechadas antes da realização do experimento.

Tendo seguido os passos acima pode-se iniciar o ensaio.

6.2.2 Realização do Ensaio:

Com o protótipo pronto se inicia o ensaio abrindo a válvula esfera (VE-01) que isola o sistema.

Ajustar a pressão de entrada desejada com a válvula reguladora de pressão (PCV-01).

Tendo ajustado a pressão, esperar alguns segundos para o sistema entrar em regime e então realizar as medições.

É muito importante que todo este procedimento experimental não dure mais que 1 minuto e 30 segundos para que a variação de pressão do cilindro do compressor não afete as medições.

É importante também que antes de se iniciar um novo ensaio, mesmo que seja com a mesma configuração, sejam respeitados novamente todos os procedimentos anteriormente descritos.

6.3 MANIPULAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

Para avaliação do desempenho do Tubo de Hilsch nas diferentes configurações ensaiadas foi necessário o cálculo de algumas propriedades termodinâmicas e definição de alguns parâmetros. A descrição de todos os parâmetros calculados e procedimentos para tal segue abaixo.

6.3.1 Densidade:

A densidade do ar será calculada em três pontos diferentes: nas saídas quente e fria e logo na entrada do Tubo de Hilsch. O cálculo será feito admitindo o ar como gás perfeito através da Eq. 16.

$$P.V = nRT \Rightarrow \rho = \frac{P}{R.T}, \text{ com } R=0,287 \text{ kJ/kg.k} \quad (16)$$

As entradas para esta equação são temperatura e pressão que serão medidas respectivamente em cada ponto.

A densidade será utilizada no cálculo da vazão mássica.

6.3.2 Vazão:

As vazões (entrada e duas saídas) serão calculadas pela velocidade medida nas saídas.

Vazão volumétrica pode ser definida pela Eq. 17.

$$\dot{m} = v.A \quad (17)$$

As duas variáveis que são velocidade e área serão medidas experimentalmente.

Esta equação será aplicada para as duas saídas.

A vazão mássica será obtida multiplicando a densidade, anteriormente calculada, pela respectiva vazão volumétrica.

A vazão mássica na entrada será a soma das vazões das saídas, pela conservação de massa e entrará no cálculo da primeira e segunda leis da termodinâmica.

6.3.3 Primeira Lei da Termodinâmica:

Como descrito no Item 3.1 deste relatório, a Primeira Lei da Termodinâmica para o Tubo de Hilsch pode ser representada pela Eq. 6.

$$T_e = (1 - \mu).T_H + \mu.T_C \quad (6)$$

Esta equação permite calcular a temperatura de umas das saídas, dispondo da temperatura na outra saída, da temperatura de entrada e da porcentagem da vazão que sai em cada saída.

A Primeira Lei será aplicada duas vezes, a primeira admitindo que as temperaturas de entrada e da saída fria medidas são verdadeiras, assim calcula-se a temperatura da saída quente para ser comparada com a temperatura experimentalmente medida.

Posteriormente será aplicada novamente a primeira lei, mas desta vez admitindo como verdadeiras as temperaturas de entrada e da saída quente, deste modo, calcula-se a temperatura da saída fria e compara-se com a temperatura experimentalmente obtida. Estes dois casos são representados pelas Eqs. 18 e 19 respectivamente.

$$T_H = \frac{T_e - \mu.T_C}{(1 - \mu)} \quad (18)$$

$$T_C = \frac{T_e - (1 - \mu).T_H}{\mu} \quad (19)$$

A comparação entre a temperatura teoricamente calculada e a experimentalmente obtida será denominada DT, definida pela Eq. 20.

$$DT = \left| T_{EXPERIMENTAL} - T_{CALCULADO} \right| \quad (20)$$

6.3.4 Segunda Lei da Termodinâmica:

A Segunda Lei da Termodinâmica será aplicada para quantificar o afastamento do processo real para o processo isentrópico ideal.

A Segunda Lei da Termodinâmica para um processo isentrópico para o Tubo de Hilsch foi deduzida no Item 3.2 deste relatório e é representada pela Eq. 8.

$$s_e = (1 - \mu).s_H + \mu.s_C \quad (8)$$

As entropias para cada estado (entrada e saídas) serão calculadas admitido mais uma vez o ar como gás perfeito. Não existe uma equação que calcula a entropia diretamente mas sim a Eq. 21 que calcula a variação de entropia entre dois estados quaisquer 1 e 2.

$$s_2 - s_1 = (s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0) - R.\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (21)$$

onde S_T^0 é definido pela Eq. 22.

$$s_T^0 = \int_{T_0}^T \frac{c_{p0}}{T} dT \quad (22)$$

Essa função (S_T^0) é comumente apresentada em tabelas para gás perfeito, com uma única entrada (temperatura). Para sistematizar o processo, os dados desta tabela foram aproximados por uma curva entre as temperaturas de interesse (240 à 340K). A curva que melhor se adaptou aos pontos é representada pela Eq. 23.

$$S_T^0 = -6.10^{-6}.T^2 + 0,069.T + 5,3213 \quad (23)$$

Os valores de S_T^0 e a curva de ajuste seguem em anexo ao final deste relatório (Anexo E).

Por fim define-se um estado de referência em que o valor de S_T^0 e da entropia são conhecidos, assim a entropia no estado de interesse poderá ser calculada pela Eq. 24.

$$s = s_{ref} + (s_T^0 - s_{ref}^0) - R \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \quad (24)$$

A eficiência isoentrópica para o Tubo de Hilsch será definida pela Eq. 25.

$$\eta_{ISE} = \frac{(1 - \mu).s_{HOT} + \mu.s_{COLD}}{s_{IN}} \quad (25)$$

O processo seria considerado isoentrópico se η_{ise} fosse igual a um (1). Quanto mais η_{ise} se afasta de 1 o processo vai se tornando cada vez mais ineficiente.

6.3.5 COP (Coeficiente de Desempenho)

A “eficiência” de um equipamento de refrigeração é expressa em termos do coeficiente de desempenho (COP) ou chamado também de coeficiente de eficácia. O cálculo do COP é dado pelo calor transferido do espaço refrigerado sobre a energia gasta.

Para fazer uma comparação do tubo de Hilsch com outros equipamentos de refrigeração e também para ter-se uma idéia do rendimento global do aparelho defini-se o COP para o Tubo de Hilsch pela Eq. 26.

$$COP = \frac{Q_c}{W_{cp}} \quad (26)$$

onde W_{cp} é o trabalho do compressor e Q_c é a quantidade de calor referente à diferença de temperaturas entre a entrada e a saída fria.

O COP será calculado de duas maneiras distintas: a primeira adotando a hipótese de compressor isoentrópico, com sua potência definida pela Eq. 27, e posteriormente alterando a hipótese para compressor isotérmico, com a potência calculada pela Eq. 28.

$$W_{ise} = RT \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (27)$$

$$W_{isotermico} = RT \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (28)$$

Onde 1 é o estado de entrada e 2 o estado de saída do compressor.

6.3.6 Expansão Isoentrópica:

Uma verificação interessante para este processo é compará-lo com a diferença de temperatura que conseguiria-se se fosse possível realizar uma expansão isoentrópica da pressão de entrada do Tubo de Hilsch até a pressão ambiente.

Teoricamente, esta é a maior diferença de Temperatura que se conseguiria sem a adição de qualquer tipo de energia ao escoamento.

Esta variação de temperatura será calculada através de tabelas termodinâmicas e será comparada com o Tubo de Hilsch pela relação da Eq. 29.

7 RESULTADOS OBTIDOS

7.1 PROTÓTIPO P-01

Os ensaios com o protótipo P-01 foram realizados com pressões entre 1 e 3kgf/cm² (manométrica). Os comprimentos do tubo quente ensaiados foram 400 e 300mm. As áreas de saída quente ensaiadas foram: 127,23 e 190,85 mm². A área de saída fria foi mantida constante em 176,7mm².

Os dados numéricos destes ensaios encontram-se no Anexo F ao final deste relatório.

7.2 PROTÓTIPO P-02

Os ensaios com o protótipo P-02 foram realizados com pressões entre 1 e 3kgf/cm² (manométrica). Os comprimentos do tubo quente ensaiados foram 500, 400, 300 e 200mm. As áreas de saída quente ensaiadas foram: 39,3; 58,9 e 78,5 mm². A área de saída fria foi mantida constante em 38,5mm².

Os dados numéricos destes ensaios encontram-se no Anexo G ao final deste relatório.

7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Todos os gráficos que serão comentados nesta seção são apresentados nos anexos H e I deste relatório para uma melhor visualização dos mesmos.

7.3.1 Diferença de Temperatura

Todos os experimentos mostram que quanto maior a pressão de entrada, maior a diferença de temperatura na saída fria, independentemente da relação de áreas, logo, maior a diferença de temperatura quente também.

Observou-se uma grande melhora neste parâmetro entre os protótipos P-01 e P-02. Se forem observados os resultados dos dois protótipos para condições semelhantes de operação será notado que para todas as condições a diferença de temperatura proporcionada pelo protótipo P-02 é maior que a do P-01.

Para ambos os protótipos verificou-se uma grande influencia do comprimento do tubo quente. Para o protótipo P-02 pode verificar-se que tubos muito longos ou muito curtos não apresentam bons resultados. Para os experimentos realizados o meio termo é um comprimento de 300 mm, com o qual se obtém os melhores resultados.

7.3.2 Afastamento da Primeira Lei

Observa-se bons resultados para a maioria dos ensaios. Em poucos pontos a diferença é maior que 10 °C. Estes dados mostram que os experimentos seguem a primeira lei da termodinâmica, uma vez que esta diferença pode ser atribuída a erros experimentais.

7.3.3 Rendimento Isoentrópico

O rendimento isoentrópico para os dois protótipos não é menor que 92%, validando assim a hipótese de escoamento isoentrópico.

7.3.4 COP

Os valores do COP para o Tubo de Hilsch são extremamente baixos se comparados com alguns outros sistemas de refrigeração. Um COP muito baixo faz com que sua utilização seja bem restrita, uma vez que o rendimento é um parametro de extrema importância para a implementação de um sistema.

Entretanto, se comparado com equipamentos do tipo ciclo de absorção, o COP do tubo de Hilsh não é tão baixo uma vez que o COP para este tipo de ciclo encontra-se atualmente na faixa de 0,5.

8 CUSTOS

É interessante saber a viabilidade de utilização do Tubo de Hilsch em algumas aplicações mais específicas, para tanto faremos algumas comparações de custos de compra e operação com equipamentos de refrigeração comercialmente disponíveis.

8.1 CUSTOS DE FABRICAÇÃO DO TUBO DE HILSCH

Primeiramente vamos avaliar qual foi o custo de fabricação dos protótipos. Neste momento não levaremos em conta eventuais diminuições de custo para uma produção em maior escala.

Tabela (01) – Custo de fabricação do protótipo P-01

Descrição	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Cap de Latão para tudo de $\varnothing 42,0\text{mm}$	1 unidade	10,00 / unidade	10,00
Redução de Latão $\varnothing 15,0 \times \varnothing 42,0$	1 unidade	9,50 / unidade	9,50
Luva de Latão para Tubo de $\varnothing 42,0\text{mm}$	1 unidade	13,20 / unidade	13,20
Tubo de cobre $\varnothing 42,0$	500mm	10,30 / m	5,15
Tubo de Cobre $\varnothing 6,0$	60mm	6,00 / m	0,36
Usinagem (fresa + solda)	20 min	100/hora	33,34
TOTAL			71,55

Tabela (02) – Custo de fabricação do protótipo P-02

Descrição	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Tarugo de Nylon (ø80,0mm)	150mm	12,00/m	1,80
Tubo de PVC 1"	0,5m	5,00/m	2,50
Cap de PVC 1"	1 unidade	1,20/unidade	1,20
T em nylon	1 unidade	1,00/unidade	1,00
Usinagem	30 minutos	70,00/hora	35,00
TOTAL			41,50

8.2 CUSTOS DE OPERAÇÃO DO TUBO DE HILSCH

Os custos operação do Tubo de Hilsch estão associados a compressão do ar.

Se este ar comprimido estiver sendo rejeitado por um outro processo, este custo pode ser considerado nulo, sendo então a aplicação do tubo de Hilsch totalmente viável, independentemente do pequeno rendimento do mesmo. Deve-se apenas verificar se a variação de temperatura que o consumidor necessita é atendida pela que o Tubo de Hilsch pode fornecer.

Caso o ar comprimido seja fornecido por um compressor, a energia gasta pode ser calculada pela primeira lei da termodinâmica pela Eq (30).

$$W = \dot{m}(h_{saída} - h_{entrada}) \quad (30)$$

Pode-se assumir, da mesma maneira quando o COP foi calculado, que o compressor é isoentropico, assim a potência de compressão pode ser representada pela Eq. 28 anteriormente apresentada.

$$W_{ise} = RT \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (28)$$

Para uma carga térmica de 10.000 BTU/h (2,93 kW), necessitamos de uma vazão na entrada de aproximadamente 0,1106 kg/s, logo a potência necessária para comprimir o ar, neste caso, será de 15,87 kW.

Admitindo um rendimento isoentrópico do compressor de 92%, e um rendimento mecânico de 98%, temos que o consumo do compressor será 17,6 kW.

(Estes dados foram calculados para situação de maior COP do tubo de Hilsh).

8.3 COMPARAÇÃO DE CUSTOS

Para fazer uma comparação de custos, escolheu-se estudar um equipamento de ar condicionado domiciliar que é um equipamento de refrigeração compacto e com grande disponibilidade no mercado.

Foram encolhidos dois modelos de marcas de renome para realização desta comparação. As características de ambos os modelos são apresentadas nas Tabelas 03 e 04 a seguir.

Tabela 03 – Características do aparelho de ar condicionado marca BOSCH

Marca	BOSCH
Modelo	CCC10ABANA
Capacidade de Refrigeração	9.900 BTU/h
Tensão	127 V
Frequência	60 Hz
Consumo	935 W
Corrente	8,2 A
Vazão de Ar	540 m3/h
Compressor	Rotativo
Dimensões	400 x 660 x 710 mm
Peso	38 kg
Custo	

Tabela 04 – Características do aparelho de ar condicionado marca Brastemp

Marca	Branstemp
Modelo	BCG10A
Capacidade de Refrigeração	10.000 BTU/h
Tensão	110V
Frequência	60 Hz
Consumo	950 W
Corrente	8 A
Vazão de Ar	520 m3/h
Compressor	Rotativo
Dimensões	400 x 660 x 705 mm
Peso	47 kg
Custo	

Para os aparelhos de ar condicionado, o COP é a relação direta entre a capacidade de refrigeração e o consumo, assim como na Eq. 30.

$$COP = \frac{\text{Capacidade_de_refrigeração}}{\text{Consumo}} \quad (30)$$

Sendo assim, para o Modelo da Bosch o COP calculado é 3,10 e para o modelo da Brastemp é 3,08; ambos muito superiores aos valores obtidos com o Tubo de Hilsch. Isto demonstra que apesar da simplicidade do Tubo, seu rendimento comparativo com outros aparelhos é muito baixo.

O consumo dos aparelhos de ar condicionado também é menor que o consumo energético do compressor. Isto mostra mais uma vez que o rendimento energético do Tubo de Hilsch é pequeno e tem sua utilização restringida a aplicações específicas.

9 APLICAÇÕES

Existem algumas aplicações em que o Tubo de Hilsch já vem sendo usado a algum tempo e tem mostrados bons resultados devido as suas características. Abaixo estão listadas algumas das aplicações em que o Tubo de Hilsch vem sendo empregado com sucesso.

A. Coletes de resfriamento: em algumas operários são obrigados a usar coletes que refrigeram a pele, como em algumas minas por exemplo (figura 8). Neste caso, o colete vem equipado com o Tubo de Hilsch, e o ar comprimido é retirado das linhas já existentes, uma vez que muitos equipamentos utilizados são pneumáticos.

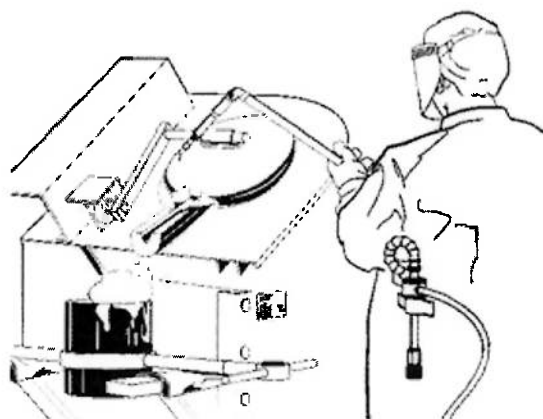


Figura 8 – Aplicação do Tubo de Hilsch em colete de resfriamento.

B. Caixa de Força: refrigeração de caixas onde existem equipamentos elétricos em geral. Neste caso o Tubo de Hilsch se torna prático por ser uma refrigeração de baixa capacidade térmica e pontual.

C. Refrigeração de máquinas: muitas máquinas pneumáticas já utilizam o Tubo de Hilsch para resfriamento (figura 9).

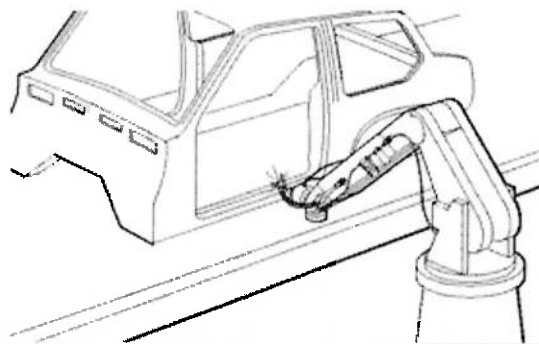


Figura 9 – Tubo de Hilsch utilizado para refrigeração de máquinas pneumáticas

D. Consultório dentário: o Tubo de Hilsch é utilizado no consultório dentário para resfriamento pontual do dente quando raspado pela broca. O compressor já é disponível, uma vez que alguns equipamentos dentários são pneumáticos. Esta é uma aplicação que ainda está em estudo, mas até então uma pesquisa mostrou que com a utilização do resfriamento na ponta da broca os pacientes tem sentido menos dor durante o tratamento.

E. Refrigeração de Ambientes: até então o Tubo de Hilsch tem grande aplicabilidade para refrigeração de ambientes grandes, uma vez que começa a se tornar inviável e não prático grandes vazões de ar comprimido. No entanto existem empresas que utilizam o Tubo de Hilsch com este propósito mas não existem dados disponíveis sobre suas condições de funcionamento.

F. Refrigeração de peças: no lugar de se utilizar fluidos refrigerantes quando usinando peças, começou-se a empregar o Tubo de Hilsch para uma refrigeração pontual da ponta da ferramenta e do local que esta sendo usinado (figura 10). Esta aplicação ainda não é muito difundida pois o Tubo de Hilsch não possui todas as características que o fluido refrigerante proporciona.

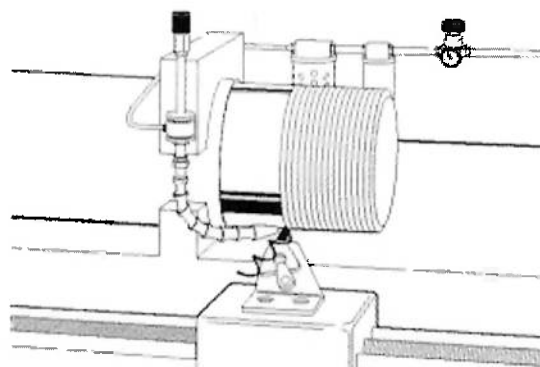


Figura 10 – Tubo de Hilsch utilizada no lugar de um fluido de resfriamento.

10 CONCLUSÃO

Se por um lado o Tubo de Hilsch apresenta excelentes vantagens em sua utilização, tais como facilidade de montagem e utilização, não apresenta partes móveis, leve e não requer instalação elétrica; por outro ele possui características que tornam sua utilização pouco difundida como COP extremamente baixo, baixa vazão de ar frio e barulho.

Atualmente, existe sempre uma busca no sentido do maior rendimento possível das máquinas visando sempre um menor consumo energético e por consequência um menor custo de operação. Este é um dos principais motivos do esquecimento do Tubo de Hilsch ao longo do tempo, pois seu COP baixo (em média de 0,04) não consegue competir com, por exemplo, equipamentos de ar condicionado doméstico onde o COP deste tipo de aparelho situa-se em torno de 3.

Devido a estas características o Tubo de Hilsch tem sua aplicação em situações específicas onde se faz necessário, por exemplo, uma refrigeração pontual ou temperaturas extremamente baixas, nas quais os compressores tem problemas com lubrificação ou são necessários dois ciclos de refrigeração em série. Outras aplicações interessantes são em instalações onde a máquina compressora já está disponível e não se quer fazer investimentos para a instalação de máquinas de refrigeração.

Com relação aos ensaios, os resultados foram satisfatórios, validando as conclusões acima e reproduzindo-se com sucesso experimentos já realizados por outros pesquisadores.

A evolução obtida com o segundo protótipo mostrou que quanto menos distúrbios o escoamento for exposto, melhor o desempenho do aparelho. Desta forma acredita-se que com auxílio das simulações numéricas, pode-se chegar a geometrias mais interessantes que auxiliem a aumentar o desempenho do Tubo de Hilsch.

Devido a todas estas características, ainda existe um campo grande para o estudo de novas aplicações e de novas geometrias para o Tubo de Hilsch que possibilitem um maior conhecimento e entendimento do fenômeno a fim de tornar o Tubo de Hilsch um equipamento mais conhecido e difundido no campo acadêmico e industrial.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

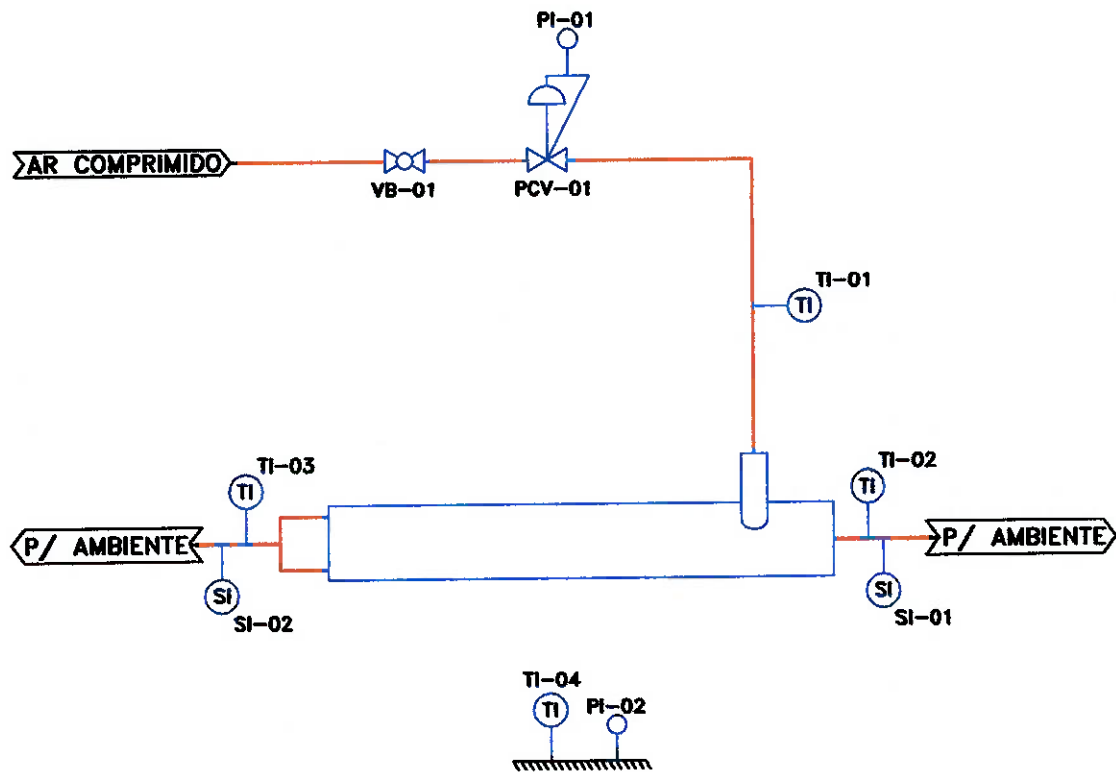
- [1] Batchelor, G. K., 1970, An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press.
- [2] Brodyansky, V. M. e outros, 1994, The Efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization, Elsevier publication.
- [3] Choi, H. Z., Lee, S. W. e Jeong, H.D., 2001, A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel, Journal of Materials Processing Technology.
- [4] Fox, R.W., McDonald, A. T.; Introdução à Mecânica dos Fluidos, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.
- [5] Lewins, J., Bejan, A., Vortex tube Optimization Theory, International journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 931-943.
- [6] Piralishvili, Sh. A., 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.
- [7] Soni, Y., Thomson, W. J., Optimal design of the Ranque Hilsch Vortex tube, Journal of Heat Transfer, págs 316-317, maio de 1975.
- [8] Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., Borgnakke, G., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blucher, 5ª edição, São Paulo 1998.
- [9] Unger, W. F., Numerical Investigation of the Compressible flow and energy separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube, International journal of heat and mass Transfer, 1999, 415-422.
- [10] Wood, B. D., Applications of Thermodynamics, Waveland press, Illinois, 1991.

