

Pedro Paulo Mariano Ramos

Trocador de calor para fins didáticos

Trabalho de conclusão do curso de graduação do
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

São Paulo

2003

Pedro Paulo Mariano Ramos

Trocador de calor para fins didáticos

São Paulo

2003

AGRADECIMENTOS

Para esta seção não podem ser esquecidas algumas pessoas que tiveram a sua parcela de contribuição para a realização deste projeto: meus pais, minha família e amigos em geral e a minha namorada, pelo apoio na parte pessoal; meu supervisor no estágio Moysés, pelo suporte principalmente na parte de suprimentos do trabalho; Wilson e Ademir, pelo auxílio na fabricação; meu orientador Prof. Alberto H. Neto, por toda a orientação e disponibilidade para atender às minhas necessidades, sem contar na paciência e calma demonstradas mesmo quando as coisas pareciam que não iriam dar certo e sobretudo a Deus, que esteve ao meu lado cem por cento do tempo.

RESUMO

O objetivo deste trabalho se faz no projeto e construção de um dispositivo de troca de calor do tipo duplo tubo a ser utilizado em aulas de laboratório de modo a facilitar o entendimento dos conceitos de Transferência de Calor por parte dos alunos. A atividade resumiu-se em duas partes principais. Na primeira (o Projeto), partindo de uma série de restrições, foram realizados os cálculos e o detalhamento de projeto, valendo das equações que regem os princípios da troca de calor, além do aproveitamento de materiais e procedimentos de fabricação usualmente aplicados em construções semelhantes. Com isso, chegou-se a um formato final do equipamento, tendo o desenho e a lista de materiais como documentos principais para a segunda parte (a Fabricação), servindo de embasamento para tudo que havio sido feito até então. Com a compra dos materiais efetuada, passou-se para a Fabricação na qual o trocador foi construído de acordo com as especificações de projeto. Na etapa subsequente, o equipamento foi testado e alguns erros detectados. Apesar disso, os resultados foram satisfatórios de uma modo geral, dando a entender que o equipamento está operando aproximadamente da forma que se esperava durante a fase de projetos. Como não houve tempo hábil para um levantamento das causas que levaram às não conformidades, nada pode ser feito para corrigi-las ao término da atividade. Desta forma, será necessário um pouco de trabalho extra para que o equipamento possa entrar em completo funcionamento.

ABSTRACT

The main goal of this work is to project and build a heat exchanger double pipe type to be used in laboratory classes to ease the understanding of the concepts of heat transfer by the students. This activity is composed mainly of parts. In the first (the Project), starting with several restrictions and using the basic equations that rule the laws of heat transfer, besides the application of concepts regarding material's properties and fabrication procedures on a similar equipment, all the calculus and project detailing were done. Thus, a final configuration of the equipment was achieved, having the drawing and the list of materials as the reference for the second part (the Construction), serving as basement to all the work done until that moment. With the acquisition of all the materials, the second part came on, being the equipment manufactured according to all the project specifications. After that, the exchanger was tested and some problems were detected. Despite that, all the results were fairly good in general and the equipment is operating quite near as it was expected when it was being projected. Since that there was no time to point out the causes for the non conformities, unfortunately nothing could be done in order to correct them before the end of this work. Therefore some more action will be needed so that the heat exchanger can start operating precisely.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	2
RESUMO	3
ABSTRACT.....	4
SUMÁRIO	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS E ÍNDICES.....	8
INTRODUÇÃO	10
DEFINIÇÃO DAS RESTRIÇÕES	12
CÁLCULOS.....	15
BUSCA E DETALHAMENTO DE SOLUÇÕES.....	25
SUPRIMENTOS.....	33
FABRICAÇÃO.....	37
OPERAÇÃO E TESTES	44
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
BIBLIOGRAFIA.....	49
ANEXO A: CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS.....	50
ANEXO B – CURVA DA VAZÃO MÁSSICA DA REDE	52
ANEXO C – RESULTADOS DOS CÁLCULOS.....	53
ANEXO D – DESENHO DO EQUIPAMENTO.....	57
ANEXO E – DOCUMENTOS DE SUPRIMENTOS	60