12 ANEXOS

Lista de Anexos:

- Anexo A: Fluxograma de Engenharia
- Anexo B: Desenhos do Protótipo P-01
- Anexo C: Desenhos do Protótipo P-02
- Anexo D: Folhas de Especificação
- Anexo E: Ajuste de Curva de S^0_T
- Anexo F: Dados Experimentais do Protótipo P-01
- Anexo G: Dados Experimentais do Protótipo P-02
- Anexo H: Gráficos do Protótipo P-01
- Anexo I: Gráficos do Protótipo P-02
- Anexo J: Artigo Técnico

REVISÃO	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	-				
NOME	-				



SI-02	ANEMOMETRO	01	FE-05
SI-01	ANEMOMETRO	01	FE-05
PI-02	MANOMETRO	01	FE-04
PI-01	MANOMETRO	01	FE-02
TE-04	TERMOMETRO	01	FE-03
TE-03	TERMOMETRO	01	FE-03
TE-02	TERMOMETRO	01	FE-03
TE-01	TERMOMETRO	01	FE-03
PCV-01	VALVULA REGULADORA DE PRESSÃO	01	FE-02
VE-01	VALVULA ESFERA	01	FE-01
PDS.	DENOMINAÇÃO	QUANT.	VER DES./FE N°

TÍTULO: ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH

FOLHA:	A4	NOMES:	
DATA:			
REVISÃO:	X		BORIS ROTTER
VISTO:			MÁRCIO STASCHOWER

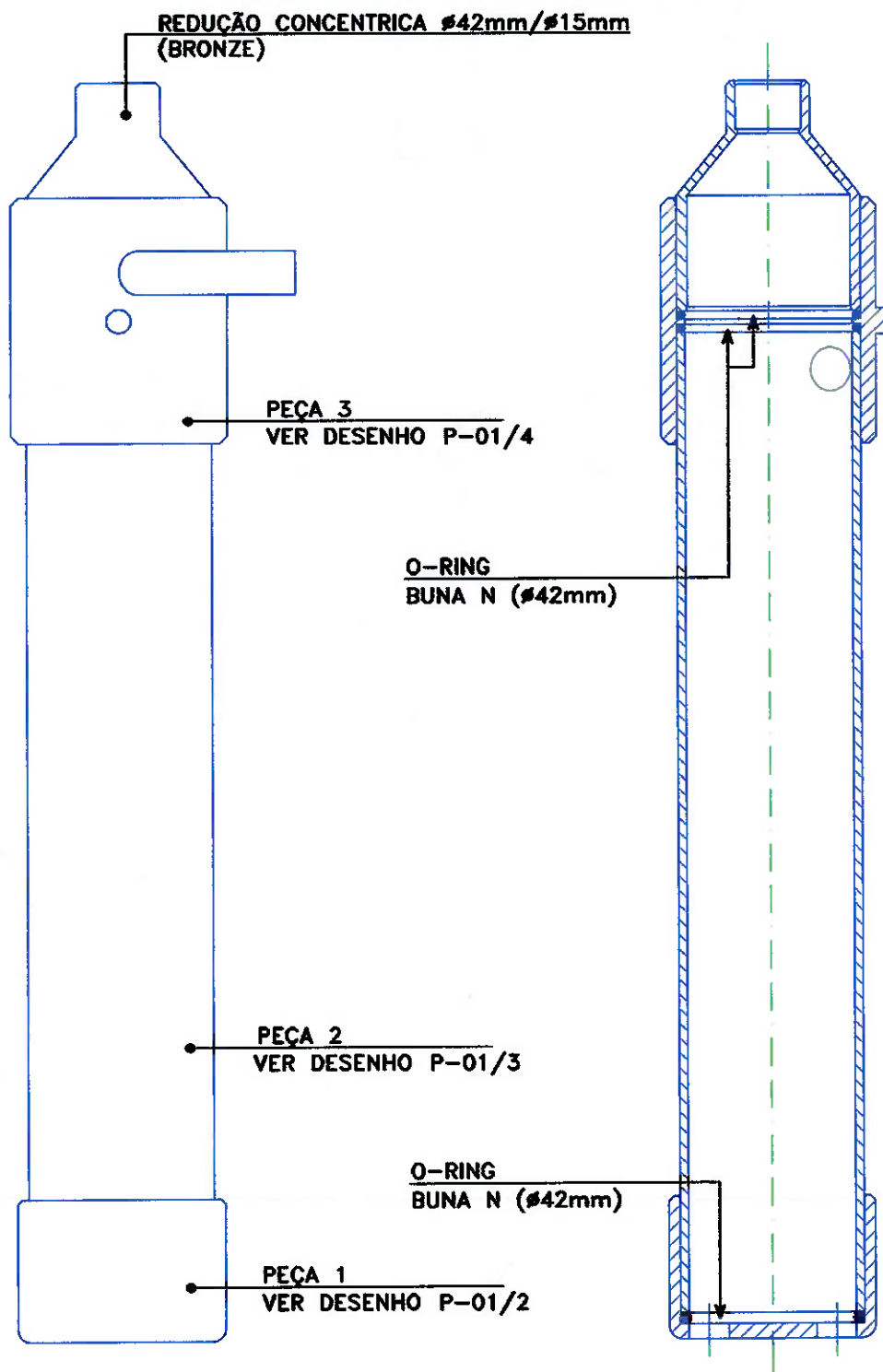
ESCALA: FLUXOGRAMA DE ENGENHARIA
S/E X

DISCIPLINA: PME-2598
DESENHO:



ANEXO B: DESENHOS DO PROTÓTIPO P-01

REVISÃO	1	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	-					
NOME	-					



NOTAS:

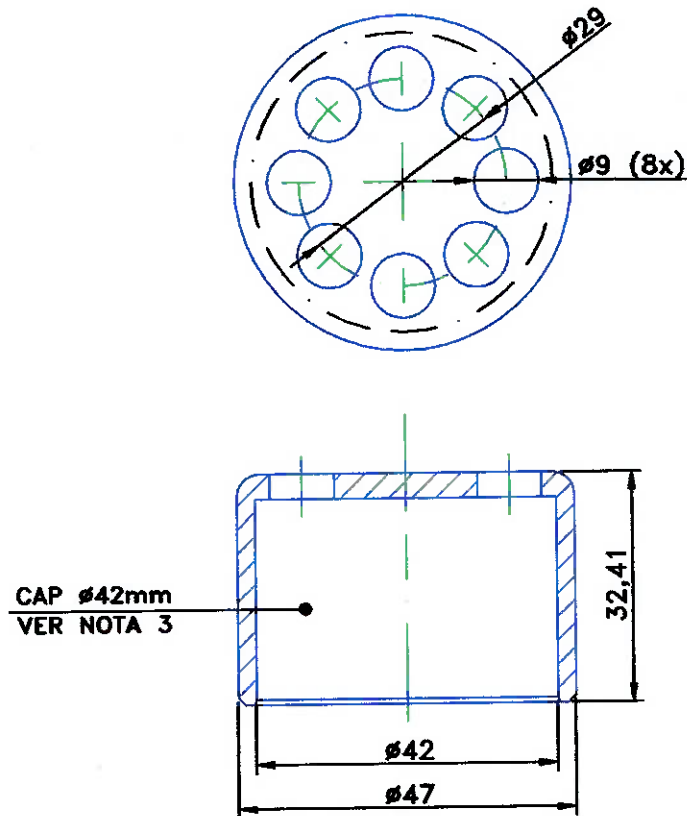
- 1- DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA;
2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-01/2, /3 E /4.

ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH			
FOLHA:	A4	AUTORES: BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	
DATA:	04.05.03		
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	1:1.5	TUBO DE HILSCH DESENHO DE CONJUNTO PROTÓTIPO P-01	DISCIPLINA: PME-2598 DESENHO: P-01/1

REVISÃO	1	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	-					
NOME	-					

PEÇA 1

MATERIAL: LATÃO
QUANT.: 1 UNIDADE

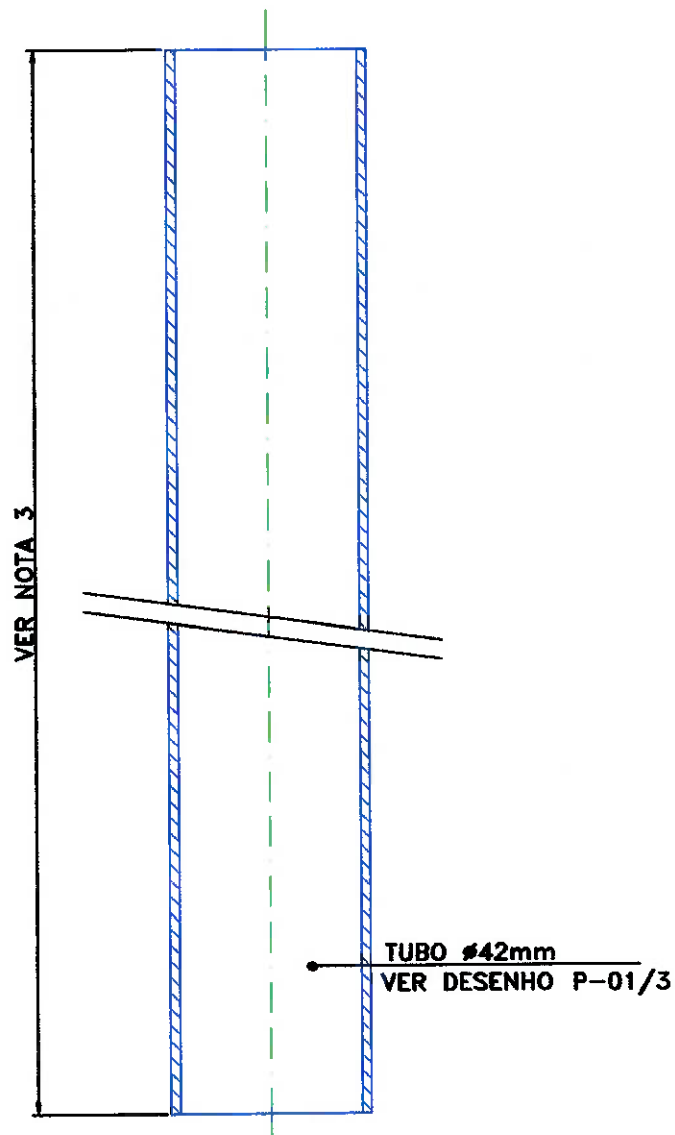


NOTAS:

- 1- DIMENSÕES EM mm, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA;
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-01/1;
- 3- MATERIAL DAS CONECÇÕES: LATÃO.

ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH			
FOLHA:	A4	AUTORES: BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	
DATA:	04.05.03		
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	1:1	TUBO DE HILSCH - PROTÓTIPO P-01 CAP DE 42mm DESENHO DE FABRICAÇÃO	DISCIPLINA: PME-2598 DESENHO: P-01/2

REVISÃO	1	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	-					
NOME	-					



NOTAS:

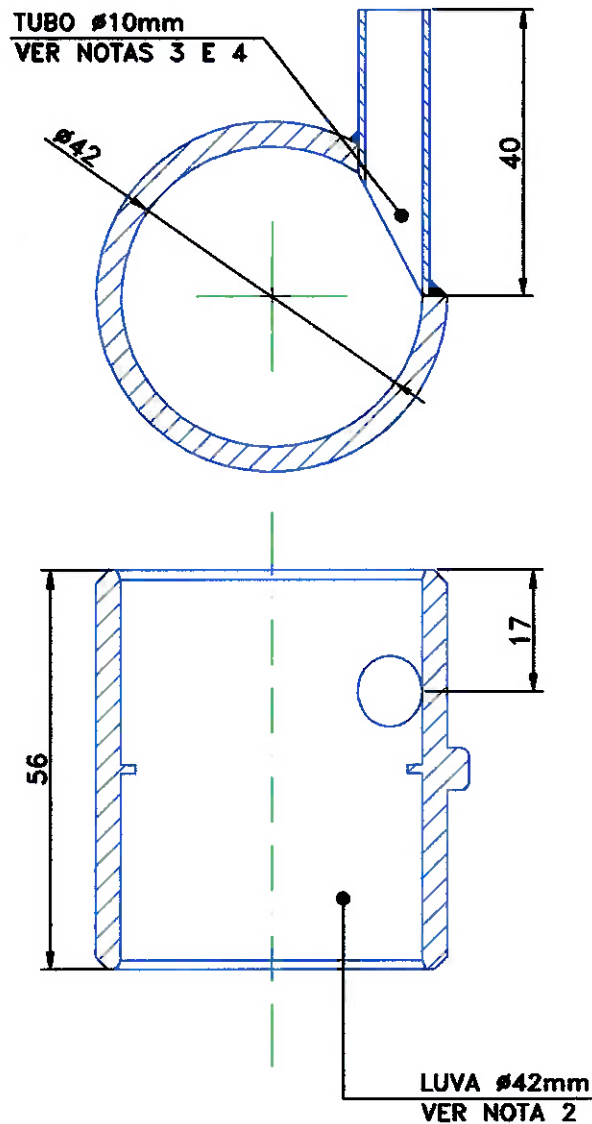
- 1- DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA;
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-01/1;
- 3- FABRICAR 5 PEÇAS COM OS SEGUINTE COMPRIMENTOS:
100, 200, 300, 400 E 500mm.

ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH			
FOLHA:	A4	AUTORES: BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	
DATA:	04.05.03		
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	1:1.5	TUBO DE HILSCH - PROTÓTIPO P-01 TUBO QUENTE DESENHO DE FABRICAÇÃO	DISCIPLINA: PME-2598 DESENHO: P-01/3

REVISÃO	1	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	.					.
NOME	.					

PEÇA 3

QUANT.: 1 UNIDADE



NOTAS:

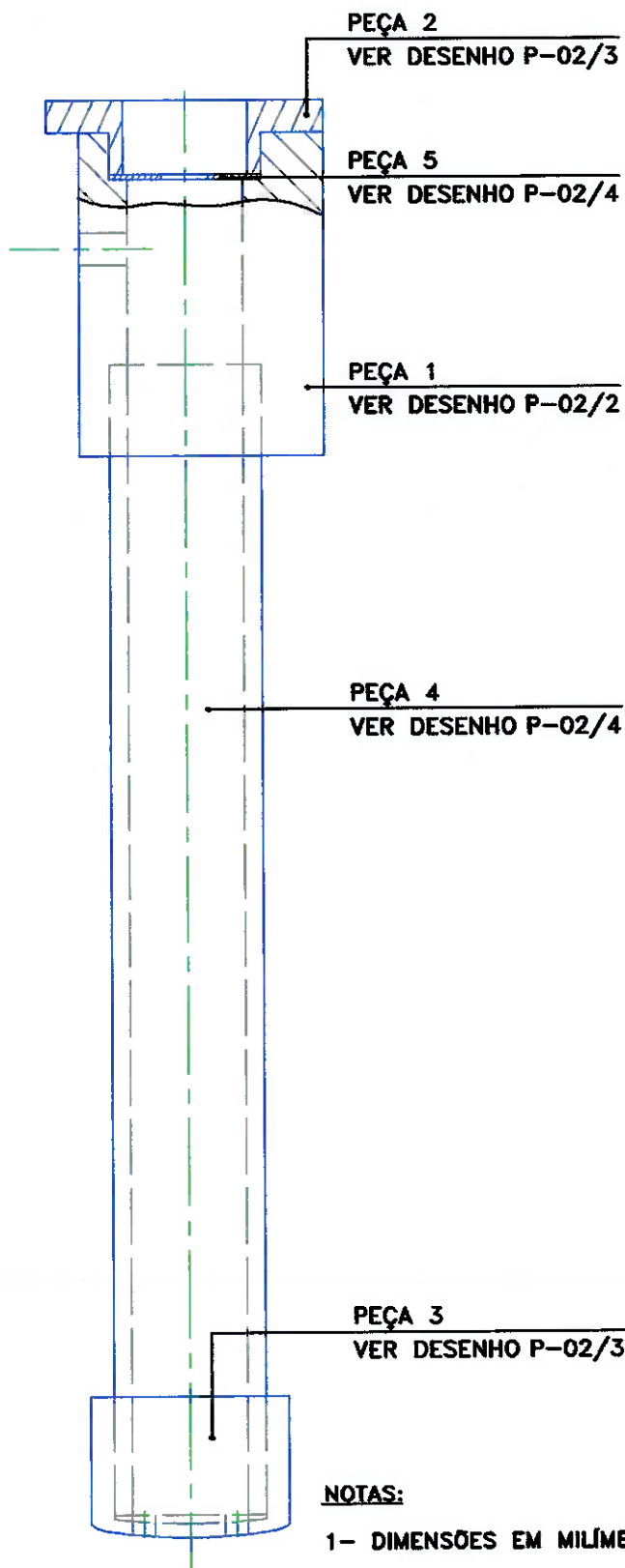
- 1- DIMENSÕES EM mm, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA;
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-01/-1;
- 3- MATERIAL DAS CONECÇÕES: BRONZE;
- 4- FAZER ACABAMENTO INTERNO APÓS SOLDAGEM;
- 5- MATERIAL DOS TUBOS: COBRE.

ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH

FOLHA:	A4	AUTORES: BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	
DATA:	04.05.03		
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	1:1	TUBO DE HILSCH - PROTÓTIPO P-01 LUA DE 42mm DESENHO DE FABRICAÇÃO	DISCIPLINA: PME-2598
			DESENHO: P-01/4

ANEXO C: DESENHOS DO PROTÓTIPO P-02

REVISÃO	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	.				.
NOME	.				.



NOTAS:

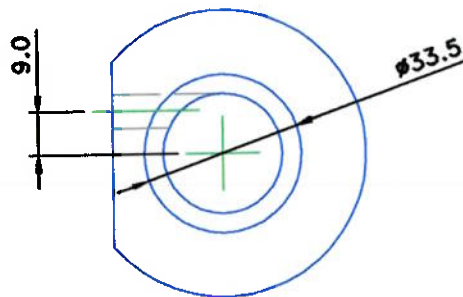
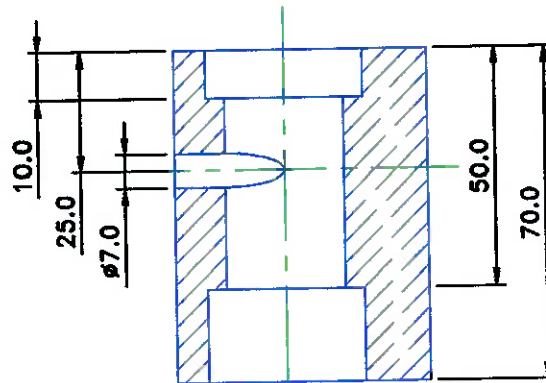
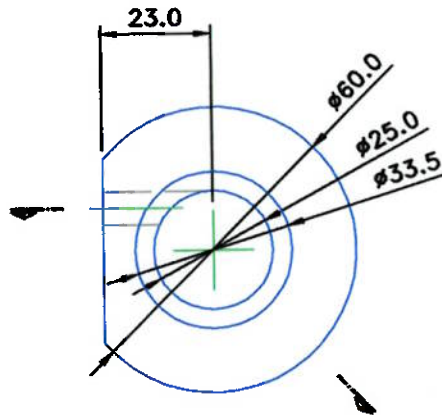
- 1- DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-02/2, /3 E /4.

TÍTULO:		ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH	
FOLHA:	A4	NOMES: BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	 
DATA:			
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	1:1.5	PROTÓTIPO P-02 DESENHO DE CONJUNTO	
			DESENHO:

REVISÃO	1	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	.	.	.	.	.	.
NOME	.	.	.	.	.	.

PEÇA 1

MATERIAL: NYLON
QUANT.: 1 UNIDADE



NOTAS:

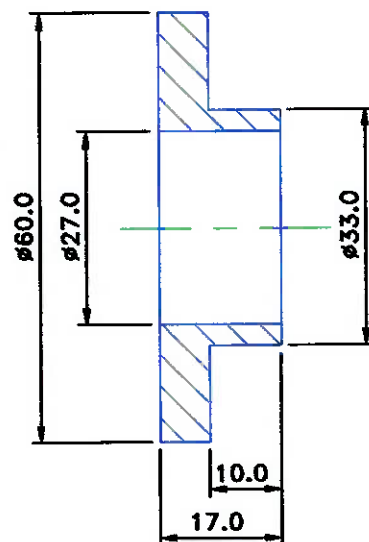
- 1- DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-02/1.

TÍTULO:	ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH		
FOLHA:	A4	NOMES:	BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER
DATA:			
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	PROTÓTIPO P-02		DISCIPLINA: PME-2598
	CORPO PRINCIPAL		

REVISÃO	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	.				.
NOME	.				.

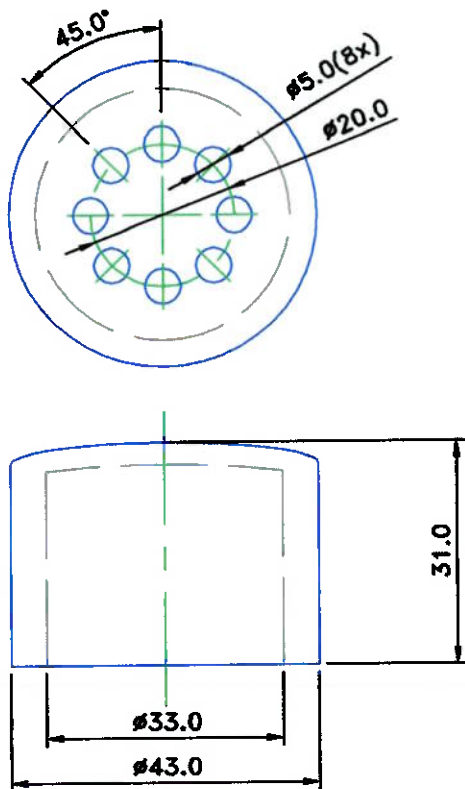
PEÇA 2

MATERIAL: NYLON
QUANT.: 1 UNIDADE



PEÇA 3

MATERIAL: PVC
QUANT.: 1 UNIDADE



NOTAS:

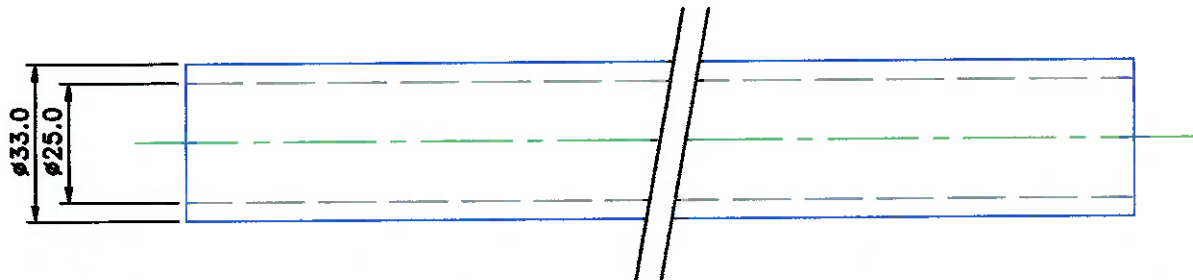
- 1- DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-02/1.

TÍTULO:	ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH			
FOLHA:	A4	NOMES:	BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	
DATA:				
REVISÃO:	X			
VISTO:				
ESCALA:	1:1			DISCIPLINA: PME-2598
	PROTÓTIPO P-02 ACESSÓRIOS DE MONTAGEM			DESENHO:

REVISÃO	1	2	3	4	5	DESCRIÇÃO
DATA	.					.
NOME	.					

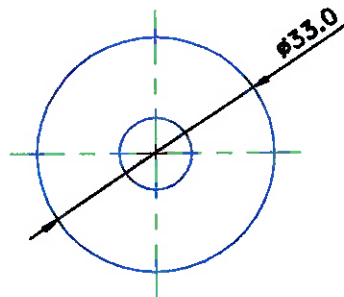
PEÇA 4

MATERIAL: PVC



PEÇA 5

MATERIAL: Nylon
ESPESSURA: 1mm
ESCALA: 1:1



NOTAS:

- 1- DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
- 2- DESENHO DE REFERÊNCIA: P-02/1.
- 3- FABRICAR 5 UNIDADES DA PEÇA 4 COM OS SEGUINTE COMPRIMENTOS: 500, 450, 400, 350 E 300mm.
- 4- FABRICAR 4 UNIDADES DA PEÇA 5 COM OS SEGUINTE DIÂMETROS INTERNOS: 7, 8, 9 E 10mm.

TÍTULO:		ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH	
FOLHA:	A4	NOMES: BORIS ROTTER MÁRCIO STASCHOWER	 
DATA:			
REVISÃO:	X		
VISTO:			
ESCALA:	1:1.5	PROTÓTIPO P-02 ACESSÓRIOS PARA MONTAGEM	DISCIPLINA: PME-2598
			DESENHO:

ANEXO D: FOLHAS DE ESPECIFICAÇÃO

FOLHA de ESPECIFICAÇÕES de VÁLVULA TIPO ESFERA
FE-01

Desenho: P-03

Quantidade: 01

Posição: VB-01

Função: Isolamento do sistema e controle da vazão de ar

Descrição

Tipo: monobloco

Passagem: plena

Diâmetro nominal: Ø1/4"

Acionamento: alavanca manual

Indicador de posição: não

Classe de pressão: 150#

Corpo

Material básico: FoFo cinzento

Face: -

fabricante

Extremidades: roscadas

Acabamento: conforme

Especificação de materiais

Corpo: FoFo cinzento

Esfera: aço inox

Porcas do corpo: -

Porcas do preme-gaxeta: -

Revestimento interno: -

Eixo: aço inoxidável

Parafusos do corpo: -

Parafusos do preme-gaxeta: -

Mancais: -

Placa de identificação: -

Normas e padrões

Construção: -

Distância entre extremidades: 100mm

Inspeção: -

Extremidades: rosca NPT

Identificação: -

Condições de operação

Fluido: ar

Pressão normal: 3,0 bar(g)

Temperatura normal: 17°C

Estado físico: gasoso

Pressão máxima: 4,0 bar(g)

Temperatura máxima: 25°C

Referência de fabricação:

Observações:

Acessórios: -

FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DE VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO
FE-02

Desenho: P-03 Quantidade: 01
Posição: PCV-01

Corpo

Material básico: Aço inoxidável
Face:- Acabamento:-

Extremidades: roscadas

Descrição

Tipo: Controladora de pressão
Diâmetro: 1/4"
Tampa: não
Guia dos obturadores: não
Interno reduzidos: não
Atuador: manual

Série:-
Classe de pressão: 150 lbs.
Classe de vazamento:-
Gaxeta: PVC
Coeficiente de vazão:-

Normas e padrões

Construção: -
Extremidades: ANSI-B 16.5 150 lbs
Dist.entre extremidades: ANSI-B16.10
Identificação: não

Inspeção: -

Referência de fabricação

Bel Air (FR-2400)

Acessórios:

- Filtro tipo cesto
- Manômetro à jusante da válvula

FOLHA DE ESPECIFICAÇÃO DE TERMOMETRO

FE-03

Desenho: P-03

Quantidade: 01

Posição: TE-01, TE-02, TE-03 e TE-04

Função: medir as temperaturas de entrada e saídas do escoamento e temperatura ambiente

Descrição

Tipo: termopar tipo K

Precisão: 0,5%

Proteção: -

Tubo de proteção: sim

Posição: vertical, conectado em cima

Faixa de temperatura: -90 to 1300°C

Diâmetro da sonda: ¼"

Comprimento da sonda: 150 mm

Indicador de ajuste: não

Especificação do material

Sonda: Aço inoxidável 18-08

Tubo de proteção: Aço Inoxidável 18-08

Carcaça: Aço Inoxidável 18-08

Condições de operação

Fluido: ar

Pressão normal: 0 a 3bar(g)

Estado: gasoso

Pressão máxima: 4 bar(g)

Referência do fabricante:

Isotherm

Acessórios: -

FOLHA de ESPECIFICAÇÕES de MANÔMETRO
FE-04

Desenho: P-03
Posição: PI-2
Função: indicação da pressão do ar atmosférico

Quantidade: 01

Descrição

Tipo: coluna de mercúrio
Precisão: 1%
Haste: -
Rosca de conexão: -
Ajuste de ponteiro: -
Líquido de preenchimento: mercúrio

Faixa de pressões: 600 a 800 mmHg
Diâmetro nominal: -
Conexão: -
Membrana de proteção: -
Ajuste: -
Execução: -

Especificação de materiais

Coluna: vidro
Suporte: madeira
Escala: aço inox

Condições de operação

Fluido: ar
Temperatura normal: 25°C

Estado físico: gasoso
Temperatura máxima: 30°C

Referência de fabricação:

Observações: -

Acessórios: -

FOLHA DE ESPECIFICAÇÃO DO ANEMOMETRO
FE-05

Desenho: P-03
Posição: SI-01 E SI-02
Função: Medição da Velocidade nas saídas do escoamento

Quantidade: 01

Descrição

Tipo: hélice
Precisão: 1,5%
Proteção: anel plástico
Posição: vertical

Faixa de velocidades: 0 a 200 m/s
Diâmetro da hélice: 55 mm
Indicador de unidades: sim

Especificação do material

Hélice: plástico
Anel de proteção: plástico

Carcaça: plástico

Condições de operação

Fluido: ar
Pressão normal: 760 mmHg

Estado: gasoso
Pressão máxima: 770 mmHg

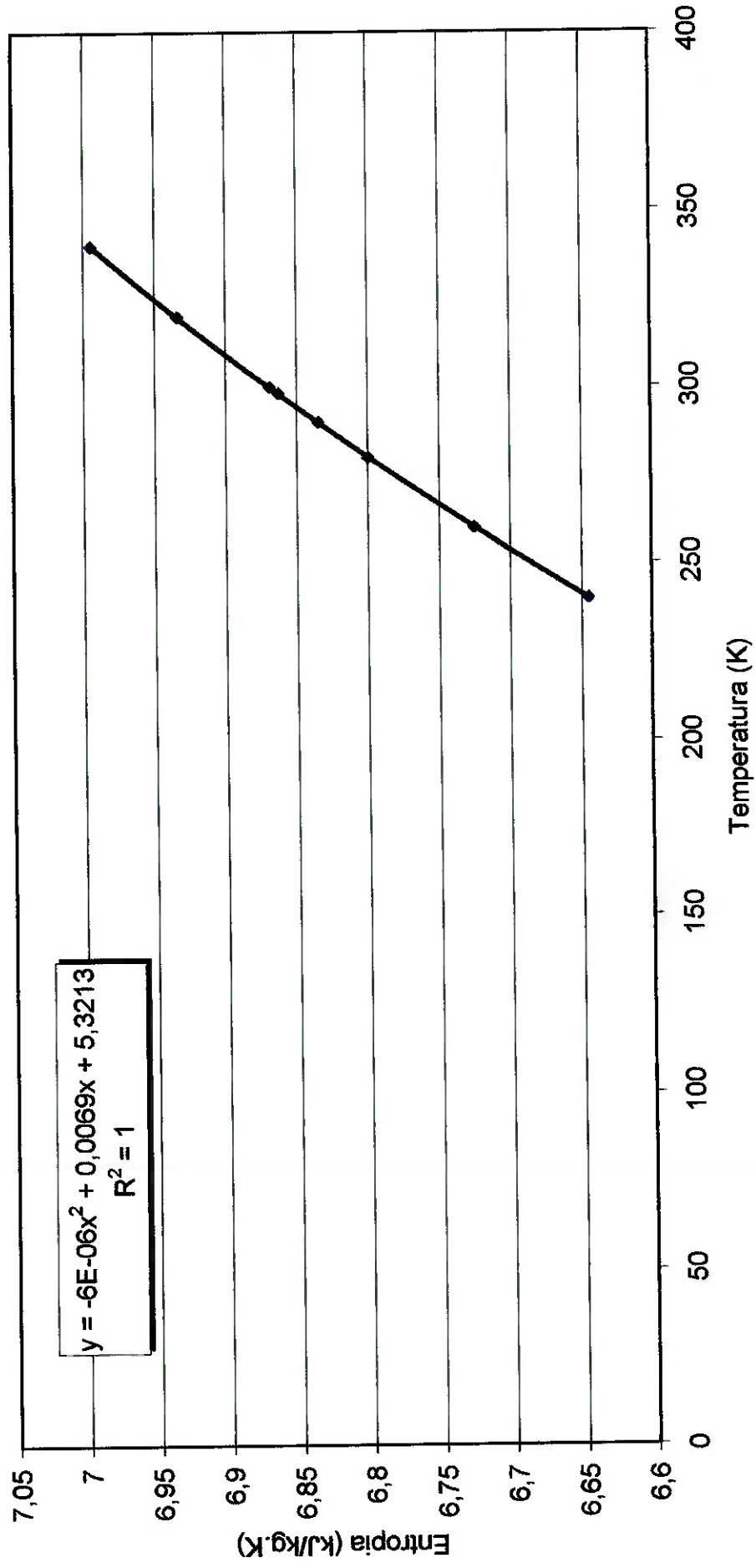
Referência do fabricante:

Turbo Meter

Acessórios: -

ANEXO E: AJUSTE DE CUSTVA DE S^0_t

Ajuste de Curva, Temperatura x Entropia



ANEXO F: DADOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO P-01

As tabelas subseqüentes deste anexo, quais sejam, tabelas 1 a 20, referem-se aos experimentos indicados na primeira coluna da tabela F-01.

Tabela F-01: Matriz de Ensaios do Protótipo P-01

NUM.	Comp. (m)	Área da Saída Quente (m ²)	Pressão entrada (kgf/cm ²)
1	400	190,86	3
2	400	190,86	2,5
3	400	190,86	2
4	400	190,86	1,5
5	400	190,86	1
6	400	127,24	3
7	400	127,24	2,5
8	400	127,24	2
9	400	127,24	1,5
10	400	127,24	1
11	300	190,86	3
12	300	190,86	2,5
13	300	190,86	2
14	300	190,86	1,5
15	300	190,86	1
16	300	127,24	3
17	300	127,24	2,5
18	300	127,24	2
19	300	127,24	1,5
20	300	127,24	1

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 1

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	704 mmHg
T amb	18,4 °C
P in	3 kgf/cm ²
T in	17 °C
μ	0,252 (fração fria)
V cold	5,14 m/s
V hot	14,21 m/s
T cold	16 °C
T hot	17,9 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	1,77E-04 m ²
A hot	1,91E-04 m ²
Nº Furos	3

Variação de Temperatura

Ti-Tc	1 °C
Th-Ti	0,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	17,34 °C
DT hot	0,56 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	14,33 °C
DT cold	-1,67 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade	4,803 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,131 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,124 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00091 m ³ /s
m hot	0,00271 m ³ /s

M cold	0,00103 Kg/s
M hot	0,00305 Kg/s
M in	0,00407 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,20 kJ/kg.K
S cold	5,81 kJ/kg.K
S hot	5,80 kJ/kg.K
Niso	93,54 %

COP

Wise	142,33 kJ/kg
COP ise	1,77E-03

Wisoterm	116,00 kJ/kg
COP isoterm	2,17E-03

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	1,26 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 2

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,4** °C

P in **2,5** kgf/cm²
T in **17** °C
 μ 0,231 (fração fria)
V cold **4,16** m/s
V hot **12,9** m/s
T cold **15,8** °C
T hot **17,7** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,91E-04** m²
Nº Furos **3**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 1,2 °C
Th-Ti 0,7 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 17,36 °C
DT hot 0,34 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 14,67 °C
DT cold -1,13 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,203 Kg/m³ (in)
Densidade 1,132 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,124 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00074 m³/s
m hot 0,00246 m³/s

M cold 0,00083 Kg/s
M hot 0,00277 Kg/s
M in 0,0036 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,16 kJ/kg.K
S cold 5,81 kJ/kg.K
S hot 5,80 kJ/kg.K

Niso 94,14 %

COP

Wise 126,04 kJ/kg
COP ise 2,20E-03

Wisoterm 104,82 kJ/kg
COP isoterm 2,65E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 1,51 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03

Num.: 3

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,4** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **17** °C
 μ 0,265 (fração fria)
V cold **3,17** m/s
V hot **8,2** m/s
T cold **16** °C
T hot **17,6** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,91E-04** m²
Nº Furos **3**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 1 °C
Th-Ti 0,6 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 17,36 °C
DT hot 0,24 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 15,33 °C
DT cold -0,67 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 3,603 Kg/m³ (in)
Densidade 1,131 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,125 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00056 m³/s
m hot 0,00156 m³/s

M cold 0,00063 Kg/s
M hot 0,00176 Kg/s
M in 0,00239 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,12 kJ/kg.K
S cold 5,81 kJ/kg.K
S hot 5,80 kJ/kg.K

Niso 94,83 %

COP

Wise 107,99 kJ/kg
COP ise 2,45E-03

Wisoterm 91,93 kJ/kg
COP isoterm 2,88E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 1,26 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 4

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,4** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **17** °C
 μ **0,228** (fração fria)
V cold **2,6** m/s
V hot **8,2** m/s
T cold **16** °C
T hot **17,9** °C
 $\varnothing_{entrada}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,91E-04** m²
Nº Furos **3**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **1** °C
Th-Ti **0,9** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **17,30** °C
DT hot **0,60** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **13,95** °C
DT cold **-2,05** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **3,002** Kg/m³ (in)
Densidade **1,131** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,124** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00046** m³/s
m hot **0,00156** m³/s

M cold **0,00052** Kg/s
M hot **0,00176** Kg/s
M in **0,00228** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,07** kJ/kg.K
S cold **5,81** kJ/kg.K
S hot **5,80** kJ/kg.K

Niso **95,61** %

COP

Wise **87,64** kJ/kg
COP ise **2,60E-03**

Wisoterm **76,67** kJ/kg
COP isoterm **2,98E-03**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **1,26** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 5

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 704 mmHg
T amb 18,4 °C

P in 1 kgf/cm²
T in 17 °C
 μ 0,196 (fração fria)
V cold 1,7 m/s
V hot 6,5 m/s
T cold 16,3 °C
T hot 18 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,91E-04 m²
Nº Furos 3

Variação de Temperatura

Ti-Tc 0,7 °C
Th-Ti 1 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 17,17 °C
DT hot 0,83 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 12,89 °C
DT cold -3,41 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,402 Kg/m³ (in)
Densidade 1,130 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,123 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,0003 m³/s
m hot 0,00124 m³/s

M cold 0,00034 Kg/s
M hot 0,00139 Kg/s
M in 0,00173 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,00 kJ/kg.K
S cold 5,81 kJ/kg.K
S hot 5,80 kJ/kg.K

Niso 96,61 %

COP

Wise 64,14 kJ/kg
COP ise 2,14E-03

Wisoterm 58,00 kJ/kg
COP isoterm 2,36E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 0,88 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 6

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **25** °C

P in **3** kgf/cm²
T in **21** °C
 μ **0,424** (fração fria)
V cold **6,8** m/s
V hot **13,4** m/s
T cold **12,6** °C
T hot **24,8** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,27E-04** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **8,4** °C
Th-Ti **3,8** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **27,17** °C
DT hot **2,37** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **15,83** °C
DT cold **3,23** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **4,738** Kg/m³ (in)
Densidade **1,135** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,088** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,0012** m³/s
m hot **0,0017** m³/s

M cold **0,00136** Kg/s
M hot **0,00186** Kg/s
M in **0,00322** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,17** kJ/kg.K
S cold **5,83** kJ/kg.K
S hot **5,75** kJ/kg.K

Niso **93,71** %

COP

Wise **145,55** kJ/kg
COP ise **2,44E-02**

Wisoterm **118,62** kJ/kg
COP isoterm **3,00E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **10,56** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 7

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 698 mmHg
T amb 25 °C

P in 2,5 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,408 (fração fria)
V cold 5,5 m/s
V hot 11,5 m/s
T cold 13,4 °C
T hot 23,8 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,27E-04 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 7,6 °C
Th-Ti 2,8 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 26,23 °C
DT hot 2,43 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 16,93 °C
DT cold 3,53 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,146 Kg/m³ (in)
Densidade 1,132 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,092 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00097 m³/s
m hot 0,00146 m³/s

M cold 0,0011 Kg/s
M hot 0,0016 Kg/s
M in 0,0027 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,13 kJ/kg.K
S cold 5,83 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 94,30 %

COP

Wise 128,89 kJ/kg
COP ise 2,40E-02

Wisoterm 107,20 kJ/kg
COP isoterm 2,89E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 9,56 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 8

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **25** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **21** °C
 μ 0,397 (fração fria)
V cold **4,6** m/s
V hot **9,9** m/s
T cold **17,4** °C
T hot **23,7** °C
 $\emptyset$ entrada **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,27E-04** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **3,6** °C
Th-Ti **2,7** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **23,37** °C
DT hot **0,33** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **16,90** °C
DT cold **-0,50** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **3,554** Kg/m³ (in)
Densidade **1,116** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,092** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00081** m³/s
m hot **0,00126** m³/s

M cold **0,00091** Kg/s
M hot **0,00138** Kg/s
M in **0,00228** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,09** kJ/kg.K
S cold **5,80** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **94,80** %

COP

Wise **110,43** kJ/kg
COP ise **1,30E-02**

Wisoterm **94,01** kJ/kg
COP isoterm **1,52E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **4,53** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03
Nome: Márcio

Num.: 9

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 698 mmHg
T amb 25 °C

P in 1,5 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,432 (fração fria)
V cold 3,5 m/s
V hot 6,5 m/s
T cold 18,7 °C
T hot 24,2 °C
 $\varnothing_{entrada}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,27E-04 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 2,3 °C
Th-Ti 3,2 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 22,75 °C
DT hot 1,45 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 16,80 °C
DT cold -1,90 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,961 Kg/m³ (in)
Densidade 1,111 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,090 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00062 m³/s
m hot 0,00083 m³/s

M cold 0,00069 Kg/s
M hot 0,0009 Kg/s
M in 0,00159 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,04 kJ/kg.K
S cold 5,79 kJ/kg.K
S hot 5,75 kJ/kg.K

Niso 95,56 %

COP

Wise 89,63 kJ/kg
COP ise 1,11E-02

Wisoterm 78,41 kJ/kg
COP isoterm 1,27E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 2,89 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 26-set-03

Num.: 10

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	698 mmHg
T amb	25 °C
P in	1 kgf/cm ²
T in	21 °C
μ	0,478 (fração fria)
V cold	3,2 m/s
V hot	4,9 m/s
T cold	20,6 °C
T hot	23,4 °C
$\varnothing$ entrada	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	1,77E-04 m ²
A hot	1,27E-04 m ²
Nº Furos	2

Variação de Temperatura

Ti-Tc	0,4 °C
Th-Ti	2,4 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,37 °C
DT hot	2,03 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	18,38 °C
DT cold	-2,22 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade	2,369 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,104 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,093 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00057 m ³ /s
m hot	0,00062 m ³ /s
M cold	0,00062 Kg/s
M hot	0,00068 Kg/s
M in	0,00131 Kg/s

Segunda Lei:

S in	5,97 kJ/kg.K
S cold	5,78 kJ/kg.K
S hot	5,76 kJ/kg.K
Niso	96,55 %

COP

Wise	65,59 kJ/kg
COP ise	2,91E-03

Wisoterm	59,31 kJ/kg
COP isoterm	3,22E-03

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	0,50 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 11

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **23,8** °C

P in **3** kgf/cm²
T in **21** °C
 μ 0,291 (fração fria)
V cold **3,7** m/s
V hot **8,6** m/s
T cold **14,3** °C
T hot **23,7** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,91E-04** m²
Nº Furos **3**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **6,7** °C
Th-Ti **2,7** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **23,76** °C
DT hot **0,06** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **14,44** °C
DT cold **0,14** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **4,738** Kg/m³ (in)
Densidade **1,128** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,092** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00065** m³/s
m hot **0,00164** m³/s

M cold **0,00074** Kg/s
M hot **0,00179** Kg/s
M in **0,00253** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,17** kJ/kg.K
S cold **5,82** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **93,56** %

COP

Wise **144,97** kJ/kg
COP ise **1,35E-02**

Wisoterm **118,15** kJ/kg
COP isoterm **1,65E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **8,43** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03

Num.: 12

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	698 mmHg
T amb	23,8 °C
P in	2,5 kgf/cm ²
T in	21 °C
μ	0,250 (fração fria)
V cold	2,7 m/s
V hot	7,7 m/s
T cold	16,6 °C
T hot	23,6 °C
$\varnothing_{\text{entrada}}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	1,77E-04 m ²
A hot	1,91E-04 m ²
Nº Furos	3

Variação de Temperatura

Ti-Tc	4,4 °C
Th-Ti	2,6 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	22,46 °C
DT hot	1,14 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	13,18 °C
DT cold	-3,42 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade	4,146 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,119 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,093 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00048 m ³ /s
m hot	0,00147 m ³ /s
M cold	0,00053 Kg/s
M hot	0,00161 Kg/s
M in	0,00214 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,13 kJ/kg.K
S cold	5,80 kJ/kg.K
S hot	5,76 kJ/kg.K
Niso	94,05 %

COP

Wise	128,37 kJ/kg
COP ise	8,55E-03

Wisoterm	106,77 kJ/kg
COP isoterm	1,03E-02

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	5,53 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 13

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **23,8** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **21** °C
 μ 0,252 (fração fria)
V cold **2,5** m/s
V hot **7** m/s
T cold **17,8** °C
T hot **22,5** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,91E-04** m²
Nº Furos **3**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **3,2** °C
Th-Ti **1,5** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **22,08** °C
DT hot **0,42** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **16,54** °C
DT cold **-1,26** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **3,554** Kg/m³ (in)
Densidade **1,114** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,097** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00044** m³/s
m hot **0,00134** m³/s

M cold **0,00049** Kg/s
M hot **0,00147** Kg/s
M in **0,00196** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,09** kJ/kg.K
S cold **5,80** kJ/kg.K
S hot **5,77** kJ/kg.K

Niso **94,79** %

COP

Wise **109,99** kJ/kg
COP ise **7,32E-03**

Wisoterm **93,63** kJ/kg
COP isoterm **8,60E-03**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **4,02** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03

Num.: 14

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	698 mmHg
T amb	23,8 °C
P in	1,5 kgf/cm ²
T in	21 °C
μ	0,222 (fração fria)
V cold	1,8 m/s
V hot	5,9 m/s
T cold	19,5 °C
T hot	22,6 °C
ϕ_{entrada}	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	1,77E-04 m ²
A hot	1,91E-04 m ²
Nº Furos	3

Variação de Temperatura

Ti-Tc	1,5 °C
Th-Ti	1,6 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,43 °C
DT hot	1,17 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	15,40 °C
DT cold	-4,10 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade	2,961 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,108 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,096 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00032 m ³ /s
m hot	0,00113 m ³ /s
M cold	0,00035 Kg/s
M hot	0,00123 Kg/s
M in	0,00159 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,04 kJ/kg.K
S cold	5,79 kJ/kg.K
S hot	5,76 kJ/kg.K
Niso	95,54 %

COP

Wise	89,27 kJ/kg
COP ise	3,73E-03

Wisoterm	78,09 kJ/kg
COP isoterm	4,27E-03

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	1,89 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 15

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 698 mmHg
T amb 23,8 °C

P in 1 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,241 (fração fria)
V cold 1,3 m/s
V hot 3,8 m/s
T cold 20,8 °C
T hot 22,3 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,91E-04 m²
Nº Furos 3

Variação de Temperatura

Ti-Tc 0,2 °C
Th-Ti 1,3 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 21,06 °C
DT hot 1,24 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 16,92 °C
DT cold -3,88 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,369 Kg/m³ (in)
Densidade 1,103 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,097 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00023 m³/s
m hot 0,00073 m³/s

M cold 0,00025 Kg/s
M hot 0,0008 Kg/s
M in 0,00105 Kg/s

Segunda Lei:

S in 5,97 kJ/kg.K
S cold 5,78 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 96,57 %

COP

Wise 65,33 kJ/kg
COP ise 7,39E-04

Wisoterm 59,07 kJ/kg
COP isoterm 8,18E-04

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 0,25 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 16

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **23,7** °C

P in **3** kgf/cm²
T in **21** °C
 μ 0,530 (fração fria)
V cold **5,4** m/s
V hot **7** m/s
T cold **11,4** °C
T hot **26,5** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,27E-04** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 9,6 °C
Th-Ti 5,5 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 31,83 °C
DT hot 5,33 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 16,13 °C
DT cold 4,73 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,738 Kg/m³ (in)
Densidade 1,149 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,091 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00095 m³/s
m hot 0,00089 m³/s

M cold 0,0011 Kg/s
M hot 0,00097 Kg/s
M in 0,00207 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,17 kJ/kg.K
S cold 5,84 kJ/kg.K
S hot 5,74 kJ/kg.K

Niso 93,83 %

COP

Wise 144,92 kJ/kg
COP ise 3,51E-02

Wisoterm 118,11 kJ/kg
COP isoterm 4,31E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 12,07 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 17

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 704 mmHg
T amb 23,7 °C

P in 2,5 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,595 (fração fria)
V cold 6,1 m/s
V hot 6 m/s
T cold 14 °C
T hot 25 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,27E-04 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 7 °C
Th-Ti 4 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 31,26 °C
DT hot 6,26 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 18,27 °C
DT cold 4,27 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,146 Kg/m³ (in)
Densidade 1,139 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,097 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00108 m³/s
m hot 0,00076 m³/s

M cold 0,00123 Kg/s
M hot 0,00084 Kg/s
M in 0,00206 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,13 kJ/kg.K
S cold 5,82 kJ/kg.K
S hot 5,75 kJ/kg.K

Niso 94,42 %

COP

Wise 128,33 kJ/kg
COP ise 3,24E-02

Wisoterm 106,73 kJ/kg
COP isoterm 3,90E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 8,80 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 18

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 704 mmHg
T amb 23,7 °C

P in 2 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,568 (fração fria)
V cold 4,6 m/s
V hot 5 m/s
T cold 16,2 °C
T hot 24,7 °C
 $\varnothing$ entrada 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,27E-04 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 4,8 °C
Th-Ti 3,7 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 27,31 °C
DT hot 2,61 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 18,19 °C
DT cold 1,99 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 3,554 Kg/m³ (in)
Densidade 1,130 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,098 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00081 m³/s
m hot 0,00064 m³/s

M cold 0,00092 Kg/s
M hot 0,0007 Kg/s
M in 0,00162 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,09 kJ/kg.K
S cold 5,81 kJ/kg.K
S hot 5,75 kJ/kg.K

Niso 94,95 %

COP

Wise 109,95 kJ/kg
COP ise 2,48E-02

Wisoterm 93,60 kJ/kg
COP isoterm 2,91E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 6,04 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03
Nome: Boris

Num.: 19

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **23,7** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **21** °C
 μ 0,572 (fração fria)
V cold **3,5** m/s
V hot **3,7** m/s
T cold **18,3** °C
T hot **23,9** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **1,77E-04** m²
A hot **1,27E-04** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **2,7** °C
Th-Ti **2,9** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **24,62** °C
DT hot **0,72** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **18,83** °C
DT cold **0,53** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **2,961** Kg/m³ (in)
Densidade **1,122** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,101** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00062** m³/s
m hot **0,00047** m³/s

M cold **0,00069** Kg/s
M hot **0,00052** Kg/s
M in **0,00121** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,04** kJ/kg.K
S cold **5,79** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **95,68** %

COP

Wise **89,24** kJ/kg
COP ise **1,73E-02**

Wisoterm **78,06** kJ/kg
COP isoterm **1,98E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **3,40** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 7-out-03

Num.: 20

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-01 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 704 mmHg
T amb 23,7 °C

P in 1 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,549 (fração fria)
V cold 2,6 m/s
V hot 3 m/s
T cold 20,2 °C
T hot 23,5 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 1,77E-04 m²
A hot 1,27E-04 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 0,8 °C
Th-Ti 2,5 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 21,97 °C
DT hot 1,53 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 18,95 °C
DT cold -1,25 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,369 Kg/m³ (in)
Densidade 1,115 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,102 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00046 m³/s
m hot 0,00038 m³/s

M cold 0,00051 Kg/s
M hot 0,00042 Kg/s
M in 0,00093 Kg/s

Segunda Lei:

S in 5,97 kJ/kg.K
S cold 5,78 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 96,59 %

COP

Wise 65,31 kJ/kg
COP ise 6,73E-03

Wisoterm 59,05 kJ/kg
COP isoterm 7,44E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 1,01 %

ANEXO G: DADOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO P-02

As tabelas subseqüentes deste anexo, quais sejam, tabelas 1 a 55, referem-se aos experimentos indicados na primeira coluna da tabela G-01.

Tabela G-01: Matriz de Ensaio do Protótipo P-02

NUM.	Comp. (mm)	Área da saída quente (mm ²)	Pressão entrada (kgf/cm ²)
1	500	2,54E-04	3
2	500	2,54E-04	2,5
3	500	2,54E-04	2
4	500	2,54E-04	1,5
5	500	2,54E-04	1
6	500	1,91E-04	3
7	500	1,91E-04	2,5
8	500	1,91E-04	2
9	500	1,91E-04	1,5
10	500	1,91E-04	1
11	500	1,27E-04	3
12	500	1,27E-04	2,5
13	500	1,27E-04	2
14	500	1,27E-04	1,5
15	500	1,27E-04	1
16	400	2,54E-04	3
17	400	2,54E-04	2,5
18	400	2,54E-04	2
19	400	2,54E-04	1,5
20	400	2,54E-04	1
21	400	1,91E-04	3
22	400	1,91E-04	2,5
23	400	1,91E-04	2
24	400	1,91E-04	1,5
25	400	1,91E-04	1
26	400	1,27E-04	3
27	400	1,27E-04	2,5
28	400	1,27E-04	2
29	400	1,27E-04	1,5
30	400	1,27E-04	1
31	300	2,54E-04	3
32	300	2,54E-04	2,5
33	300	2,54E-04	2
34	300	2,54E-04	1,5
35	300	2,54E-04	1
36	350	1,91E-04	3
37	300	1,91E-04	2,5

Tabela G-01 (continuação)

NUM.	Comp. (m)	Área da saída quente (m ²)	Pressão entrada (kgf/cm ²)
38	300	1,91E-04	2
39	300	1,91E-04	1,5
40	300	1,91E-04	1
41	300	1,27E-04	3
42	300	1,27E-04	2,5
43	300	1,27E-04	2
44	300	1,27E-04	1,5
45	300	1,27E-04	1
46	200	2,54E-04	3
47	200	2,54E-04	2,5
48	200	2,54E-04	2
49	200	2,54E-04	1,5
50	200	2,54E-04	1
51	200	1,91E-04	3
52	200	1,91E-04	2,5
53	200	1,91E-04	2
54	200	1,91E-04	1,5
55	200	1,91E-04	1

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 1

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **3** kgf/cm²
T in **18,1** °C
 μ **0,172** (fração fria)
V cold **10,9** m/s
V hot **27** m/s
T cold **8,9** °C
T hot **22,8** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **7,85E-05** m²
Nº Furos **4**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **9,2** °C
Th-Ti **4,7** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **20,01** °C
DT hot **2,79** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **-4,54** °C
DT cold **-13,44** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **4,785** Kg/m³ (in)
Densidade **1,150** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,096** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00042** m3/s
m hot **0,00212** m3/s

M cold **0,00048** Kg/s
M hot **0,00232** Kg/s
M in **0,00281** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,19** kJ/kg.K
S cold **5,86** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **93,33** %

COP

Wise **144,09** kJ/kg
COP ise **1,10E-02**

Wisoterm **117,43** kJ/kg
COP isoterm **1,35E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **99,3** °C
DTreal/Dise **9,26** %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 2

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **2,5** kgf/cm²
T in **18,1** °C
 μ 0,155 (fração fria)
V cold **8,4** m/s
V hot **23,4** m/s
T cold **11,2** °C
T hot **23,1** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **7,85E-05** m²
Nº Furos **4**

Propriedades:

Densidade **4,187** Kg/m³ (in)
Densidade **1,140** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,095** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00032** m³/s
m hot **0,00184** m³/s

M cold **0,00037** Kg/s
M hot **0,00201** Kg/s
M in **0,00238** Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **6,9** °C
Th-Ti **5** °C

S in **6,15** kJ/kg.K
S cold **5,84** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **93,82** %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **19,36** °C
DT hot **3,74** °C

COP

Wise **127,59** kJ/kg
COP ise **8,38E-03**

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **-9,18** °C
DT cold **-20,38** °C

Wisoterm **106,12** kJ/kg
COP isoterm **1,01E-02**

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **91,3** °C
DTreal/Dise **7,56** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 3

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **18,3** °C
 μ 0,156 (fração fria)
V cold **7,4** m/s
V hot **20,4** m/s
T cold **11,8** °C
T hot **22,5** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **7,85E-05** m²
Nº Furos **4**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **6,5** °C
Th-Ti **4,2** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **19,50** °C
DT hot **3,00** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **-4,47** °C
DT cold **-16,27** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **3,587** Kg/m³ (in)
Densidade **1,138** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,097** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00028** m³/s
m hot **0,0016** m³/s