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Layout inicial do trocador de calor.....	10
FIGURA 2: Distribuições de temperaturas num trocador de calor do tipo corrente paralela.....	16
FIGURA 3: Distribuições de temperaturas num trocador de calor do tipo contra corrente.....	17
FIGURA 4: Esquema representativo dos locais por onde o fluido passa.....	26
FIGURA 5: Execução de solda tipo Oxi-Acetileno	37
FIGURA 6: Detalhe da montagem das curvas para os tubos internos.....	38
FIGURA 7: Detalhe dos tubos do trocador antes da tampa de vedação.....	39
FIGURA 8: Detalhe dos tubos do trocador depois de soldada a tampa de vedação... <td>39</td>	39
FIGURA 9: Detalhe da montagem do circuito auxiliar.....	40
FIGURA 10: Suporte do rotâmetro montado na mesa.....	41
FIGURA 11: Detalhe da fixação do suporte na mesa.....	41
FIGURA 12: Vista superior da parte de tubulação do equipamento.....	42
FIGURA 13: Fixação de tubo por abraçadeira.....	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Vazões mássicas medidas no local de instalação do trocador.....	14
TABELA 2: Determinação de Nu para escoamento laminar.....	19
TABELA 3: Relação de valores de vazão mássica e demais variáveis operacionais.....	24
TABELA 4: Coeficientes de troca de calor por condução para alguns materiais.....	28
TABELA 5: Especificação dos materiais (tubulação e mecânica).....	33
TABELA 6: Especificação dos materiais (elétrica).....	34
TABELA 7: Especificação dos materiais (instrumentação).....	34
TABELA 8: Lista de materiais e seus respectivos fornecedores.....	35
TABELA 9: Valores medidos durante o teste.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS E ÍNDICES

- R: resistência elétrica;
- V: tensão elétrica no local de funcionamento do chuveiro;
- P: potência elétrica do chuveiro;
- T: temperatura;
- ΔT : variação de temperatura;
- m: vazão mássica;
- c_p : calor específico à pressão constante;
- Q: total de calor trocado entre os fluidos;
- U: coeficiente global de troca de calor;
- A: área de troca;
- L: comprimento de troca;
- h: coeficiente de troca de calor por convecção;
- R_w : coeficiente de troca de calor por condução entre as paredes (walls);
- D: diâmetro;
- v: velocidade de escoamento do fluido;
- μ : viscosidade dinâmica do fluido;
- k: constante de condução para um determinado material;
- Re: número de Reynolds;
- p: perímetro molhado da seção;
- Nu: número de Nusselt;
- Pr: número de Prandtl;
- K: constante de convecção do fluido;
- q: relativo ao fluido aquecido;

- f: relativo ao fluido não aquecido;
- o: relativo ao tubo externo;
- i: relativo ao tubo interno;
- w: relativo à parede do tubo (wall);
- ml: relativo à média logarítmica da diferença de temperaturas;
- H: relativo ao termo “hidráulico” acerca do diâmetro de uma seção;
- tot: relativo à total (vazão mássica total);
- 1: relativo à seção 1;
- 2: relativo à seção 2;
- 110: relativo à 110 Volts;
- 220: relativo à 220 Volts.

INTRODUÇÃO

O projeto “Trocador de Calor para Fins Didáticos” tem por objetivo o projeto e a construção de um Trocador de Calor do tipo Duplo Tubo a ser operado em aulas de laboratório possibilitando aos alunos a fixação dos conceitos de Transferência de Calor. O equipamento utiliza água como fluido de trabalho, a qual terá seu fluxo dividido por duas entradas, uma delas aquecida por meio de uma resistência elétrica.