M cold **0,00032** Kg/s
M hot **0,00176** Kg/s
M in **0,00208** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,11** kJ/kg.K
S cold **5,84** kJ/kg.K
S hot **5,77** kJ/kg.K

Niso **94,56** %

COP

Wise **109,32** kJ/kg
COP ise **9,26E-03**

Wisoterm **93,06** kJ/kg
COP isoterm **1,09E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **8,18** %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 4

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **18,6** °C
 μ 0,295 (fração fria)
V cold **4,9** m/s
V hot **5,9** m/s
T cold **13,6** °C
T hot **22,3** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **7,85E-05** m²
Nº Furos **4**

Propriedades:

Densidade **2,986** Kg/m³ (in)
Densidade **1,131** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,097** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00019** m³/s
m hot **0,00046** m³/s

M cold **0,00021** Kg/s
M hot **0,00051** Kg/s
M in **0,00072** Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **5** °C
Th-Ti **3,7** °C

S in **6,05** kJ/kg.K
S cold **5,82** kJ/kg.K
S hot **5,77** kJ/kg.K

Niso **95,53** %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **20,70** °C
DT hot **1,60** °C

COP

Wise **88,73** kJ/kg
COP ise **1,66E-02**

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **9,78** °C
DT cold **-3,82** °C

Wisoterm **77,62** kJ/kg
COP isoterm **1,90E-02**

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **6,29** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 5

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb 698 mmHg
T amb 22 °C

P in 1 kgf/cm²
T in 19,7 °C
 μ 0,126 (fração fria)
V cold 3,6 m/s
V hot 12,4 m/s
T cold 16,8 °C
T hot 21,8 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Variação de Temperatura

Ti-Tc 2,9 °C
Th-Ti 2,1 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,12 °C
DT hot 1,68 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 5,19 °C
DT cold -11,61 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,380 Kg/m³ (in)
Densidade 1,118 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,099 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00014 m³/s
m hot 0,00097 m³/s

M cold 0,00015 Kg/s
M hot 0,00107 Kg/s
M in 0,00123 Kg/s

Segunda Lei:

S in 5,98 kJ/kg.K
S cold 5,80 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 96,51 %

COP

Wise 64,93 kJ/kg
COP ise 5,65E-03

Wisoterm 58,72 kJ/kg
COP isoterm 6,24E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 3,65 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 6

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **3** kgf/cm²
T in **18,2** °C
 μ 0,232 (fração fria)
V cold **11,7** m/s
V hot **27,1** m/s
T cold **4,6** °C
T hot **24** °C
 $\varnothing$ entrada **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **5,89E-05** m²
Nº Furos **3**

Propriedades:

Densidade **4,784** Kg/m³ (in)
Densidade **1,167** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,091** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00045 m³/s
m hot 0,0016 m³/s

M cold 0,00053 Kg/s
M hot 0,00174 Kg/s
M in 0,00227 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 13,6 °C
Th-Ti 5,8 °C

S in 6,19 kJ/kg.K
S cold 5,89 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 93,44 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 22,30 °C
DT hot 1,70 °C

COP

Wise 144,09 kJ/kg
COP ise 2,19E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -1,02 °C
DT cold -5,62 °C

Wisoterm 117,43 kJ/kg
COP isoterm 2,68E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 99,3 °C
DTreal/Dise 13,70 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 7

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **2,5** kgf/cm²
T in **18,6** °C
 μ **0,234** (fração fria)
V cold **10,9** m/s
V hot **24,5** m/s
T cold **9,5** °C
T hot **23,4** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **5,89E-05** m²
Nº Furos **3**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **9,1** °C
Th-Ti **4,8** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **21,38** °C
DT hot **2,02** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **2,86** °C
DT cold **-6,64** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **4,180** Kg/m³ (in)
Densidade **1,147** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,093** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00042** m³/s
m hot **0,00144** m³/s

M cold **0,00048** Kg/s
M hot **0,00158** Kg/s
M in **0,00206** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,15** kJ/kg.K
S cold **5,85** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **93,99** %

COP

Wise **127,59** kJ/kg
COP ise **1,67E-02**

Wisoterm **106,12** kJ/kg
COP isoterm **2,00E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **91,3** °C
DTreal/Dise **9,97** %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 8

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **18,4** °C
 μ **0,245** (fração fria)
V cold **9,7** m/s
V hot **20,4** m/s
T cold **10,8** °C
T hot **23,1** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **5,89E-05** m²
Nº Furos **3**

Propriedades:

Densidade **3,585** Kg/m³ (in)
Densidade **1,142** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,095** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00037** m³/s
m hot **0,0012** m³/s

M cold **0,00043** Kg/s
M hot **0,00132** Kg/s
M in **0,00174** Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **7,6** °C
Th-Ti **4,7** °C

S in **6,11** kJ/kg.K
S cold **5,84** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **94,66** %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **20,86** °C
DT hot **2,24** °C

COP

Wise **109,32** kJ/kg
COP ise **1,70E-02**

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **3,90** °C
DT cold **-6,90** °C

Wisoterm **93,06** kJ/kg
COP isoterm **2,00E-02**

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **9,56** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 9

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb 698 mmHg
T amb 22 °C

P in 1,5 kgf/cm²
T in 18,9 °C
 μ 0,220 (fração fria)
V cold 6,7 m/s
V hot 16 m/s
T cold 13,8 °C
T hot 23 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 5,89E-05 m²
Nº Furos 3

Variação de Temperatura

Ti-Tc 5,1 °C
Th-Ti 4,1 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,34 °C
DT hot 2,66 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 4,38 °C
DT cold -9,42 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,983 Kg/m³ (in)
Densidade 1,130 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,095 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00026 m³/s
m hot 0,00094 m³/s

M cold 0,00029 Kg/s
M hot 0,00103 Kg/s
M in 0,00132 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,05 kJ/kg.K
S cold 5,82 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 95,43 %

COP

Wise 88,73 kJ/kg
COP ise 1,27E-02

Wisoterm 77,62 kJ/kg
COP isoterm 1,45E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 6,41 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 10

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **698** mmHg
T amb **22** °C

P in **1** kgf/cm²
T in **20** °C
 μ **0,239** (fração fria)
V cold **5,8** m/s
V hot **12,4** m/s
T cold **15,2** °C
T hot **22,7** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **5,89E-05** m²
Nº Furos **3**

Propriedades:

Densidade **2,377** Kg/m³ (in)
Densidade **1,124** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,096** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00022** m³/s
m hot **0,00073** m³/s

M cold **0,00025** Kg/s
M hot **0,0008** Kg/s
M in **0,00105** Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **4,8** °C
Th-Ti **2,7** °C

S in **5,98** kJ/kg.K
S cold **5,81** kJ/kg.K
S hot **5,76** kJ/kg.K

Niso **96,57** %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **21,50** °C
DT hot **1,20** °C

COP

Wise **64,93** kJ/kg
COP ise **1,76E-02**

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **11,39** °C
DT cold **-3,81** °C

Wisoterm **58,72** kJ/kg
COP isoterm **1,95E-02**

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **6,04** %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 11

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,8** °C

P in **3** kgf/cm²
T in **15,9** °C
 μ 0,273 (fração fria)
V cold **9,9** m/s
V hot **27,8** m/s
T cold **1,8** °C
T hot **22,9** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Propriedades:

Densidade **4,822** Kg/m³ (in)
Densidade **1,189** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,105** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00038 m³/s
m hot 0,00109 m³/s

M cold 0,00045 Kg/s
M hot 0,00121 Kg/s
M in 0,00166 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **14,1** °C
Th-Ti **7** °C

S in 6,21 kJ/kg.K
S cold 5,91 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 93,47 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **21,20** °C
DT hot **1,70** °C

COP

Wise 142,52 kJ/kg
COP ise 2,70E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **-2,73** °C
DT cold **-4,53** °C

Wisoterm 116,16 kJ/kg
COP isoterm 3,32E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **99,3** °C
DTreal/Dise **14,20** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 12

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,8** °C

P in **2,5** kgf/cm²
T in **15,4** °C
 μ 0,301 (fração fria)
V cold **9,9** m/s
V hot **24** m/s
T cold **2,8** °C
T hot **21,3** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Propriedades:

Densidade 4,226 Kg/m³ (in)
Densidade 1,185 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,111 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00038 m³/s
m hot 0,00094 m³/s

M cold 0,00045 Kg/s
M hot 0,00105 Kg/s
M in 0,0015 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 12,6 °C
Th-Ti 5,9 °C

S in 6,17 kJ/kg.K
S cold 5,90 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 94,15 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,84 °C
DT hot 0,46 °C

COP

Wise 126,21 kJ/kg
COP ise 3,01E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 1,72 °C
DT cold -1,08 °C

Wisoterm 104,97 kJ/kg
COP isoterm 3,62E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 91,3 °C
DTreal/Dise 13,80 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 13

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,8** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **15** °C
 μ 0,261 (fração fria)
V cold **7,8** m/s
V hot **23** m/s
T cold **3,6** °C
T hot **21** °C
 $\varnothing$ entrada **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc **11,4** °C
Th-Ti **6** °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **19,03** °C
DT hot **1,97** °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **-1,99** °C
DT cold **-5,59** °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade **3,628** Kg/m³ (in)
Densidade **1,182** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,112** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,0003** m³/s
m hot **0,0009** m³/s

M cold **0,00035** Kg/s
M hot **0,001** Kg/s
M in **0,00136** Kg/s

Segunda Lei:

S in **6,13** kJ/kg.K
S cold **5,89** kJ/kg.K
S hot **5,78** kJ/kg.K

Niso **94,70** %

COP

Wise **108,14** kJ/kg
COP ise **2,75E-02**

Wisoterm **92,05** kJ/kg
COP isoterm **3,23E-02**

Expansão isoentrópica

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **14,34** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 14

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,8** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **15,5** °C
 μ **0,311** (fração fria)
V cold **7** m/s
V hot **16** m/s
T cold **6,1** °C
T hot **20,8** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Propriedades:

Densidade **3,018** Kg/m³ (in)
Densidade **1,171** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,113** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold **0,00027** m³/s
m hot **0,00063** m³/s

M cold **0,00032** Kg/s
M hot **0,0007** Kg/s
M in **0,00101** Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **9,4** °C
Th-Ti **5,3** °C

S in **6,08** kJ/kg.K
S cold **5,88** kJ/kg.K
S hot **5,78** kJ/kg.K

Niso **95,60** %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **19,74** °C
DT hot **1,06** °C

COP

Wise **87,76** kJ/kg
COP ise **3,33E-02**

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **3,76** °C
DT cold **-2,34** °C

Wisoterm **76,78** kJ/kg
COP isoterm **3,81E-02**

Expansão Isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **11,82** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 19-set-03
Nome: Márcio e Boris

Num.: 15

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 500 mm

Grandezas Medidas:

P amb **704** mmHg
T amb **18,8** °C

P in **1** kgf/cm²
T in **16,6** °C
 μ 0,309 (fração fria)
V cold **6** m/s
V hot **13,7** m/s
T cold **8,2** °C
T hot **20,1** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 8,4 °C
Th-Ti 3,5 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,36 °C
DT hot 0,26 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 8,78 °C
DT cold 0,58 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,405 Kg/m³ (in)
Densidade 1,162 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,115 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00023 m³/s
m hot 0,00054 m³/s

M cold 0,00027 Kg/s
M hot 0,0006 Kg/s
M in 0,00087 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,00 kJ/kg.K
S cold 5,86 kJ/kg.K
S hot 5,78 kJ/kg.K

Niso 96,71 %

COP

Wise 64,23 kJ/kg
COP ise 4,04E-02

Wisoterm 58,08 kJ/kg
COP isoterm 4,47E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 10,56 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.:

16

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

Propriedades:

P amb 700 mmHg

T amb 23,5 °C

P in 3 kgf/cm²

T in 21,5 °C

μ 0,122 (fração fria)

V cold 6,9 m/s

V hot 25,9 m/s

T cold 7,9 °C

T hot 26 °C

ϕ_{entrada} 6 mm

A in 2,83E-05 m²

A cold 3,85E-05 m²

A hot 7,85E-05 m²

Nº Furos 4

Densidade 4,730 Kg/m³ (in)

Densidade 1,157 Kg/m³ (cold)

Densidade 1,087 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00027 m³/s

m hot 0,00203 m³/s

M cold 0,00031 Kg/s

M hot 0,00221 Kg/s

M in 0,00252 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 13,6 °C

Th-Ti 4,5 °C

S in 6,17 kJ/kg.K

S cold 5,86 kJ/kg.K

S hot 5,74 kJ/kg.K

Niso 93,31 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 23,39 °C

DT hot 2,61 °C

COP

Wise 144,82 kJ/kg

COP ise 1,15E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -10,89 °C

DT cold -18,79 °C

Wisoterm 118,03 kJ/kg

COP isoterm 1,41E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico

DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 99,3 °C

DTreal/Dise 13,70 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03
Nome: Márcio

Num.: 17

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 23,5 °C

P in 2,5 kgf/cm²
T in 21,3 °C
 μ 0,151 (fração fria)
V cold 5,1 m/s
V hot 15 m/s
T cold 8 °C
T hot 25,9 °C
 $\varnothing$ entrada 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Propriedades:

Densidade 4,142 Kg/m³ (in)
Densidade 1,157 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,087 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,0002 m³/s
m hot 0,00118 m³/s

M cold 0,00023 Kg/s
M hot 0,00128 Kg/s
M in 0,00151 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 13,3 °C
Th-Ti 4,6 °C

S in 6,13 kJ/kg.K
S cold 5,86 kJ/kg.K
S hot 5,74 kJ/kg.K

Niso 93,94 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 23,66 °C
DT hot 2,24 °C

COP

Wise 128,24 kJ/kg
COP ise 1,56E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -4,66 °C
DT cold -12,66 °C

Wisoterm 106,66 kJ/kg
COP isoterm 1,88E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 91,3 °C
DTreal/Dise 14,57 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 18

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,5 °C
P in	2 kgf/cm ²
T in	20,8 °C
μ	0,094 (fração fria)
V cold	2,7 m/s
V hot	13,5 m/s
T cold	9,7 °C
T hot	25,7 °C
ϕ_{entrada}	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	7,85E-05 m ²
Nº Furos	4

Propriedades:

Densidade	3,556 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,150 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,088 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,0001 m ³ /s
m hot	0,00106 m ³ /s
M cold	0,00012 Kg/s
M hot	0,00115 Kg/s
M in	0,00127 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,09 kJ/kg.K
S cold	5,85 kJ/kg.K
S hot	5,74 kJ/kg.K
Niso	94,46 %

Variação de Temperatura

Ti-Tc	11,1 °C
Th-Ti	4,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,95 °C
DT hot	3,75 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-26,52 °C
DT cold	-36,22 °C

COP

Wise	109,88 kJ/kg
COP ise	9,48E-03

Wisoterm	93,53 kJ/kg
COP isoterm	1,11E-02

Expansão Isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	13,96 %

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 19

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,5 °C
P in	1,5 kgf/cm ²
T in	20,8 °C
μ	0,090 (fração fria)
V cold	2 m/s
V hot	10,3 m/s
T cold	14,5 °C
T hot	25,2 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	7,85E-05 m ²
Nº Furos	4

Propriedades:

Densidade	2,963 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,130 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,090 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	7,7E-05 m ³ /s
m hot	0,00081 m ³ /s
M cold	8,7E-05 Kg/s
M hot	0,00088 Kg/s
M in	0,00097 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	6,3 °C
Th-Ti	4,4 °C

S in	6,04 kJ/kg.K
S cold	5,82 kJ/kg.K
S hot	5,75 kJ/kg.K

Niso 95,27 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,42 °C
DT hot	3,78 °C

COP

Wise	89,18 kJ/kg
COP ise	6,35E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-23,79 °C
DT cold	-38,29 °C

Wisoterm	78,01 kJ/kg
COP isoterm	7,25E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	7,92 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 20

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 23,5 °C

P in 1 kgf/cm²
T in 20,7 °C
 μ 0,058 (fração fria)
V cold 1 m/s
V hot 8,1 m/s
T cold 17,3 °C
T hot 24,8 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Propriedades:

Densidade 2,371 Kg/m³ (in)
Densidade 1,120 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,091 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 3,8E-05 m³/s
m hot 0,00064 m³/s

M cold 4,3E-05 Kg/s
M hot 0,00069 Kg/s
M in 0,00074 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 3,4 °C
Th-Ti 4,1 °C

S in 5,98 kJ/kg.K
S cold 5,80 kJ/kg.K
S hot 5,75 kJ/kg.K

Niso 96,27 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,91 °C
DT hot 3,89 °C

COP

Wise 65,26 kJ/kg
COP ise 3,04E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -45,37 °C
DT cold -62,67 °C

Wisoterm 59,01 kJ/kg
COP isoterm 3,37E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 4,28 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 21

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,1 °C
P in	3 kgf/cm ²
T in	20,6 °C
μ	0,075 (fração fria)
V cold	1,8 m/s
V hot	15,6 m/s
T cold	6 °C
T hot	25 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	4,745 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,165 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,091 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	6,9E-05 m ³ /s
m hot	0,00092 m ³ /s

M cold	8,1E-05 Kg/s
M hot	0,001 Kg/s
M in	0,00108 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,18 kJ/kg.K
S cold	5,88 kJ/kg.K
S hot	5,75 kJ/kg.K

Niso 93,24 %

Variação de Temperatura

Ti-Tc	14,6 °C
Th-Ti	4,4 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,78 °C
DT hot	3,22 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-34,05 °C
DT cold	-40,05 °C

COP

Wise	144,62 kJ/kg
COP ise	7,52E-03

Wisoterm	117,87 kJ/kg
COP isoterm	9,23E-03

Expansão isoentrópica

Delta T	99,3 °C
DTreal/Dise	14,70 %

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03
Nome: Márcio

Num.: 22

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 23,1 °C

P in 2,5 kgf/cm²
T in 20,7 °C
 μ 0,065 (fração fria)
V cold 1,5 m/s
V hot 15 m/s
T cold 7,6 °C
T hot 25,2 °C
 $\varnothing_{entrada}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 5,89E-05 m²
Nº Furos 3

Propriedades:

Densidade 4,150 Kg/m³ (in)
Densidade 1,158 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,090 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 5,8E-05 m³/s
m hot 0,00088 m³/s

M cold 6,7E-05 Kg/s
M hot 0,00096 Kg/s
M in 0,00103 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 13,1 °C
Th-Ti 4,5 °C

S in 6,14 kJ/kg.K
S cold 5,87 kJ/kg.K
S hot 5,75 kJ/kg.K

Niso 93,78 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 21,61 °C
DT hot 3,59 °C

COP

Wise 128,07 kJ/kg
COP ise 6,64E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -44,11 °C
DT cold -51,71 °C

Wisoterm 106,51 kJ/kg
COP isoterm 7,98E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 91,3 °C
DTreal/Dise 14,35 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 23

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,1 °C
P in	2 kgf/cm ²
T in	20,8 °C
μ	0,099 (fração fria)
V cold	1,8 m/s
V hot	11,2 m/s
T cold	11,2 °C
T hot	24 °C
$\phi_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	3,556 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,144 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,094 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	6,9E-05 m ³ /s
m hot	0,00066 m ³ /s

M cold	7,9E-05 Kg/s
M hot	0,00072 Kg/s
M in	0,0008 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,09 kJ/kg.K
S cold	5,84 kJ/kg.K
S hot	5,76 kJ/kg.K
Niso	94,61 %

Variação de Temperatura

Ti-Tc	9,6 °C
Th-Ti	3,2 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,85 °C
DT hot	2,15 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-8,36 °C
DT cold	-19,56 °C

COP

Wise	109,73 kJ/kg
COP ise	8,65E-03

Wisoterm	93,41 kJ/kg
COP isoterm	1,02E-02

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	12,07 %

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 24

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,1 °C
P in	1,5 kgf/cm ²
T in	22 °C
μ	0,034 (fração fria)
V cold	0,9 m/s
V hot	17,6 m/s
T cold	13 °C
T hot	25,1 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	2,951 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,136 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,090 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	3,5E-05 m ³ /s
m hot	0,00104 m ³ /s
M cold	3,9E-05 Kg/s
M hot	0,00113 Kg/s
M in	0,00117 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	9 °C
Th-Ti	3,1 °C

S in	6,03 kJ/kg.K
S cold	5,83 kJ/kg.K
S hot	5,75 kJ/kg.K

Niso	95,35 %
------	---------

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	22,31 °C
DT hot	2,79 °C

COP

Wise	89,06 kJ/kg
COP ise	3,40E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-67,02 °C
DT cold	-80,02 °C

Wisoterm	77,91 kJ/kg
COP isoterm	3,89E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	11,32 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 25

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,1 °C
P in	1 kgf/cm ²
T in	23 °C
μ	0,021 (fração fria)
V cold	0,4 m/s
V hot	12,3 m/s
T cold	16,2 °C
T hot	24,4 °C
$\phi_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	2,353 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,124 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,093 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	1,5E-05 m ³ /s
m hot	0,00072 m ³ /s
M cold	1,7E-05 Kg/s
M hot	0,00079 Kg/s
M in	0,00081 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	6,8 °C
Th-Ti	1,4 °C

S in	5,96 kJ/kg.K
S cold	5,81 kJ/kg.K
S hot	5,75 kJ/kg.K

Niso 96,53 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	23,15 °C
DT hot	1,25 °C

COP

Wise	65,17 kJ/kg
COP ise	2,23E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-41,08 °C
DT cold	-57,28 °C

Wisoterm	58,93 kJ/kg
COP isoterm	2,47E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	8,55 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03
Nome: Márcio

Num.: 26

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 23,8 °C

P in 3 kgf/cm²
T in 21 °C
 μ 0,284 (fração fria)
V cold 8,8 m/s
V hot 23,6 m/s
T cold 4,7 °C
T hot 28,7 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 3,93E-05 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 16,3 °C
Th-Ti 7,7 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 27,47 °C
DT hot 1,23 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 1,60 °C
DT cold -3,10 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,738 Kg/m³ (in)
Densidade 1,170 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,077 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00034 m³/s
m hot 0,00093 m³/s

M cold 0,0004 Kg/s
M hot 0,001 Kg/s
M in 0,00139 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,17 kJ/kg.K
S cold 5,89 kJ/kg.K
S hot 5,72 kJ/kg.K

Niso 93,47 %

COP

Wise 144,97 kJ/kg
COP ise 3,20E-02

Wisoterm 118,15 kJ/kg
COP isoterm 3,92E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 99,3 °C
DTreal/Dise 16,41 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Num.: 27

Nome: Márcio

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	23,8 °C
P in	2,5 kgf/cm ²
T in	20,6 °C
μ	0,458 (fração fria)
V cold	10 m/s
V hot	12,5 m/s
T cold	6,6 °C
T hot	28,5 °C
$\varnothing_{\text{entrada}}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	3,93E-05 m ²
Nº Furos	2

Variação de Temperatura

Ti-Tc	14 °C
Th-Ti	7,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	32,44 °C
DT hot	3,94 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	11,26 °C
DT cold	4,66 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade	4,152 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,162 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,078 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00038 m ³ /s
m hot	0,00049 m ³ /s

M cold	0,00045 Kg/s
M hot	0,00053 Kg/s
M in	0,00098 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,14 kJ/kg.K
S cold	5,87 kJ/kg.K
S hot	5,73 kJ/kg.K

Niso 94,39 %

COP

Wise	128,37 kJ/kg
COP ise	5,00E-02

Wisoterm	106,77 kJ/kg
COP isoterm	6,01E-02

Expansão isoentrópica

Delta T	91,3 °C
DTreal/Dise	15,33 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03

Nome: Márcio

Num.: 28

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 23,8 °C

P in 2 kgf/cm²
T in 20,7 °C
 μ 0,314 (fração fria)
V cold 5,4 m/s
V hot 12,3 m/s
T cold 9,3 °C
T hot 27 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 3,93E-05 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 11,4 °C
Th-Ti 6,3 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 25,91 °C
DT hot 1,09 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 6,92 °C
DT cold -2,38 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 3,557 Kg/m³ (in)
Densidade 1,151 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,083 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00021 m³/s
m hot 0,00048 m³/s

M cold 0,00024 Kg/s
M hot 0,00052 Kg/s
M in 0,00076 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,09 kJ/kg.K
S cold 5,85 kJ/kg.K
S hot 5,74 kJ/kg.K

Niso 94,75 %

COP

Wise 109,99 kJ/kg
COP ise 3,25E-02

Wisoterm 93,63 kJ/kg
COP isoterm 3,82E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 14,34 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03
Nome: Márcio

Num.: 29

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb **700** mmHg
T amb **23,8** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **21,1** °C
 μ 0,292 (fração fria)
V cold **3,6** m/s
V hot **9** m/s
T cold **12,5** °C
T hot **26,8** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 8,6 °C
Th-Ti 5,7 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 24,64 °C
DT hot 2,16 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 7,25 °C
DT cold -5,25 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,960 Kg/m³ (in)
Densidade 1,138 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,084 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00014 m³/s
m hot 0,00035 m³/s

M cold 0,00016 Kg/s
M hot 0,00038 Kg/s
M in 0,00054 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,04 kJ/kg.K
S cold 5,83 kJ/kg.K
S hot 5,74 kJ/kg.K

Niso 95,48 %

COP

Wise 89,27 kJ/kg
COP ise 2,81E-02

Wisoterm 78,09 kJ/kg
COP isoterm 3,21E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 10,82 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 17-out-03
Nome: Márcio

Num.: 30

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 400 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 23,8 °C

P in 1 kgf/cm²
T in 20,8 °C
 μ 0,288 (fração fria)
V cold 3,1 m/s
V hot 7,8 m/s
T cold 15 °C
T hot 25,7 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 3,93E-05 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 5,8 °C
Th-Ti 4,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 23,14 °C
DT hot 2,56 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 8,67 °C
DT cold -6,33 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,371 Kg/m³ (in)
Densidade 1,128 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,088 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00012 m³/s
m hot 0,00031 m³/s

M cold 0,00013 Kg/s
M hot 0,00033 Kg/s
M in 0,00047 Kg/s

Segunda Lei:

S in 5,98 kJ/kg.K
S cold 5,82 kJ/kg.K
S hot 5,74 kJ/kg.K

Niso 96,47 %

COP

Wise 65,33 kJ/kg
COP ise 2,55E-02

Wisoterm 59,07 kJ/kg
COP isoterm 2,82E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 7,29 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 31

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,6 °C
P in	3 kgf/cm ²
T in	16,6 °C
μ	0,128 (fração fria)
V cold	6,3 m/s
V hot	23,1 m/s
T cold	-5 °C
T hot	21,2 °C
ϕ_{entrada}	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	7,85E-05 m ²
Nº Furos	4

Propriedades:

Densidade	4,810 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,213 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,105 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00024 m ³ /s
m hot	0,00181 m ³ /s

M cold	0,00029 Kg/s
M hot	0,002 Kg/s
M in	0,0023 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,20 kJ/kg.K
S cold	5,95 kJ/kg.K
S hot	5,77 kJ/kg.K

Niso	93,46 %
------	---------

Variação de Temperatura

Ti-Tc	21,6 °C
Th-Ti	4,6 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	19,77 °C
DT hot	1,43 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-14,76 °C
DT cold	-9,76 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

COP

Wise	143,40 kJ/kg
COP ise	1,93E-02

Wisoterm	116,87 kJ/kg
COP isoterm	2,36E-02

Expansão isoentrópica

Delta T	99,3 °C
DTreal/Dise	21,75 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 32

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,6 °C
P in	2,5 kgf/cm ²
T in	16,6 °C
μ	0,121 (fração fria)
V cold	5,7 m/s
V hot	22 m/s
T cold	-2,9 °C
T hot	20,8 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	7,85E-05 m ²
Nº Furos	4

Propriedades:

Densidade	4,209 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,203 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,106 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00022 m ³ /s
m hot	0,00173 m ³ /s

M cold	0,00026 Kg/s
M hot	0,00191 Kg/s
M in	0,00218 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	19,5 °C
Th-Ti	4,2 °C

S in	6,16 kJ/kg.K
S cold	5,94 kJ/kg.K
S hot	5,78 kJ/kg.K

Niso	94,03 %
------	---------

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	19,29 °C
DT hot	1,51 °C

COP

Wise	126,99 kJ/kg
COP ise	1,86E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-13,82 °C
DT cold	-10,92 °C

Wisoterm	105,62 kJ/kg
COP isoterm	2,24E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	91,3 °C
DTreal/Dise	21,36 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 33

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 20,6 °C

P in 2 kgf/cm²
T in 16,2 °C
 μ 0,111 (fração fria)
V cold 4,9 m/s
V hot 20,4 m/s
T cold 2,5 °C
T hot 20,3 °C
 $\varnothing$ entrada 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Variação de Temperatura

Ti-Tc 13,7 °C
Th-Ti 4,1 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 17,92 °C
DT hot 2,38 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -16,52 °C
DT cold -19,02 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 3,613 Kg/m³ (in)
Densidade 1,180 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,108 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00019 m³/s
m hot 0,0016 m³/s

M cold 0,00022 Kg/s
M hot 0,00178 Kg/s
M in 0,002 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,12 kJ/kg.K
S cold 5,90 kJ/kg.K
S hot 5,78 kJ/kg.K

Niso 94,62 %

COP

Wise 108,80 kJ/kg
COP ise 1,40E-02

Wisoterm 92,62 kJ/kg
COP isoterm 1,65E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 17,23 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 34

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 20,6 °C

P in 1,5 kgf/cm²
T in 17,5 °C
 μ 0,106 (fração fria)
V cold 3,8 m/s
V hot 16,6 m/s
T cold 6 °C
T hot 20,5 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Variação de Temperatura

Ti-Tc 11,5 °C
Th-Ti 3 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 18,86 °C
DT hot 1,64 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -7,92 °C
DT cold -13,92 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,997 Kg/m³ (in)
Densidade 1,165 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,107 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00015 m³/s
m hot 0,0013 m³/s

M cold 0,00017 Kg/s
M hot 0,00144 Kg/s
M in 0,00161 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,06 kJ/kg.K
S cold 5,88 kJ/kg.K
S hot 5,78 kJ/kg.K

Niso 95,50 %

COP

Wise 88,30 kJ/kg
COP ise 1,37E-02

Wisoterm 77,25 kJ/kg
COP isoterm 1,57E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 14,46 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 35

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,6 °C
P in	1 kgf/cm ²
T in	18,3 °C
μ	0,107 (fração fria)
V cold	2,6 m/s
V hot	11 m/s
T cold	10,4 °C
T hot	20,1 °C
$\varnothing$ entrada	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	7,85E-05 m ²
Nº Furos	4

Propriedades:

Densidade	2,391 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,147 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,109 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,0001 m ³ /s
m hot	0,00086 m ³ /s
M cold	0,00011 Kg/s
M hot	0,00096 Kg/s
M in	0,00107 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	7,9 °C
Th-Ti	1,8 °C

S in	5,99 kJ/kg.K
S cold	5,85 kJ/kg.K
S hot	5,78 kJ/kg.K

Niso	96,60 %
------	---------

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	19,25 °C
DT hot	0,85 °C

COP

Wise	64,62 kJ/kg
COP ise	1,31E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	3,27 °C
DT cold	-7,13 °C

Wisoterm	58,44 kJ/kg
COP isoterm	1,45E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	9,94 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 36

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,8 °C
P in	3 kgf/cm ²
T in	16,4 °C
μ	0,183 (fração fria)
V cold	8 m/s
V hot	25,4 m/s
T cold	-2,1 °C
T hot	21,4 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	4,813 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,200 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,104 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00031 m ³ /s
m hot	0,0015 m ³ /s
M cold	0,00037 Kg/s
M hot	0,00165 Kg/s
M in	0,00202 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	18,5 °C
Th-Ti	5 °C

S in	6,20 kJ/kg.K
S cold	5,93 kJ/kg.K
S hot	5,77 kJ/kg.K

Niso	93,52 %
------	---------

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	20,54 °C
DT hot	0,86 °C

COP

Wise	143,50 kJ/kg
COP ise	2,36E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	-5,96 °C
DT cold	-3,86 °C

Wisoterm	116,95 kJ/kg
COP isoterm	2,89E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	99,3 °C
DTreal/Dise	18,63 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 37

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **700** mmHg
T amb **20,8** °C

P in **2,5** kgf/cm²
T in **17,1** °C
 μ 0,175 (fração fria)
V cold **7,4** m/s
V hot **24,4** m/s
T cold **1,9** °C
T hot **21,5** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **5,89E-05** m²
Nº Furos **3**

Propriedades:

Densidade 4,202 Kg/m³ (in)
Densidade 1,182 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,104 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00028 m³/s
m hot 0,00144 m³/s

M cold 0,00034 Kg/s
M hot 0,00159 Kg/s
M in 0,00192 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 15,2 °C
Th-Ti 4,4 °C

S in 6,16 kJ/kg.K
S cold 5,90 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 94,06 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,33 °C
DT hot 1,17 °C

COP

Wise 127,08 kJ/kg
COP ise 2,09E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -3,63 °C
DT cold -5,53 °C

Wisoterm 105,69 kJ/kg
COP isoterm 2,52E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 91,3 °C
DTreal/Dise 16,65 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 38

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **700** mmHg
T amb **20,8** °C

P in **2** kgf/cm²
T in **17,2** °C
 μ 0,159 (fração fria)
V cold **5,4** m/s
V hot **19,8** m/s
T cold **4,4** °C
T hot **21,1** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **5,89E-05** m²
Nº Furos **3**

Propriedades:

Densidade **3,600** Kg/m³ (in)
Densidade **1,172** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,105** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00021 m³/s
m hot 0,00117 m³/s

M cold 0,00024 Kg/s
M hot 0,00129 Kg/s
M in 0,00153 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **12,8** °C
Th-Ti **3,9** °C

S in **6,12** kJ/kg.K
S cold **5,89** kJ/kg.K
S hot **5,77** kJ/kg.K

Niso **94,71** %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **19,62** °C
DT hot **1,48** °C

COP

Wise **108,88** kJ/kg
COP ise **1,87E-02**

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **-3,45** °C
DT cold **-7,85** °C

Wisoterm **92,68** kJ/kg
COP isoterm **2,19E-02**

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **16,10** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 39

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,8 °C
P in	1,5 kgf/cm ²
T in	17,3 °C
μ	0,174 (fração fria)
V cold	5,2 m/s
V hot	16,9 m/s
T cold	8 °C
T hot	20,8 °C
$\varnothing$ entrada	17,3 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	2,999 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,157 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,106 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,0002 m ³ /s
m hot	0,001 m ³ /s
M cold	0,00023 Kg/s
M hot	0,0011 Kg/s
M in	0,00133 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	9,3 °C
Th-Ti	3,5 °C

S in	6,06 kJ/kg.K
S cold	5,86 kJ/kg.K
S hot	5,78 kJ/kg.K

Niso 95,52 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	19,25 °C
DT hot	1,55 °C

COP

Wise	88,36 kJ/kg
COP ise	1,83E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	0,65 °C
DT cold	-7,35 °C

Wisoterm	77,30 kJ/kg
COP isoterm	2,09E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
 DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	11,70 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 40

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,8 °C
P in	1 kgf/cm ²
T in	18,2 °C
μ	0,182 (fração fria)
V cold	4,2 m/s
V hot	12,7 m/s
T cold	12,2 °C
T hot	20,7 °C
$\varnothing$ entrada	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	5,89E-05 m ²
Nº Furos	3

Propriedades:

Densidade	2,392 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,140 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,107 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00016 m ³ /s
m hot	0,00075 m ³ /s
M cold	0,00018 Kg/s
M hot	0,00083 Kg/s
M in	0,00101 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	6 °C
Th-Ti	2,5 °C

S in	5,99 kJ/kg.K
S cold	5,83 kJ/kg.K
S hot	5,78 kJ/kg.K

Niso 96,58 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	19,53 °C
DT hot	1,17 °C

COP

Wise	64,67 kJ/kg
COP ise	1,69E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	6,96 °C
DT cold	-5,24 °C

Wisoterm	58,48 kJ/kg
COP isoterm	1,87E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	7,55 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 41

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb 700 mmHg
T amb 20,8 °C

P in 3 kgf/cm²
T in 17,4 °C
 μ 0,260 (fração fria)
V cold 10,1 m/s
V hot 30,3 m/s
T cold 3,8 °C
T hot 24,4 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 3,93E-05 m²
Nº Furos 2

Propriedades:

Densidade 4,797 Kg/m³ (in)
Densidade 1,174 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,093 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00039 m³/s
m hot 0,00119 m³/s

M cold 0,00046 Kg/s
M hot 0,0013 Kg/s
M in 0,00176 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 13,6 °C
Th-Ti 7 °C

S in 6,20 kJ/kg.K
S cold 5,89 kJ/kg.K
S hot 5,75 kJ/kg.K

Niso 93,41 %

Primeira Lei: (base em T cold)

COP

T hot t 22,17 °C
DT hot 2,23 °C

Wise 143,50 kJ/kg
COP ise 2,46E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

Wisoterm 116,95 kJ/kg
COP isoterm 3,02E-02

T cold t -2,55 °C
DT cold -6,35 °C

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 99,3 °C
DTreal/Dise 13,70 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Nome: Boris

Num.: 42

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,6 °C
P in	2,5 kgf/cm ²
T in	17,6 °C
μ	0,304 (fração fria)
V cold	9,4 m/s
V hot	22,5 m/s
T cold	4,2 °C
T hot	22,5 °C
$\varnothing$ entrada	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	3,93E-05 m ²
Nº Furos	2

Propriedades:

Densidade	4,194 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,172 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,100 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00036 m ³ /s
m hot	0,00088 m ³ /s

M cold	0,00042 Kg/s
M hot	0,00097 Kg/s
M in	0,0014 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc	13,4 °C
Th-Ti	4,9 °C

S in	6,16 kJ/kg.K
S cold	5,89 kJ/kg.K
S hot	5,77 kJ/kg.K

Niso	94,24 %
------	---------

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	23,45 °C
DT hot	0,95 °C

COP

Wise	126,99 kJ/kg
COP ise	3,21E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	6,37 °C
DT cold	2,17 °C

Wisoterm	105,62 kJ/kg
COP isoterm	3,85E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T	91,3 °C
DTreal/Dise	14,68 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 43

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,6 °C
P in	2 kgf/cm ²
T in	17,9 °C
μ	0,297 (fração fria)
V cold	8,1 m/s
V hot	19,9 m/s
T cold	6,2 °C
T hot	22,2 °C
$\varnothing$ entrada	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	3,93E-05 m ²
Nº Furos	2

Variação de Temperatura

Ti-Tc	11,7 °C
Th-Ti	4,3 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	22,83 °C
DT hot	0,63 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	7,70 °C
DT cold	1,50 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade	3,591 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,164 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,101 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00031 m ³ /s
m hot	0,00078 m ³ /s
M cold	0,00036 Kg/s
M hot	0,00086 Kg/s
M in	0,00122 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,11 kJ/kg.K
S cold	5,88 kJ/kg.K
S hot	5,77 kJ/kg.K

Niso 94,89 %

COP

Wise	108,80 kJ/kg
COP ise	3,19E-02

Wisoterm	92,62 kJ/kg
COP isoterm	3,75E-02

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	14,72 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03

Num.: 44

Nome: Boris

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb	700 mmHg
T amb	20,6 °C
P in	1,5 kgf/cm ²
T in	18 °C
μ	0,281 (fração fria)
V cold	6,2 m/s
V hot	16,3 m/s
T cold	8,3 °C
T hot	21,9 °C
$\varnothing_{entrada}$	6 mm
A in	2,83E-05 m ²
A cold	3,85E-05 m ²
A hot	3,93E-05 m ²
Nº Furos	2

Propriedades:

Densidade	2,992 Kg/m ³	(in)
Densidade	1,155 Kg/m ³	(cold)
Densidade	1,102 Kg/m ³	(hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold	0,00024 m ³ /s
m hot	0,00064 m ³ /s
M cold	0,00028 Kg/s
M hot	0,00071 Kg/s
M in	0,00098 Kg/s

Segunda Lei:

S in	6,06 kJ/kg.K
S cold	5,86 kJ/kg.K
S hot	5,77 kJ/kg.K
Niso	95,65 %

Variação de Temperatura

Ti-Tc	9,7 °C
Th-Ti	3,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t	21,79 °C
DT hot	0,11 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t	8,02 °C
DT cold	-0,28 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

COP

Wise	88,30 kJ/kg
COP ise	3,09E-02

Wisoterm	77,25 kJ/kg
COP isoterm	3,53E-02

Expansão isoentrópica

Delta T	79,51 °C
DTreal/Dise	12,20 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 27-out-03
Nome: Boris

Num.: 45

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 300 mm

Grandezas Medidas:

P amb **700** mmHg
T amb **20,6** °C

P in **1** kgf/cm²
T in **18,5** °C
 μ 0,247 (fração fria)
V cold **4** m/s
V hot **12,3** m/s
T cold **12,8** °C
T hot **21,3** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Propriedades:

Densidade **2,389** Kg/m³ (in)
Densidade **1,137** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,104** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00015 m³/s
m hot 0,00048 m³/s

M cold 0,00018 Kg/s
M hot 0,00053 Kg/s
M in 0,00071 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc **5,7** °C
Th-Ti **2,8** °C

S in 5,99 kJ/kg.K
S cold 5,83 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 96,60 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t **20,37** °C
DT hot **0,93** °C

COP

Wise 64,62 kJ/kg
COP ise 2,18E-02

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t **9,97** °C
DT cold **-2,83** °C

Wisoterm 58,44 kJ/kg
COP isoterm 2,41E-02

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T **79,51** °C
DTreal/Dise **7,17** %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 46

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb 702 mmHg
T amb 20,5 °C

P in 3 kgf/cm²
T in 17,2 °C
 μ 0,100 (fração fria)
V cold 5,6 m/s
V hot 26 m/s
T cold 9,9 °C
T hot 23,3 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Variação de Temperatura

Ti-Tc 7,3 °C
Th-Ti 6,1 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 18,01 °C
DT hot 5,29 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -37,99 °C
DT cold -47,89 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,800 Kg/m³ (in)
Densidade 1,152 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,100 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00022 m³/s
m hot 0,00204 m³/s

M cold 0,00025 Kg/s
M hot 0,00225 Kg/s
M in 0,00249 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,20 kJ/kg.K
S cold 5,85 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 93,07 %

COP

Wise 143,35 kJ/kg
COP ise 5,07E-03

Wisoterm 116,83 kJ/kg
COP isoterm 6,22E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 99,3 °C
DTreal/Dise 7,35 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 47

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb 702 mmHg
T amb 20,5 °C

P in 2,5 kgf/cm²
T in 17,4 °C
 μ 0,099 (fração fria)
V cold 4,9 m/s
V hot 22,7 m/s
T cold 12,2 °C
T hot 22,8 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Propriedades:

Densidade 4,197 Kg/m³ (in)
Densidade 1,143 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,102 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00019 m³/s
m hot 0,00178 m³/s

M cold 0,00022 Kg/s
M hot 0,00196 Kg/s
M in 0,00218 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 5,2 °C
Th-Ti 5,4 °C

S in 6,16 kJ/kg.K
S cold 5,83 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 93,69 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 17,97 °C
DT hot 4,83 °C

COP

Wise 126,95 kJ/kg
COP ise 4,05E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -31,83 °C
DT cold -44,03 °C

Wisoterm 105,58 kJ/kg
COP isoterm 4,87E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 91,3 °C
DTreal/Dise 5,70 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 48

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb 702 mmHg
T amb 20,5 °C

P in 2 kgf/cm²
T in 18,1 °C
 μ 0,098 (fração fria)
V cold 3,9 m/s
V hot 18,2 m/s
T cold 13,4 °C
T hot 22,6 °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 7,85E-05 m²
Nº Furos 4

Propriedades:

Densidade 3,589 Kg/m³ (in)
Densidade 1,138 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,103 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00015 m³/s
m hot 0,00143 m³/s

M cold 0,00017 Kg/s
M hot 0,00158 Kg/s
M in 0,00175 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,11 kJ/kg.K
S cold 5,83 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 94,45 %

Variação de Temperatura

Ti-Tc 4,7 °C
Th-Ti 4,5 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 18,61 °C
DT hot 3,99 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -23,42 °C
DT cold -36,82 °C

COP

Wise 108,77 kJ/kg
COP ise 4,23E-03

Wisoterm 92,59 kJ/kg
COP isoterm 4,96E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 5,91 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 49

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb **702** mmHg
T amb **20,5** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **18,4** °C
 μ 0,104 (fração fria)
V cold **3,4** m/s
V hot **14,7** m/s
T cold **15,6** °C
T hot **22,5** °C
 $\varnothing_{\text{entrada}}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **7,85E-05** m²
Nº Furos **4**

Propriedades:

Densidade **2,988** Kg/m³ (in)
Densidade **1,129** Kg/m³ (cold)
Densidade **1,103** Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00013 m³/s
m hot 0,00115 m³/s

M cold 0,00015 Kg/s
M hot 0,00127 Kg/s
M in 0,00142 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 2,8 °C
Th-Ti 4,1 °C

S in 6,06 kJ/kg.K
S cold 5,81 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 95,29 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 18,72 °C
DT hot 3,78 °C

COP

Wise 88,27 kJ/kg
COP ise 3,30E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -16,93 °C
DT cold -32,53 °C

Wisoterm 77,22 kJ/kg
COP isoterm 3,77E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 3,52 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 50

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb **702** mmHg
T amb **20,5** °C

P in **1** kgf/cm²
T in **19,3** °C
 μ 0,090 (fração fria)
V cold **2,3** m/s
V hot **11,6** m/s
T cold **17,5** °C
T hot **22,4** °C
 ϕ_{entrada} **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **7,85E-05** m²
Nº Furos **4**

Propriedades:

Densidade 2,383 Kg/m³ (in)
Densidade 1,122 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,103 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 8,9E-05 m³/s
m hot 0,00091 m³/s

M cold 9,9E-05 Kg/s
M hot 0,00101 Kg/s
M in 0,0011 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 1,8 °C
Th-Ti 3,1 °C

S in 5,99 kJ/kg.K
S cold 5,80 kJ/kg.K
S hot 5,77 kJ/kg.K

Niso 96,38 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 19,48 °C
DT hot 2,92 °C

COP

Wise 64,60 kJ/kg
COP ise 2,51E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -12,08 °C
DT cold -29,58 °C

Wisoterm 58,42 kJ/kg
COP isoterm 2,77E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 2,26 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 51

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb 702 mmHg
T amb 20,5 °C

P in 3 kgf/cm²
T in 18,7 °C
 μ 0,141 (fração fria)
V cold 5,5 m/s
V hot 22,9 m/s
T cold 10,5 °C
T hot 23,6 °C
 $\varnothing$ entrada 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 5,89E-05 m²
Nº Furos 3

Variação de Temperatura

Ti-Tc 8,2 °C
Th-Ti 4,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 20,05 °C
DT hot 3,55 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -11,15 °C
DT cold -21,65 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 4,775 Kg/m³ (in)
Densidade 1,150 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,099 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00021 m³/s
m hot 0,00135 m³/s

M cold 0,00024 Kg/s
M hot 0,00148 Kg/s
M in 0,00173 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,19 kJ/kg.K
S cold 5,85 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 93,24 %

COP

Wise 143,35 kJ/kg
COP ise 8,07E-03

Wisoterm 116,83 kJ/kg
COP isoterm 9,90E-03

Expansão isoentrópica

Delta T 99,3 °C
DTreal/Dise 8,26 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 52

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb 702 mmHg
T amb 20,5 °C

P in 2,5 kgf/cm²
T in 18,8 °C
 μ 0,122 (fração fria)
V cold 4,7 m/s
V hot 23 m/s
T cold 11,8 °C
T hot 23,1 °C
 $\varnothing$ entrada 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 5,89E-05 m²
Nº Furos 3

Propriedades:

Densidade 4,177 Kg/m³ (in)
Densidade 1,144 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,101 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00018 m³/s
m hot 0,00135 m³/s

M cold 0,00021 Kg/s
M hot 0,00149 Kg/s
M in 0,0017 Kg/s

Segunda Lei:

Variação de Temperatura

Ti-Tc 7 °C
Th-Ti 4,3 °C

S in 6,15 kJ/kg.K
S cold 5,84 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 93,84 %

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 19,77 °C
DT hot 3,33 °C

COP

Wise 126,95 kJ/kg
COP ise 6,72E-03

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -12,18 °C
DT cold -23,98 °C

Wisoterm 105,58 kJ/kg
COP isoterm 8,08E-03

Expansão isoentrópica

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Delta T 91,3 °C
DTreal/Dise 7,67 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 53

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb 702 mmHg
T amb 20,5 °C

P in 2 kgf/cm²
T in 16,9 °C
 μ 0,156 (fração fria)
V cold 3,4 m/s
V hot 18,7 m/s
T cold 12,3 °C
T hot 23 °C
 ϕ_{entrada} 6 mm
A in 2,83E-05 m²
A cold 3,85E-05 m²
A hot 3,93E-05 m²
Nº Furos 2

Variação de Temperatura

Ti-Tc 4,6 °C
Th-Ti 6,1 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 17,75 °C
DT hot 5,25 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t -16,10 °C
DT cold -28,40 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 3,604 Kg/m³ (in)
Densidade 1,142 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,101 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00013 m³/s
m hot 0,00073 m³/s

M cold 0,00015 Kg/s
M hot 0,00081 Kg/s
M in 0,00096 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,12 kJ/kg.K
S cold 5,83 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 94,36 %

COP

Wise 108,77 kJ/kg
COP ise 6,60E-03

Wisoterm 92,59 kJ/kg
COP isoterm 7,75E-03

Expansão Isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 5,79 %

Estudo de um Tubo de Hilsch (Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 54

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb **702** mmHg
T amb **20,5** °C

P in **1,5** kgf/cm²
T in **20,2** °C
 μ 0,206 (fração fria)
V cold **4,1** m/s
V hot **16** m/s
T cold **14,3** °C
T hot **23,1** °C
 $\varnothing_{entrada}$ **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 5,9 °C
Th-Ti 2,9 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 21,73 °C
DT hot 1,37 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 8,99 °C
DT cold -5,31 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,969 Kg/m³ (in)
Densidade 1,134 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,101 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00016 m³/s
m hot 0,00063 m³/s

M cold 0,00018 Kg/s
M hot 0,00069 Kg/s
M in 0,00087 Kg/s

Segunda Lei:

S in 6,04 kJ/kg.K
S cold 5,82 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 95,53 %

COP

Wise 88,27 kJ/kg
COP ise 1,37E-02

Wisoterm 77,22 kJ/kg
COP isoterm 1,57E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 7,42 %

Estudo de um Tubo de Hilsch

(Folha de Tomada de dados)

Data: 6-nov-03
Nome: Boris e Marcio

Num.: 55

Modelo Testado (características):

Protótipo P-02 com comprimento do Tubo quente de 200 mm

Grandezas Medidas:

P amb **702** mmHg
T amb **20,5** °C

P in **1** kgf/cm²
T in **20,8** °C
 μ 0,235 (fração fria)
V cold **3,4** m/s
V hot **11,1** m/s
T cold **16,7** °C
T hot **22,8** °C
 $\varnothing$ entrada **6** mm
A in **2,83E-05** m²
A cold **3,85E-05** m²
A hot **3,93E-05** m²
Nº Furos **2**

Variação de Temperatura

Ti-Tc 4,1 °C
Th-Ti 2 °C

Primeira Lei: (base em T cold)

T hot t 22,06 °C
DT hot 0,74 °C

Primeira Lei: (base em T hot)

T cold t 14,27 °C
DT cold -2,43 °C

Definições:

DT hot= T hot real - T hot teorico
DT cold= T cold real - T cold teorico

Propriedades:

Densidade 2,371 Kg/m³ (in)
Densidade 1,125 Kg/m³ (cold)
Densidade 1,102 Kg/m³ (hot)

Vazão (calculada pela velocidade)

m cold 0,00013 m³/s
m hot 0,00044 m³/s

M cold 0,00015 Kg/s
M hot 0,00048 Kg/s
M in 0,00063 Kg/s

Segunda Lei:

S in 5,98 kJ/kg.K
S cold 5,80 kJ/kg.K
S hot 5,76 kJ/kg.K

Niso 96,61 %

COP

Wise 64,60 kJ/kg
COP ise 1,49E-02

Wisoterm 58,42 kJ/kg
COP isoterm 1,65E-02

Expansão isoentrópica

Delta T 79,51 °C
DTreal/Dise 5,16 %

ANEXO H: GRÁFICOS DO PROTÓTIPO P-01

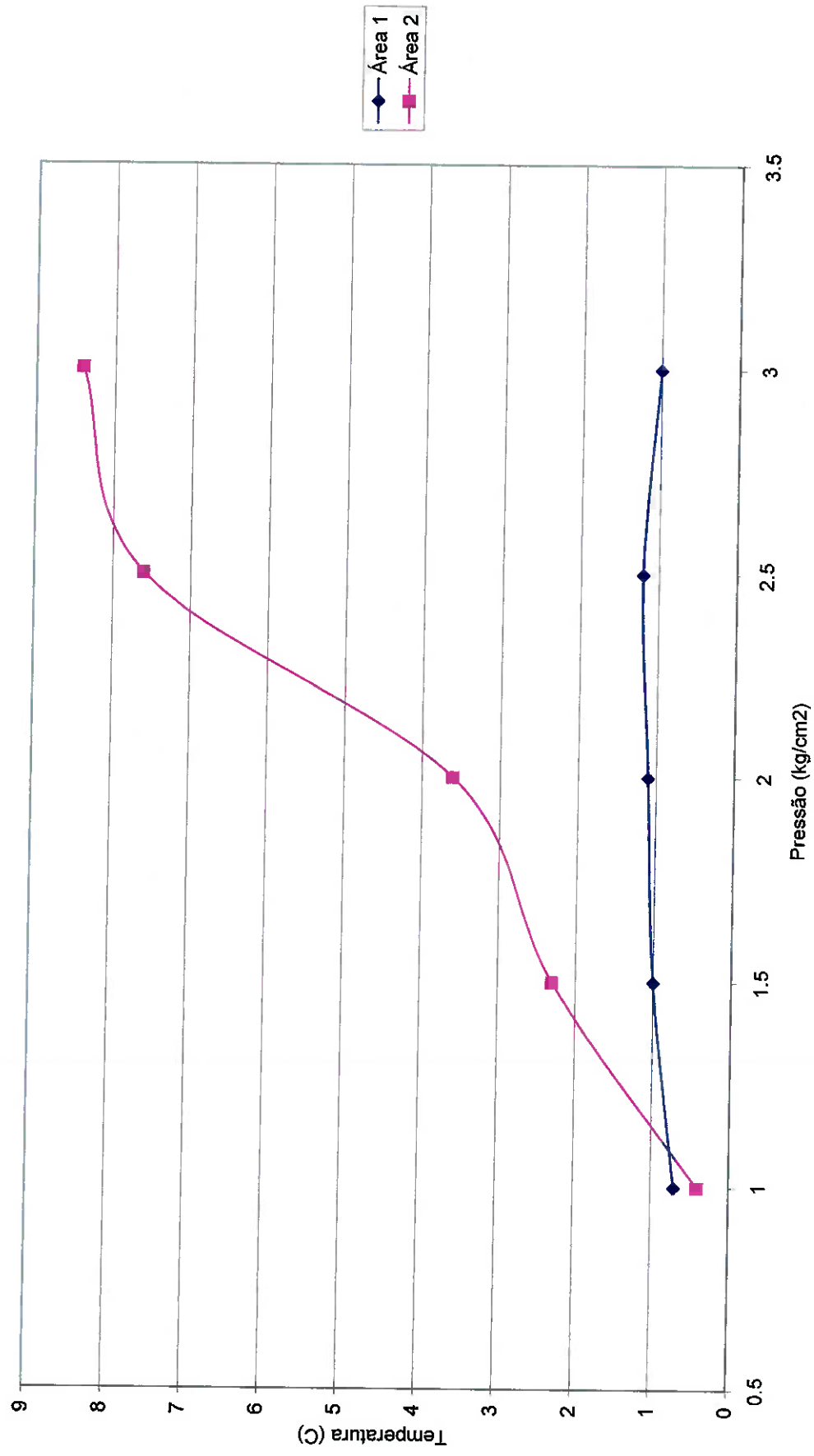
Legenda: Área 1 = 190,8 m²
 Área 2 = 127,2 m²

A Tabela H.01 refere-se à condição de cada ensaio realizado.