Há a possibilidade de se realizar medições de temperatura e vazão mássica na entrada e na saída do tubo e espera-se que, com a tomada de valores seja possível, através de variações da vazão na entrada, o monitoramento das diferenças de temperatura obtidas e o posterior cálculo dos respectivos coeficientes de troca de calor. A estrutura toda deve estar dentro de uma área de 800 X 1200 mm. A Fig. 1 abaixo mostra um esquema ilustrativo inicial do aparato, apenas para uma compreensão inicial do problema.

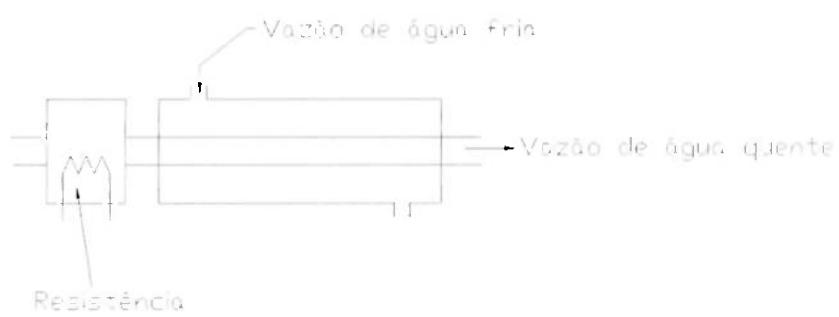


Fig. 1: Layout Inicial do Trocador de Calor

Todo o projeto foi feito levando-se em conta uma série de limitações impostas, como por exemplo, nas temperatura de entrada do fluido, nas variações desta entre o começo e o fim do processo de troca de calor e nas vazões mássicas, as quais poderiam chegar a um determinado valor máximo, delimitado pela rede de fornecimento local. A partir de um entendimento inicial das restrições, passou-se a um estudo mais detalhado do problema e, após este, às etapas subsequentes, comuns em qualquer projeto de engenharia. Estas devem ser entendidas como toda a metodologia aplicada, e estão dispostas neste presente documento, como subseções do item a ser iniciado a partir da próxima página, sendo as seguintes: definição das restrições, cálculos, busca e detalhamento de soluções, suprimentos, fabricação e testes. Para se ter uma idéia de como se deu a evolução temporal do projeto, encontra-se no ANEXO A, o cronograma revisado com a época em que cada atividade foi realizada.

DEFINIÇÃO DAS RESTRIÇÕES

Primeiro passo previsto pelo cronograma, a atividade consiste em, além da tomada das premissas iniciais para o projeto passadas pelo professor, medir a vazão mássica de água e a tensão elétrica do local onde o equipamento será instalado. As restrições iniciais dadas para o projeto, além da limitação dimensional do trocador (a área do equipamento não poder ocupar um espaço maior que 1,2 m X 0,8 m), são referentes à temperatura inicial dos fluidos “quente” e “frio” e à variação desta desde a entrada até a saída, e podem ser vistas logo abaixo.

- $T_{q1} = 40 \sim 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $T_{f1} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente);
- ΔT_q e ΔT_f = entre 5 e 8 $\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Infelizmente, tão logo que começou a fase de cálculos percebeu-se que para as condições admitidas e encontradas, para a temperatura inicial do fluido aquecido estar na faixa citada, sua vazão mássica correspondente estaria da faixa de medição de qualquer medidor de vazão e, além disso, para uma variação de temperatura de 5 $\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 8 $\text{ }^{\circ}\text{C}$, dados os valores iniciais deste parâmetro, o comprimento de troca de calor seria muito acima do imaginado. Assim sendo, estabeleceram-se novas premissas para estes duas variáveis, como pode-se constatar a seguir.

- T_{q1} = a partir de 40 $\text{ }^{\circ}\text{C}$, pois um valor de temperatura abaixo a este, considerando-se o comprimento do trocador escolhido e suas condições operacionais, acarretaria em uma troca de calor abaixo da desejada;

- ΔT_q e $\Delta T_f =$ a partir de 1,5 °C, pois uma variação abaixo deste patamar seria imperceptível ao termopar.