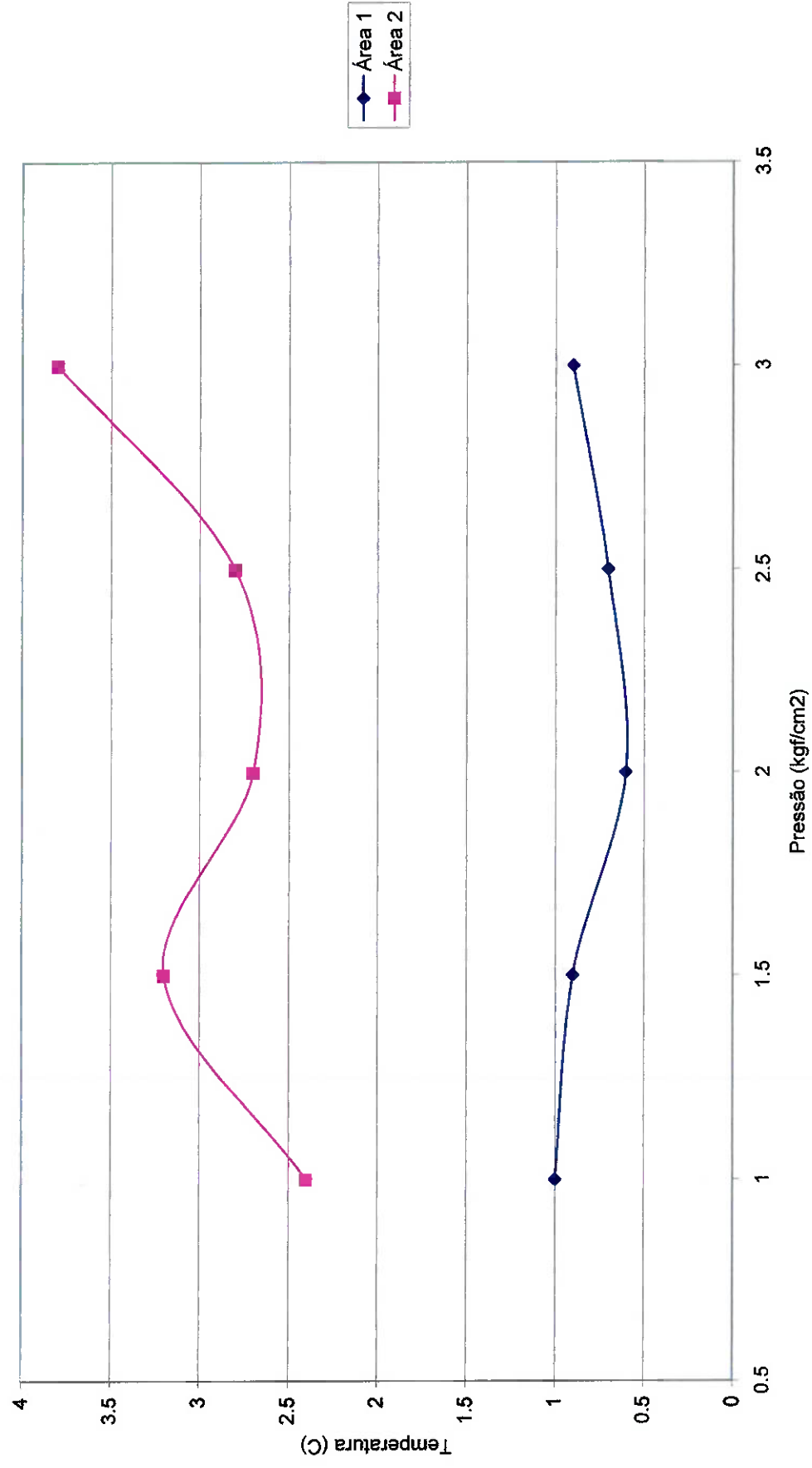
Tabela H.01: Matriz de Ensaio do Protótipo P-01

NUM.	Comp. (m)	Área da Saída Quente (m ²)	Pressão entrada (kgf/cm ²)
1	400	190,86	3
2	400	190,86	2,5
3	400	190,86	2
4	400	190,86	1,5
5	400	190,86	1
6	400	127,24	3
7	400	127,24	2,5
8	400	127,24	2
9	400	127,24	1,5
10	400	127,24	1
11	300	190,86	3
12	300	190,86	2,5
13	300	190,86	2
14	300	190,86	1,5
15	300	190,86	1
16	300	127,24	3
17	300	127,24	2,5
18	300	127,24	2
19	300	127,24	1,5
20	300	127,24	1

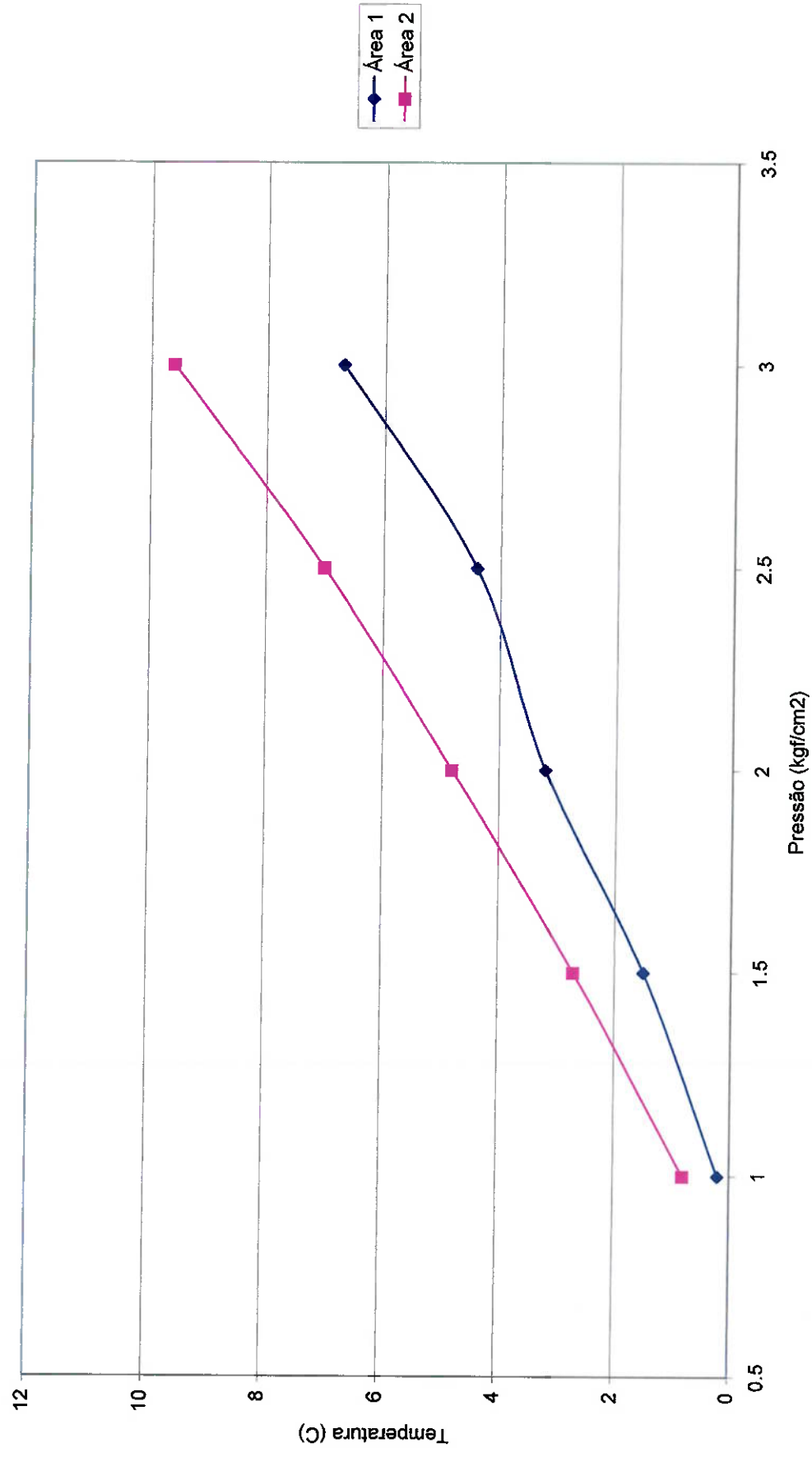
P-01: DT frio - comprimento 400mm



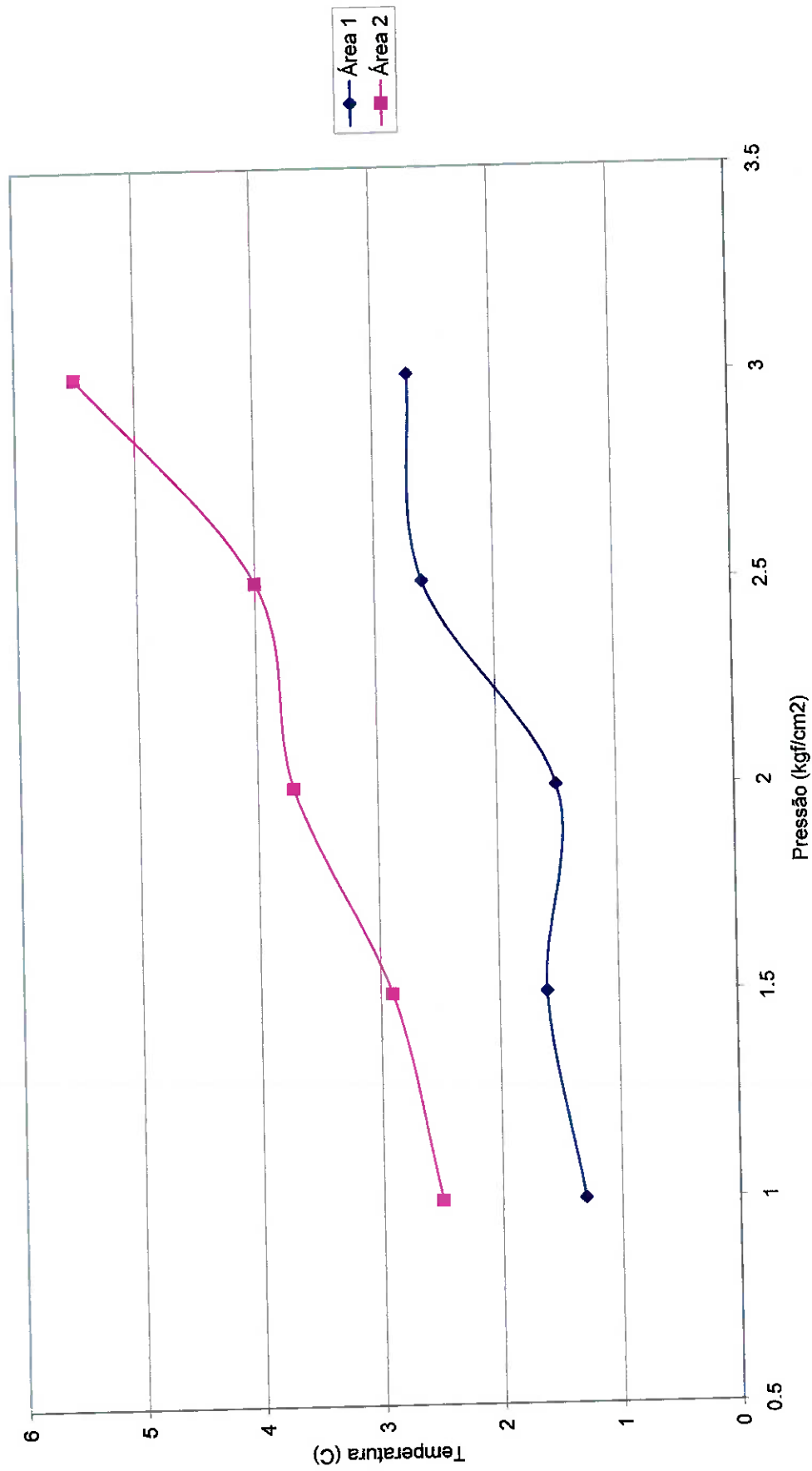
P-01: DT quente - comprimento 400 mm



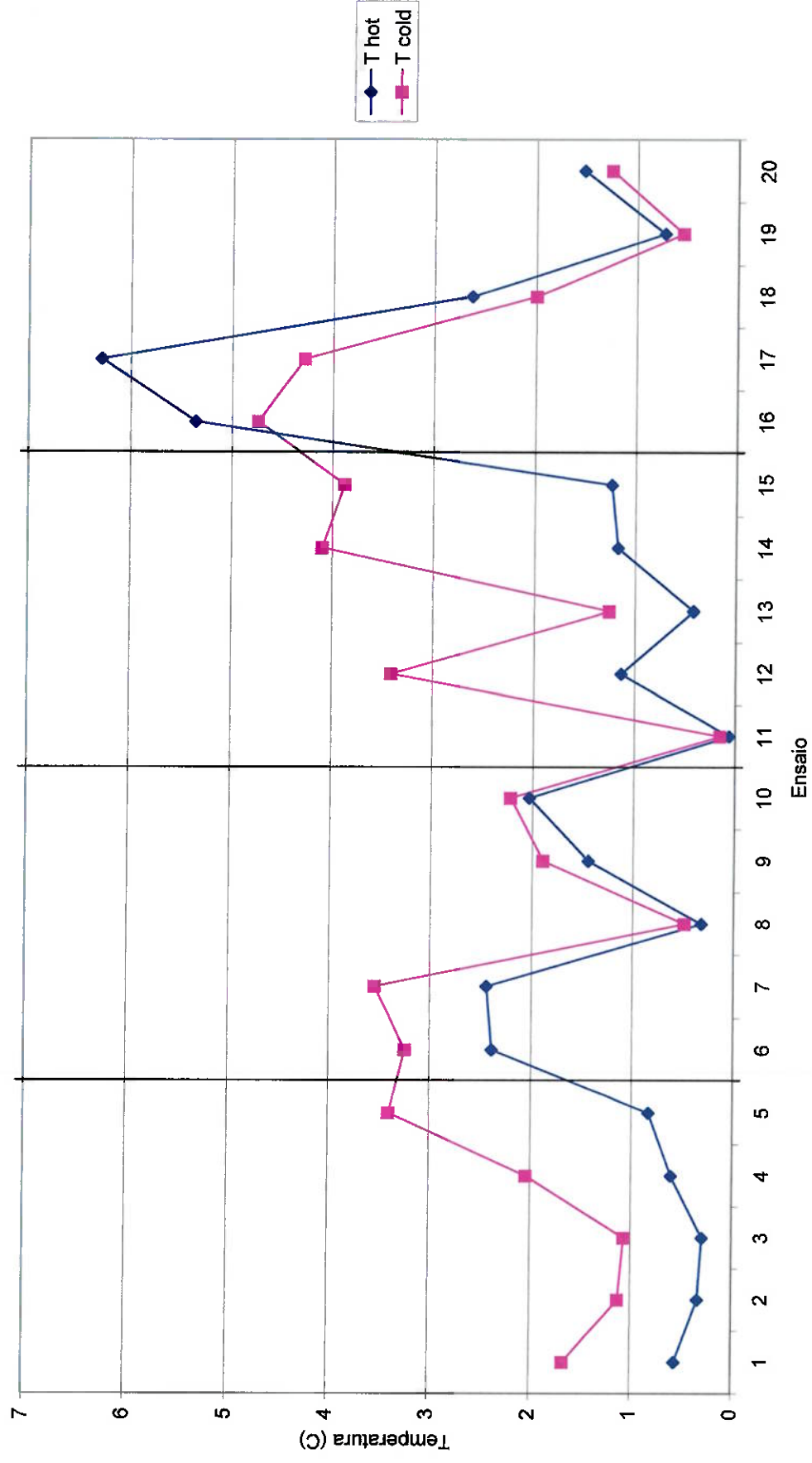
P-01: DT frio - comprimento 300 mm



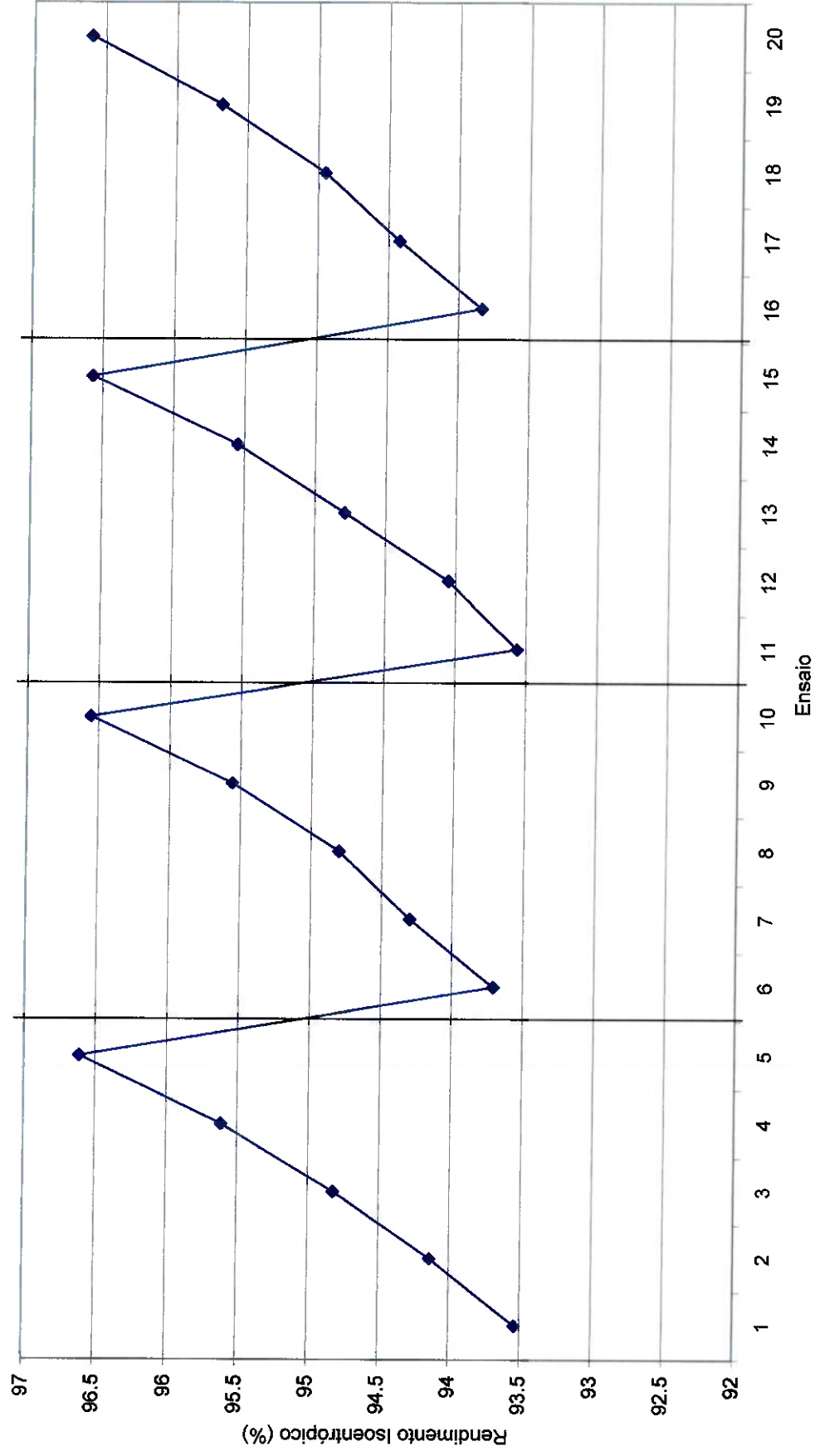
P-01: DT quente - comprimento 300 mm



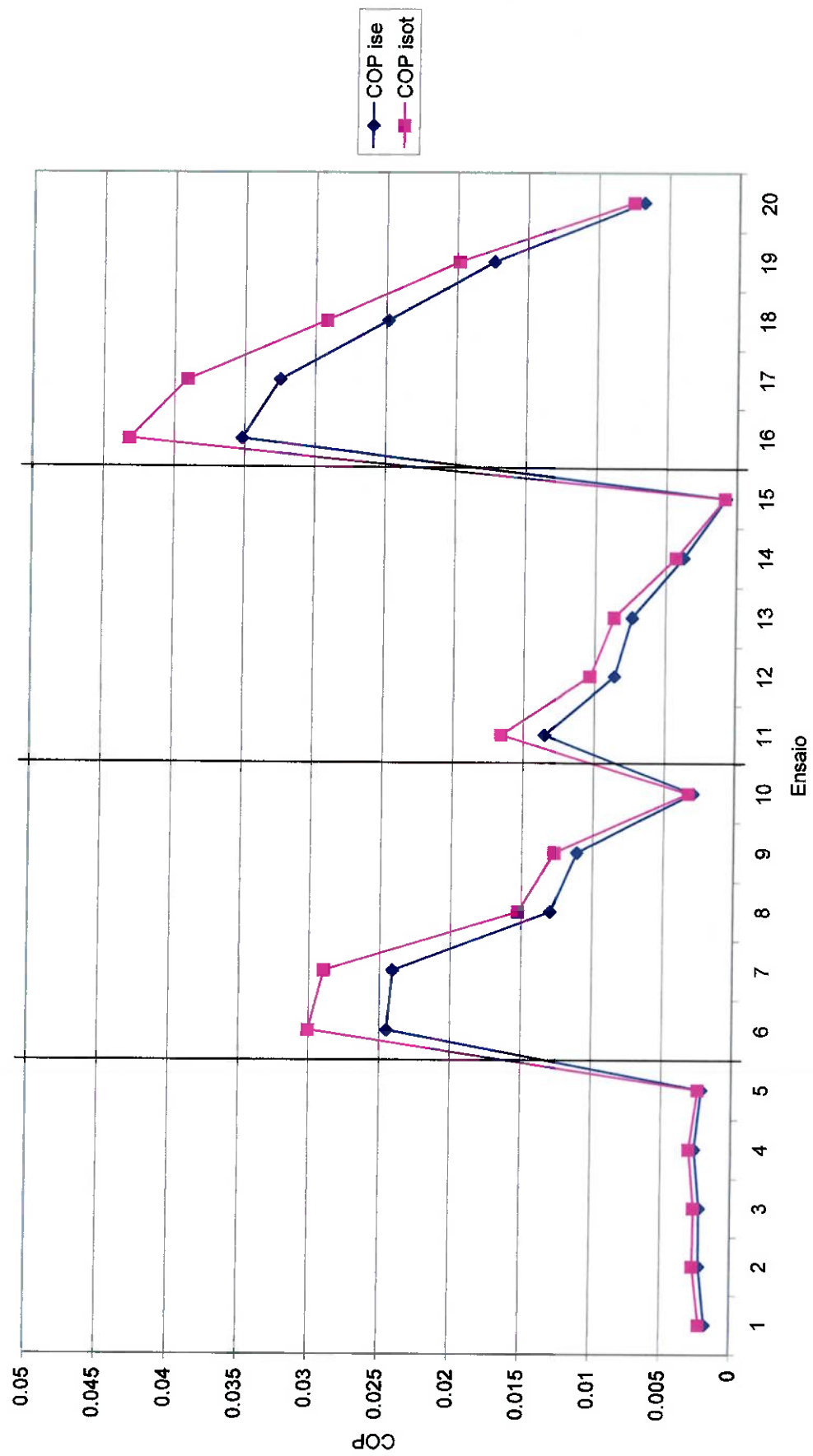
P-01: Afastamento do Processo pela 1 Lei



P-01: Rendimento Isoentrópico



P-01: COP



ANEXO I: GRÁFICOS DO PROTÓTIPO P-02

Legenda: Área 1 = 254,0 mm²
 Área 2 = 191,0 mm²
 Área 2 = 127,0 mm²

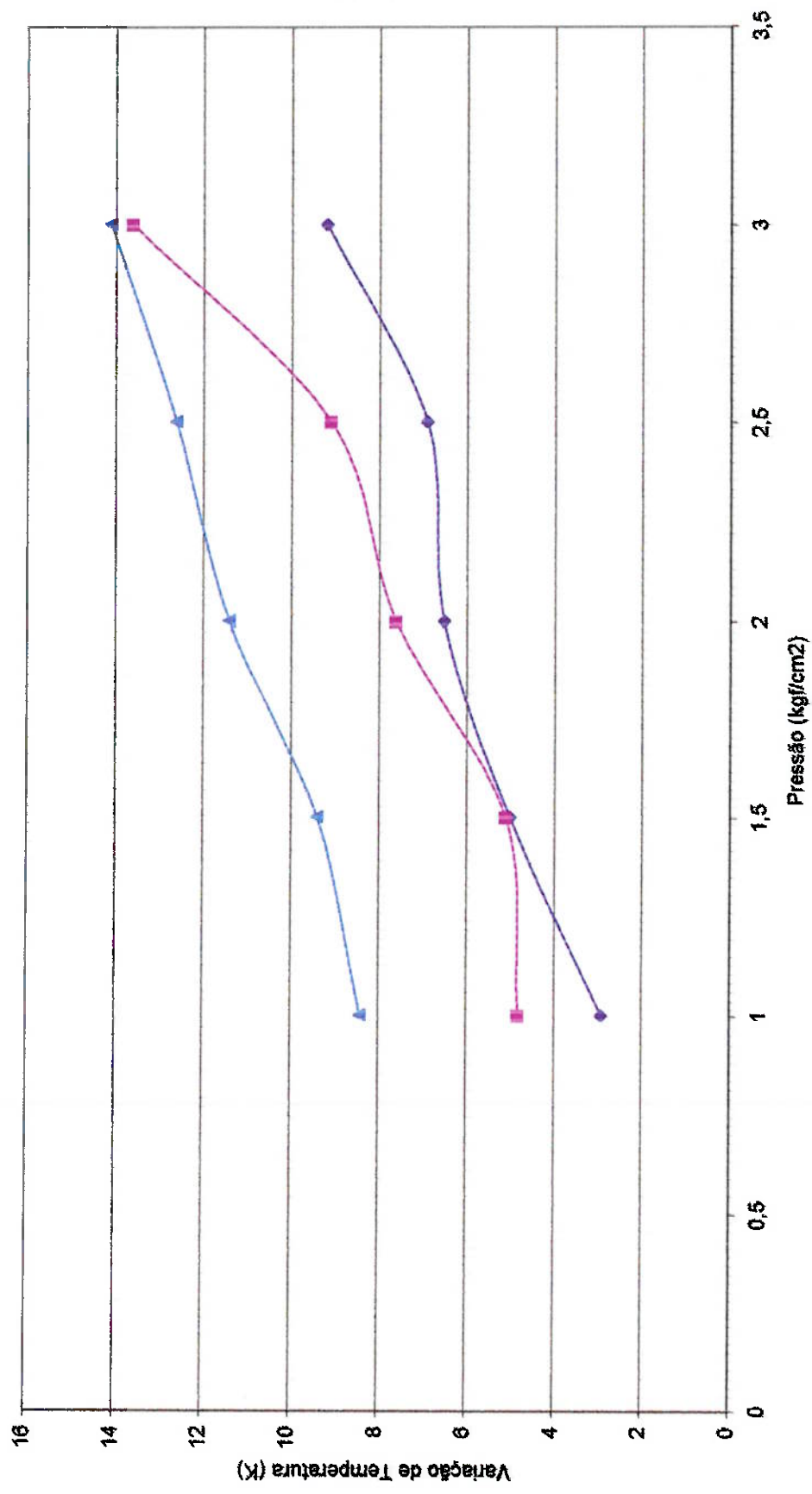
A Tabela I.01 refere-se à condição de cada ensaio realizado.

Tabela I.01: Matriz de Ensaio do Protótipo P-02

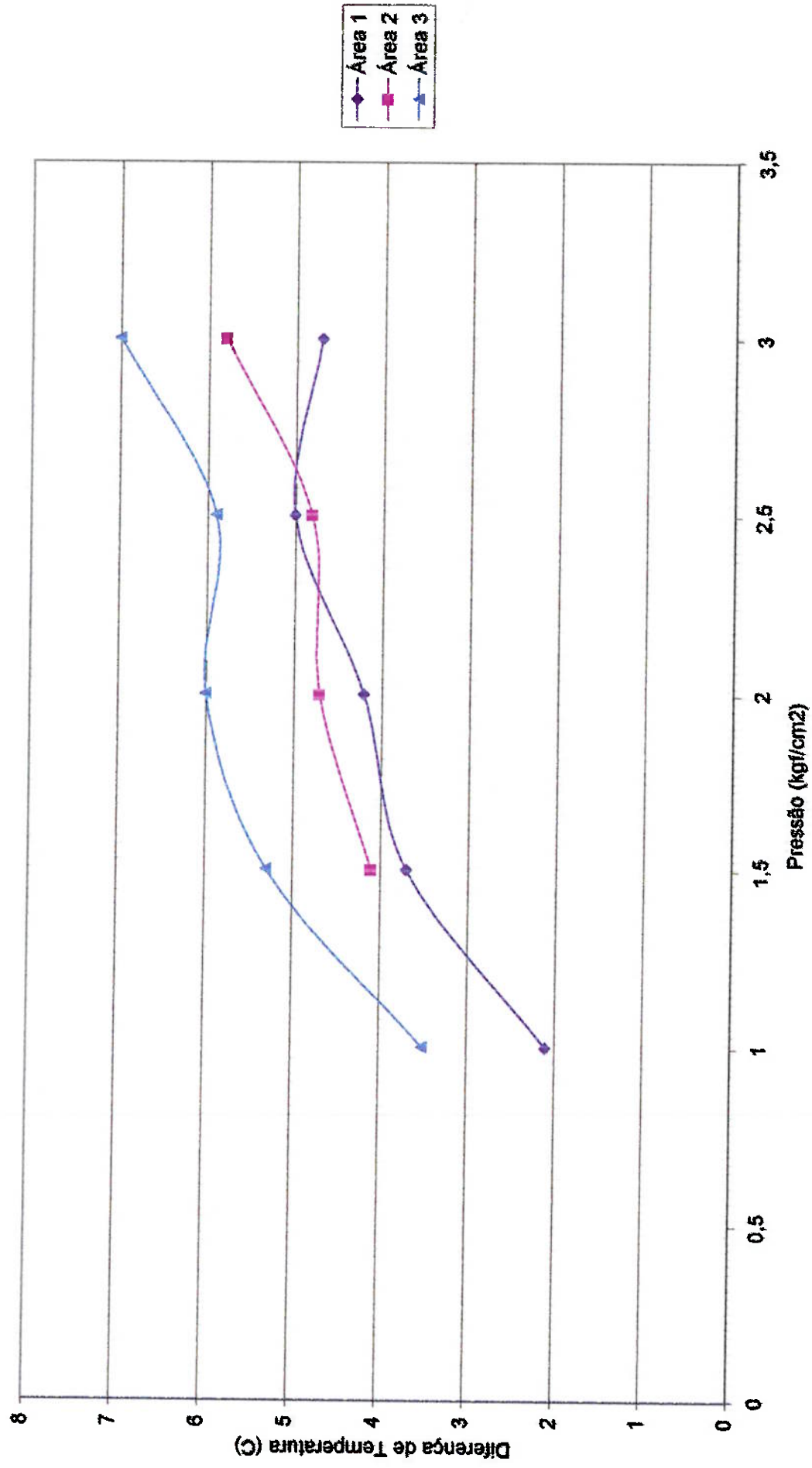
NUM.	Comp. (mm)	Área da saída quente (mm ²)	Pressão entrada (kgf/cm ²)
1	500	2,54E-04	3
2	500	2,54E-04	2,5
3	500	2,54E-04	2
4	500	2,54E-04	1,5
5	500	2,54E-04	1
6	500	1,91E-04	3
7	500	1,91E-04	2,5
8	500	1,91E-04	2
9	500	1,91E-04	1,5
10	500	1,91E-04	1
11	500	1,27E-04	3
12	500	1,27E-04	2,5
13	500	1,27E-04	2
14	500	1,27E-04	1,5
15	500	1,27E-04	1
16	400	2,54E-04	3
17	400	2,54E-04	2,5
18	400	2,54E-04	2
19	400	2,54E-04	1,5
20	400	2,54E-04	1
21	400	1,91E-04	3
22	400	1,91E-04	2,5
23	400	1,91E-04	2
24	400	1,91E-04	1,5
25	400	1,91E-04	1
26	400	1,27E-04	3
27	400	1,27E-04	2,5
28	400	1,27E-04	2
29	400	1,27E-04	1,5
30	400	1,27E-04	1
31	300	2,54E-04	3
32	300	2,54E-04	2,5
33	300	2,54E-04	2
34	300	2,54E-04	1,5
35	300	2,54E-04	1
36	350	1,91E-04	3
37	300	1,91E-04	2,5
38	300	1,91E-04	2
39	300	1,91E-04	1,5
40	300	1,91E-04	1

NUM.	Comp. (m)	Área da saída quente (m ²)	Pressão entrada (kgf/cm ²)
41	300	1,27E-04	3
42	300	1,27E-04	2,5
43	300	1,27E-04	2
44	300	1,27E-04	1,5
45	300	1,27E-04	1
46	200	2,54E-04	3
47	200	2,54E-04	2,5
48	200	2,54E-04	2
49	200	2,54E-04	1,5
50	200	2,54E-04	1
51	200	1,91E-04	3
52	200	1,91E-04	2,5
53	200	1,91E-04	2
54	200	1,91E-04	1,5
55	200	1,91E-04	1

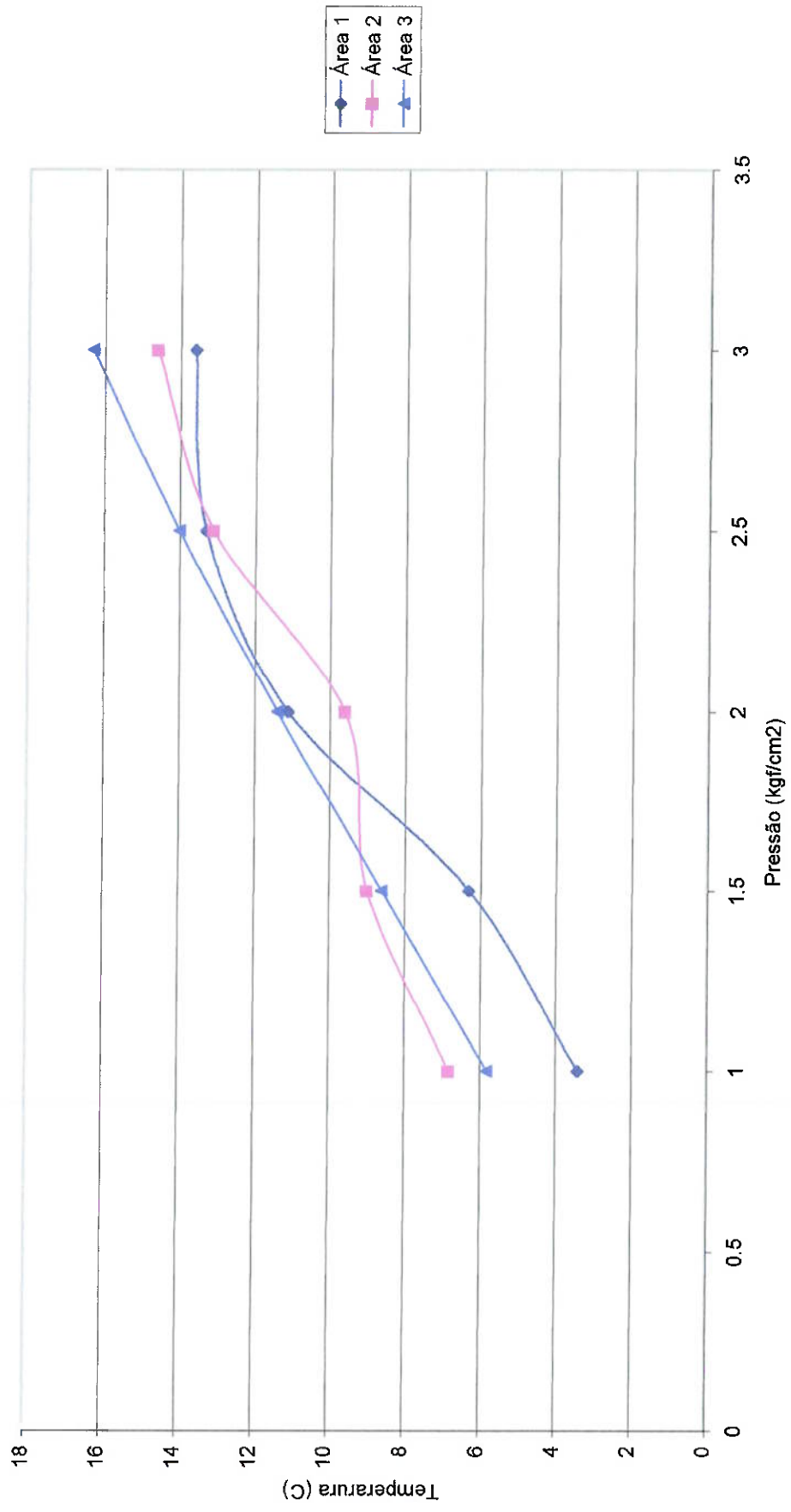
DT frio - Comprimento 500mm



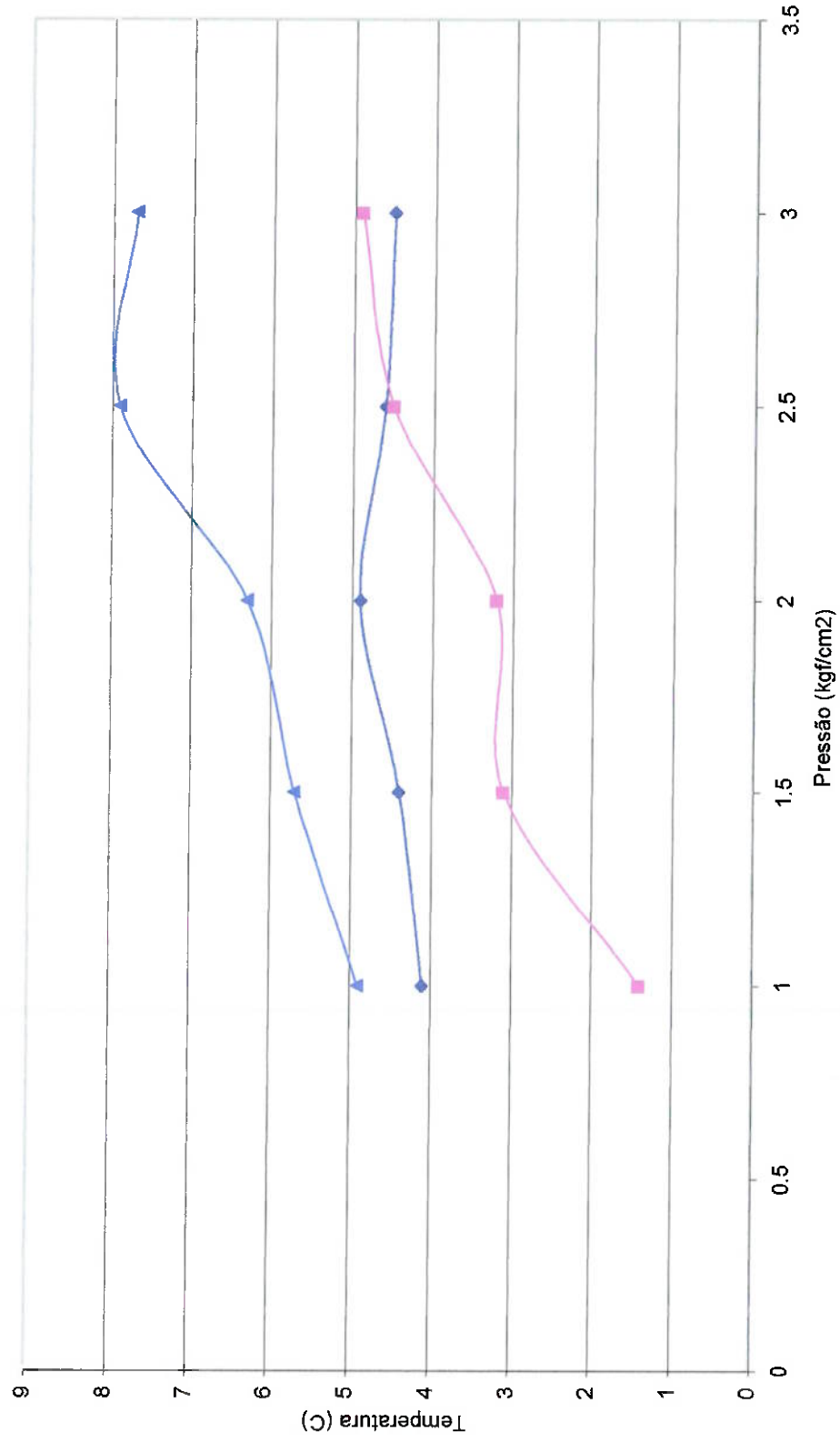
DT quente - Comprimento 500 mm



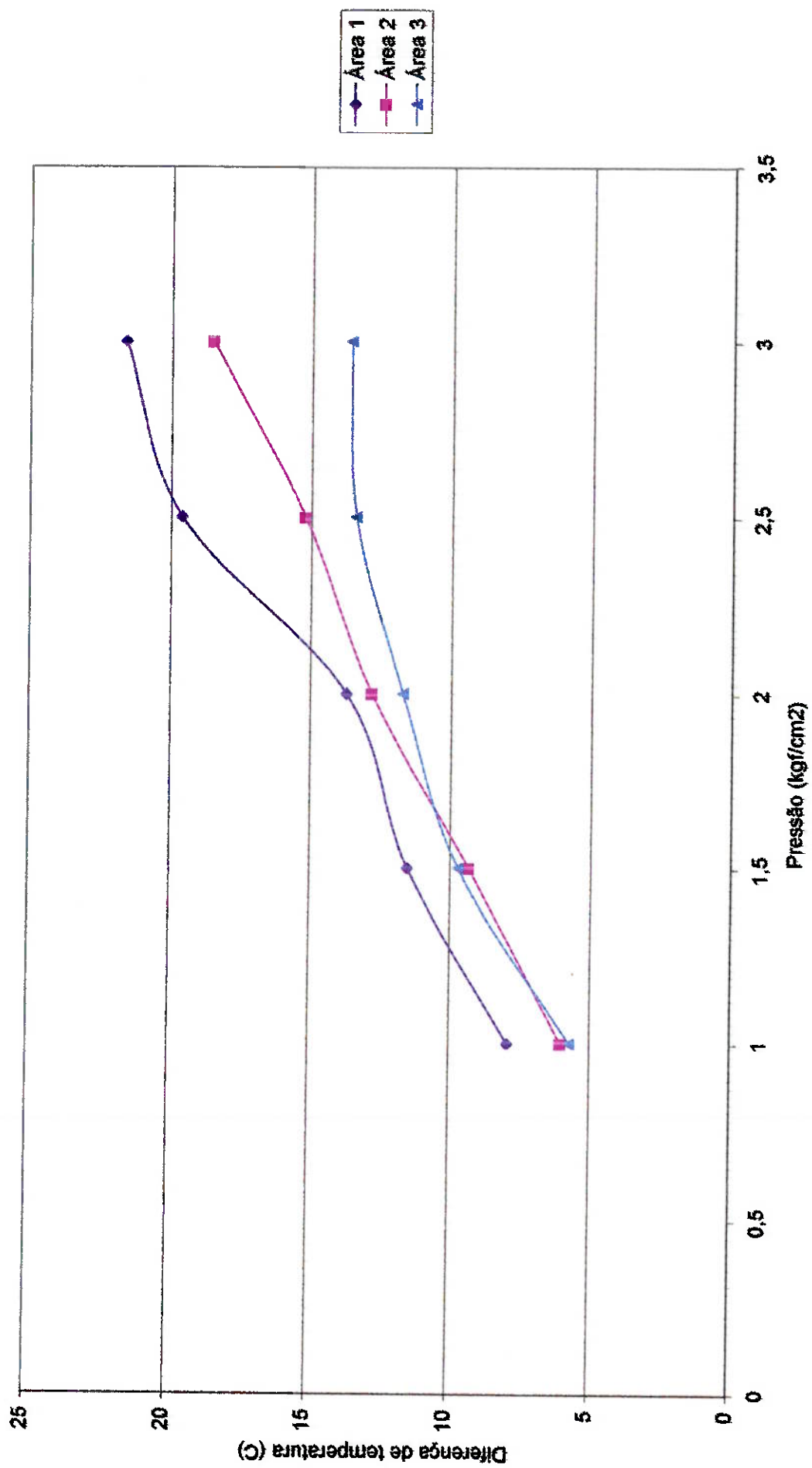
DT frio - Comprimento 400 mm



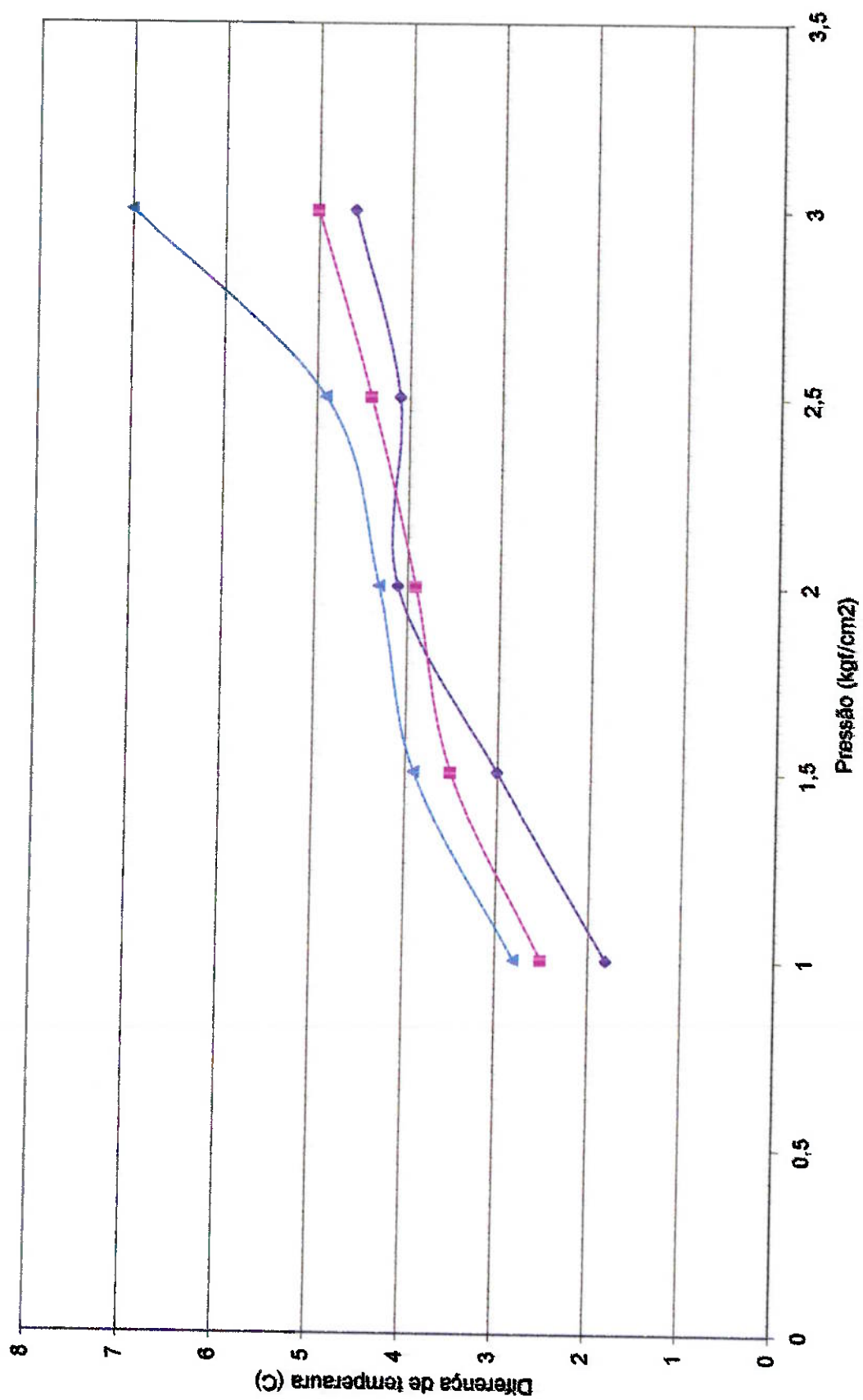
DT quente - Comprimento 400 mm



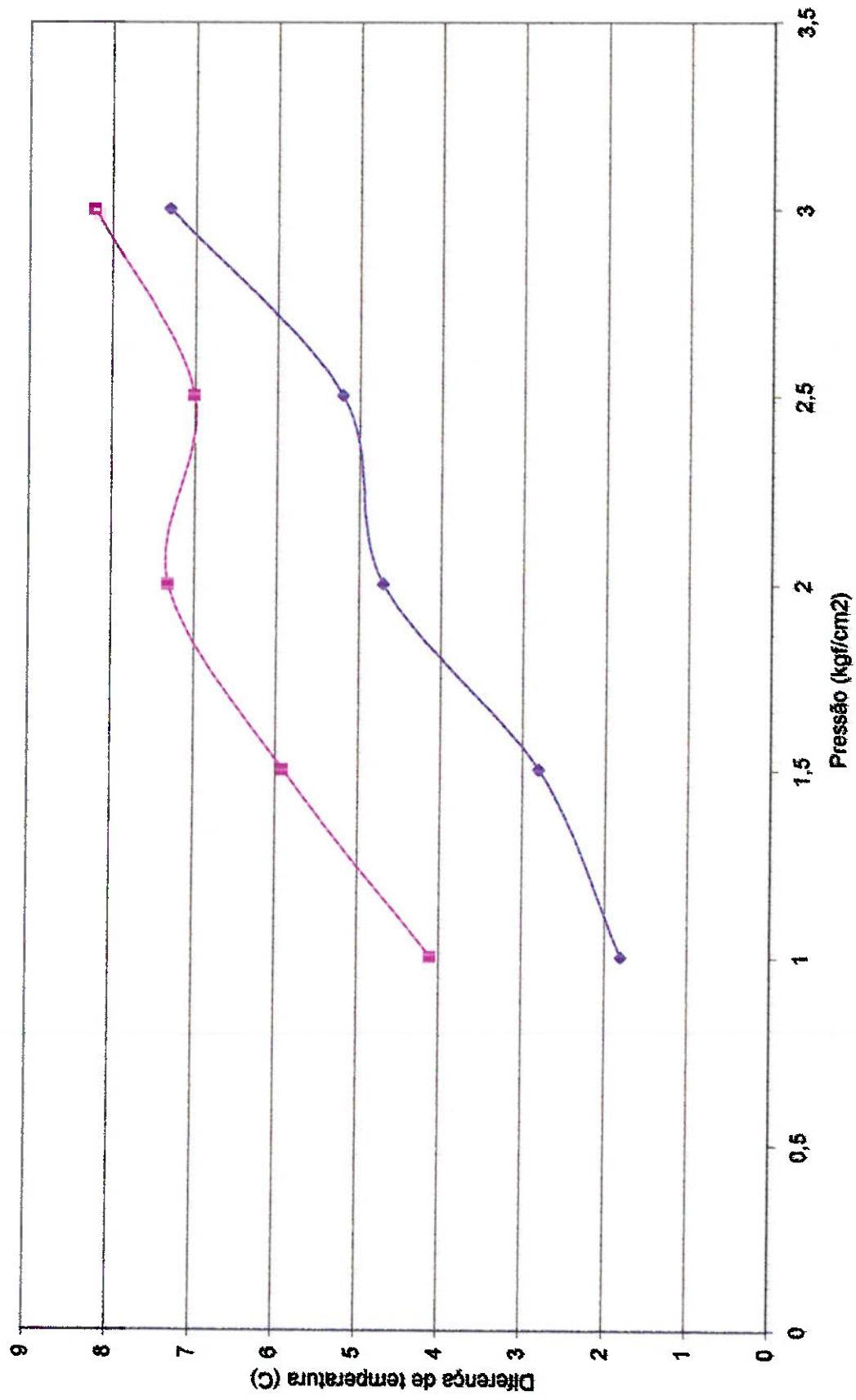
DT frio - Comprimento 300 mm



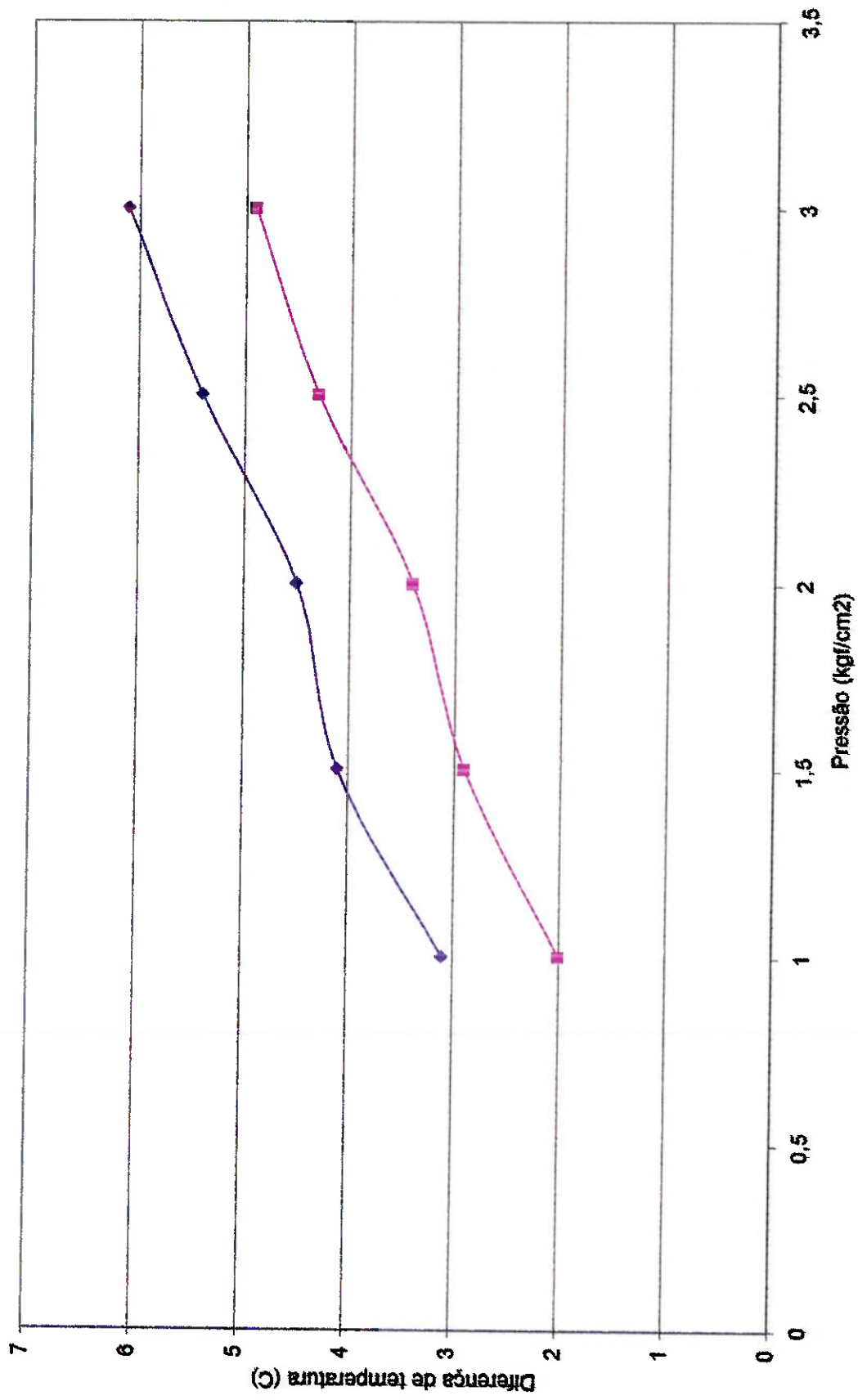
DT quente - Comprimento 300 mm



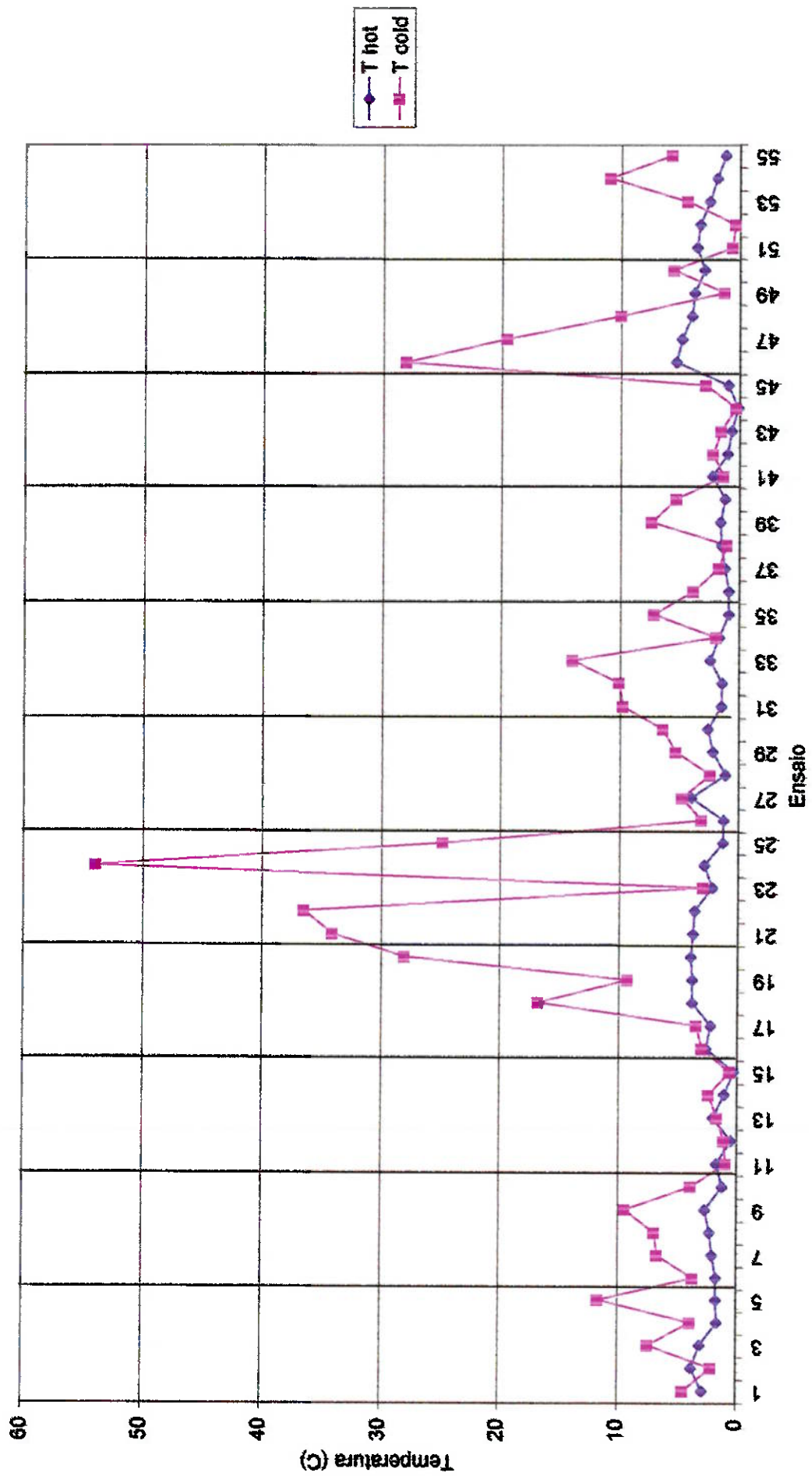
DT frio - Comprimento 200 mm



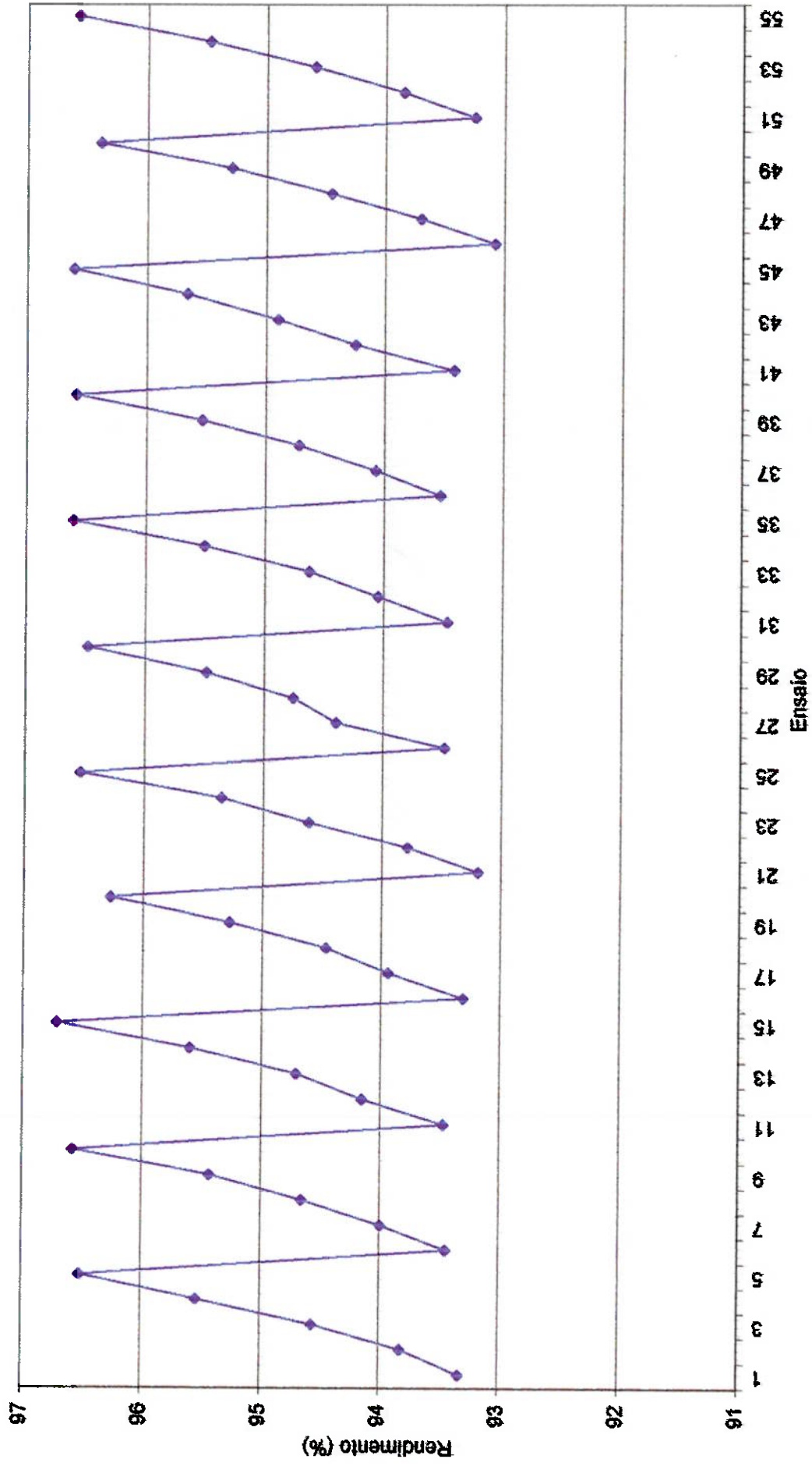
DT quente - Comprimento 200 mm



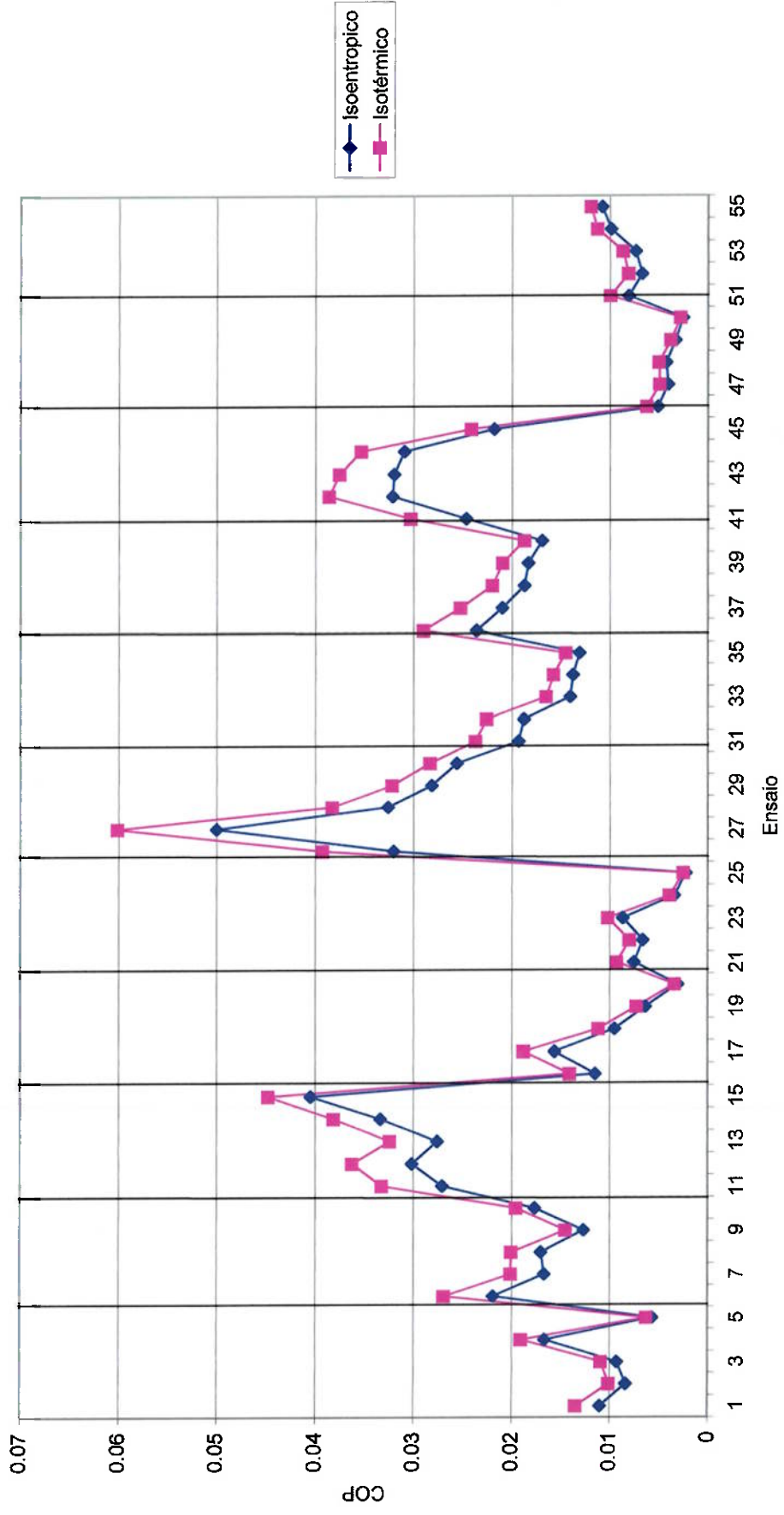
P-02: Afastamento da 1 Lei



P-02: Rendimento Isoentropico



P-02: COP



ANEXO J: ARTIGO TÉCNICO

ESTUDO DE UM TUBO DE HILSCH

Márcio Staschower
marcio_sta@yahoo.com

Boris Rotter
boris.rotter@terra.com.br

Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. *Tubo de Hilsch, Tubo de Ranque-Hilsch ou ainda Tubo de Vortex foi criado por Georges Ranque, físico francês, em 1930, entretanto só tornou-se conhecido pelo meio acadêmico quando estudado por Rudolph Hilsch em 1939. O equipamento consiste basicamente de um tubo cilíndrico onde ar comprimido é injetado tangencialmente à parede do tubo por um bocal. Dentro do tubo o ar escoar em uma trajetória espiral gerando um vórtice. Cada extremidade do tubo possibilita uma saída para o escoamento. Em uma das saídas, a temperatura do escoamento é inferior à temperatura de entrada, já na outra a temperatura é superior à da entrada. Este trabalho tem por objetivo investigar quais e como alguns parâmetros como: pressão de entrada, razões entre as vazões de saída e comprimento do tubo influenciam o desempenho do Tubo de Hilsch.*

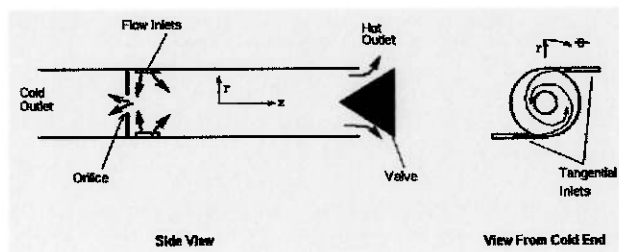
Palavras chave: Ranque, Hilsch, Vortex Tube, Refrigeração.

1. Introdução

O Tubo de Hilsch consiste basicamente de um tubo cilíndrico onde ar comprimido é injetado tangencialmente à parede do tubo por um bocal. Dentro do tubo o ar escoar em uma trajetória espiral gerando um vortex. Cada extremidade do tubo possibilita uma saída para o escoamento.

Na saída mais próxima à entrada, onde o ar consegue sair apenas pela região central (fig. 1), a temperatura do escoamento é inferior à temperatura de entrada. Já na outra saída, mais distante da entrada, o ar somente consegue sair pela periferia do tubo e a temperatura do escoamento é superior a da entrada.

Figura 1. Esquema de funcionamento do Tubo de Hilsch



2. Revisão Bibliográfica

2.1. Primeira Lei da Termodinâmica

Considerando um volume de controle com “n” entradas e “m” saídas podemos escrever a primeira lei da termodinâmica para regime permanente conforme a Eq.(1).

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum_0^n \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e) = \dot{W}_{v.c.} + \sum_0^m \dot{m}_s (h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s) \quad (1)$$

Admiti-se que o Tubo de Hilsch é termicamente isolado, ou seja, não troca calor com o meio e que não existe a realização de trabalho no processo. Adota-se o índice “e” referindo-se as condições de entrada do escoamento, “H” e “S” referindo-se respectivamente as condições de saída do escoamento quente e frio. Ainda assumi-se que a diferença de cota entre a entrada e saídas do escoamento são desprezíveis, bem como a variação de velocidade, resultando finalmente na Eq.(2) a seguir.

$$\dot{m}_e h_e = \dot{m}_h h_h + \dot{m}_c h_c \quad (2)$$

A Eq.2 mostra a simplicidade do processo olhado simplesmente como um volume de controle, esta mostra ainda que se em uma das saídas a temperatura é inferior à temperatura de entrada, temos que contra balancear com uma saída quente que satisfaça a equação acima.

Todos os experimentos mostram que quanto maior a pressão de entrada, maior a diferença de temperatura na saída fria, independentemente da relação de áreas, logo, maior a diferença de temperatura quente também. Também verificou-se que o comprimento do Tubo quente tem uma grande influencia sobre o desempenho do aparelho.

Os valores do COP para o Tubo de Hilsch são extremamente baixos se comparados com alguns outros sistemas de refrigeração. Um COP muito baixo faz com que sua utilização seja bem restrita, uma vez que o rendimento é um parâmetro de extrema importância para a implementação de um sistema.

Se por um lado o Tubo de Hilsch apresenta excelentes vantagens em sua utilização, tais como facilidade de montagem e utilização, não apresenta partes móveis, leve e não requer instalação elétrica; por outro ele possui características que tornam sua utilização pouco difundida como COP extremamente baixo, baixa vazão de ar frio e barulho.

Tabela 2. Dados experimentais

Pressão entrada (kgf/cm ²)	Comp. (m)	Área da saída quente (m ²)	Temp. Entrada (°C)	Temp. Quente (°C)	Temp. Fria (°C)	M hot (kg/s)	M cold (kg/s)	DT hot (°C)	DT cold (°C)	2º Lei η_{iso} (%)	COP _{iso}	COP _{te}
3	500	2,54E-04	18,1	22,8	8,9	7,53E-03	2,22E-03	1,99E+00	6,75E+00	8,97E+04	1,45E-02	1,78E-02
2	500	2,54E-04	18,3	22,5	11,8	5,69E-03	1,49E-03	2,50E+00	9,54E+00	1,68E+05	1,23E-02	1,45E-02
1	500	2,54E-04	19,7	21,8	16,8	3,47E-03	7,13E-04	1,50E+00	7,32E+00	2,11E+05	7,61E-03	8,42E-03
3	500	1,91E-04	18,2	24	4,6	5,64E-03	2,42E-03	2,74E-02	6,39E-02	1,13E+03	2,83E-02	3,47E-02
2	500	1,91E-04	18,4	23,1	10,8	4,26E-03	1,96E-03	1,20E+00	2,61E+00	6,13E+04	2,19E-02	2,57E-02
1	500	1,91E-04	20	22,7	15,2	2,59E-03	1,15E-03	5,63E-01	1,26E+00	4,88E+04	2,28E-02	2,52E-02
3	500	1,27E-04	15,9	22,9	1,8	3,91E-03	2,08E-03	5,23E-01	9,81E-01	2,51E+04	3,44E-02	4,22E-02
2	500	1,27E-04	15	21	3,6	3,25E-03	1,63E-03	2,82E-01	5,62E-01	1,73E+04	3,52E-02	4,14E-02
1	500	1,27E-04	16,6	20,1	8,2	1,94E-03	1,23E-03	1,84E+00	2,89E+00	1,49E+05	5,08E-02	5,62E-02
3	400	2,54E-04	21,5	26	7,9	7,16E-03	1,41E-03	1,82E+00	6,59E+00	1,29E+05	1,55E-02	1,90E-02
2	400	2,54E-04	20,8	25,7	9,7	3,74E-03	5,49E-04	3,27E+00	2,83E+00	5,95E+05	1,29E-02	1,52E-02
1	400	2,54E-04	20,7	24,8	17,3	2,25E-03	1,98E-04	3,80E+00	8,53E+00	1,92E+06	4,22E-03	4,67E-03
3	400	1,91E-04	20,6	25,5	6	2,93E-03	3,71E-04	3,05E+00	1,21E+01	8,22E+05	1,14E-02	1,39E-02
2	400	1,91E-04	20,8	24	11,2	2,34E-03	3,04E-04	1,95E+00	7,35E+00	6,44E+05	1,01E-02	1,18E-02
1	400	1,91E-04	20,8	22	16,2	2,59E-03	7,96E-05	1,06E+00	2,00E+00	1,33E+06	2,11E-03	2,33E-03
3	400	1,27E-04	21	28,7	4,7	3,23E-03	1,82E-03	1,49E+00	2,64E+00	8,16E+04	4,05E-02	4,97E-02
2	400	1,27E-04	20,7	27	9,3	1,69E-03	1,10E-03	1,10E+00	1,70E+00	1,00E+05	4,08E-02	4,79E-02
1	400	1,27E-04	20,8	25,7	15	1,08E-03	6,19E-04	1,57E+00	2,74E+00	2,54E+05	3,24E-02	3,58E-02
3	300	2,54E-04	16,6	21,2	-5	6,49E-03	1,35E-03	1,01E-01	4,84E-01	7,47E+03	2,60E-02	3,19E-02
2	300	2,54E-04	16,2	20,3	2,5	5,75E-03	1,02E-03	1,66E+00	4,35E+00	1,63E+05	1,90E-02	2,23E-02
1	300	2,54E-04	18,3	20,1	10,4	3,10E-03	5,28E-04	4,56E-01	2,68E+00	8,66E+04	1,78E-02	1,97E-02
3	350	1,91E-04	16,4	21,4	-2,1	5,35E-03	1,70E-03	8,74E-01	1,45E+00	5,15E+04	3,11E-02	3,81E-02
2	300	1,91E-04	17,2	21,1	4,4	4,17E-03	1,12E-03	4,67E-01	1,74E+00	4,17E+04	2,49E-02	2,92E-02
1	300	1,91E-04	18,2	20,7	12,2	2,68E-03	8,47E-04	6,04E-01	1,91E+00	7,14E+04	2,23E-02	2,46E-02
3	300	1,27E-04	17,4	24,4	3,8	4,21E-03	2,10E-03	2,23E-01	4,47E-01	1,06E+04	3,15E-02	3,87E-02
2	300	1,27E-04	17,9	22,2	6,2	2,79E-03	1,67E-03	2,71E+00	4,52E+00	1,62E+05	4,03E-02	4,73E-02
1	300	1,27E-04	18,5	21,3	12,8	1,73E-03	8,05E-04	1,44E-01	3,09E-01	1,79E+04	2,80E-02	3,10E-02
3	200	2,54E-04	17,2	23,3	9,9	7,28E-03	1,14E-03	4,95E+00	1,18E+01	4,34E+05	6,91E-03	8,48E-03
2	200	2,54E-04	18,1	22,6	13,4	5,11E-03	7,86E-04	3,78E+00	2,26E+00	4,81E+05	5,76E-03	6,77E-03
1	200	2,54E-04	19,3	22,4	16,2	3,26E-03	4,59E-04	2,66E+00	1,35E+01	5,81E+05	5,93E-03	6,55E-03
3	200	1,91E-04	18,7	23,6	10,5	4,80E-03	1,12E-03	2,99E+00	8,18E+00	2,67E+05	1,08E-02	1,33E-02
2	200	1,91E-04	19,6	23	12,3	3,93E-03	6,87E-04	2,12E+00	1,21E+01	3,09E+05	1,00E-02	1,17E-02
1	200	1,91E-04	20,8	22,8	16,7	2,33E-03	6,77E-04	8,10E-01	2,79E+00	1,20E+05	1,43E-02	1,58E-02

6. Referências

- Brodyansky, V. M. e outros, 1994, The Efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization, Elsevier publication.
- Choi, H. Z., Lee, S. W. e Jeong, H.D., 2001, A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel, Journal of Materials Processing Technology.
- Lewins, J., Bejan, A., Vortex tube Optimization Theory, International journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 931-943.
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., Borgnakke, G., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blucher, 5ª edição, São Paulo 1998.

Pode-se simplificar ainda mais a Eq.(2) adotando-se a hipótese de gás perfeito e assumindo que o calor específico a pressão constante (c_p) é igual para todos os estados. Ainda, definindo μ como a fração em massa da saída fria ($\mu=m_o/m_e$) e pela conservação de massa sabe-se que $m_e=m_c+m_H$ chega-se na Eq.(3).

$$T_e = (1 - \mu)T_h + \mu T_c \quad (3)$$

2.2. Segunda Lei da Termodinâmica

A Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle poder ser escrita de maneira generalizada pela Eq.4.

$$S_{GERADO} + \sum \frac{Q_{V.C.}}{T} = \dot{m} \cdot (s_s - s_e) \quad (4)$$

Aplicadas as condições de contorno do Tubo de Hilsch e considerando o escoamento como gás perfeito a Segunda lei pode ser escrita conforme a Eq. 5.

$$\frac{S_{GERADO}}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{R}{c_p} \ln \left(\frac{p_e}{p_s} \right) + (1 - \mu) \ln \left(\frac{T_h}{T_c} \right) \quad (5)$$

3. Dados dimensionais do Protótipo do Tubo de Hilsch

O protótipo do Tubo de Hilsch foi construído com base em Sony (1975) e Brodyansky (1994).

Todo em material plástico com extremidades roscadas, o protótipo foi concebido para poder sofrer modificações no comprimento do tubo quente, e nas áreas de saída quente e fria. Um resumo dos principais dados do protótipo pode ser visto na Tab. (1).

Tabela 1. Dados dimensionais do Protótipo do Tubo de Hilsch.

Material	PVC
Diâmetro do tubo quente	1" (d ext 33,0mm)
Diâmetro do orifício de entrada	6,0 mm
Área da saída quente	157,1 mm ²
Área da saída fria	38,5 mm ²
Comprimentos do tubo quente	500, 400, 300 e 200 mm

O Protótipo do Tubo de Hilsch pode ser observado na fig (2).

Figura 2: Protótipo do Tubo de Hilsch



4. Resultados

Alguns dos resultados experimentais são apresentados na Tabela 2.

As colunas Dtcold e DThot informam quantos graus o experimento se afasta da primeira lei, no primeiro caso assumindo a temperatura da saída quente como verdadeira e no segundo caso a temperatura da saída fria como verdadeira.

O COP para o Tubo de Hilsch foi calculado de duas maneiras diferentes, a primeira adotando a hipótese de compressor isentrópico (COP_{iso}) e a segunda a hipótese de compressor isotérmico (COP_{is}).

5. Conclusões