Os dados e restrições mensurados, tanto quanto os passados inicialmente pelo orientador, também se mostraram fundamentais para o projeto como um todo, principalmente no desenvolvimento dos cálculos. A medição da tensão elétrica foi feita com o auxílio de um multímetro comum sendo ligado diretamente à tomada. Os valores encontrados foram:

$$V_{110} = 123 \text{ V}$$

$$\text{e} \quad V_{220} = 213 \text{ V}$$

O procedimento adotado para a determinação da curva da vazão mássica do laboratório, por ser o mais fácil método de mensuração dessa variável, é comumente aplicado em aulas práticas de mecânica dos fluídos e outras disciplinas afins: para uma determinada abertura na torneira, um balde recolhia a água que seria pesada em uma balança. O tempo de enchimento do balde teve sua marcação feita por um cronômetro. Abaixo, está a Tab. 1 com os valores de massa da água (descontado o peso do balde), tempo de enchimento e vazão calculada através da simples divisão das duas grandezas anteriores.

Tabela 1: Vazões mássicas medidas no local de instalação do trocador

Ponto	Massa (g)	Massa f (g)	Tempo (s)	Vazão (kg/s)	Vazão f (kg/s)	Vazão pol (kg/s)	Erro (%)
1	0	0	0	0	0	0,0019	100,00
2	3569	3401,5	30,39	0,1119	0,1119	0,1040	7,64
3	3402	3234,5	20,11	0,1608	0,1640	0,1752	6,36
	2691,4	2523,9	15,09	0,1673			
4	3678	3510,5	15,53	0,2260	0,2260	0,2229	1,42
5	2780,4	2612,9	10,2	0,2562	0,2579	0,2534	1,78
	2859	2691,5	10,37	0,2595			
6	3913,1	3745,6	13,9	0,2695	0,2695	0,2718	0,86
7	2977,5	2810	9,99	0,2813	0,2824	0,2824	0,01
	3084,4	2916,9	10,29	0,2835			
8	3035,8	2868,3	10,02	0,2863	0,2863	0,2880	0,61
9	3101,1	2933,6	10,09	0,2907	0,2915	0,2907	0,29
	3228,2	3060,7	10,39	0,2946			
	3144,4	2976,9	10,29	0,2893			
10	3114,6	2947,1	10,11	0,2915	0,2915	0,2912	0,10
11	3135,9	2968,4	10,29	0,2885	0,2886	0,2892	0,22
	3120,5	2953	10,23	0,2887			

Além disso, com o auxílio do mesmo programa onde a tabela foi feita e a curva desenhada, com o emprego do método dos mínimos quadrados aplicado nos pontos vazão mássicas calculados, obteve-se um polinômio de quinta ordem que tenta ser o mais fiel possível aos resultados obtidos no experimento. Desta forma, pode-se também comparar na Tab. 1 os valores de vazão obtidos no experimento com os provenientes do polinômio, além de constatar o erro que separa os dois métodos adotados. A curva da vazão mássica da rede local, junto com a equação do polinômio de quinta ordem e sua respectiva curva, se encontra no ANEXO B deste documento.

CÁLCULOS

Os cálculos para o projeto do trocador de calor dividem-se basicamente em duas partes: o sistema de aquecimento de água e as características dimensionais, funcionais e operacionais do equipamento em si, como as temperaturas de entrada e saída e suas variações ao longo do comprimento de troca, as dimensões, o coeficiente global de troca de calor, entre outras.

Partindo de um valor de potência de uma resistência de chuveiro residencial, usando o valor da tensão elétrica medida, chegou-se ao valor numérico da resistência através de uma variação da Lei de Ohm, representada pela eq. 1.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

Com este valor, achou-se a vazão de água necessária para se provocar uma certa variação de temperatura, já obtidos os valores de tensão (123 V ou 213 V), resistência (2,8 Ω ou 7,08 Ω, respectivamente para os valores de tensão obtidos) e calor específico da água ($c_{pq} = 4184 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$), de acordo com a eq. 2 abaixo:

$$\dot{m}_q = \frac{V^2}{c_{pq} \Delta T_q R} \quad (2)$$

Com o valor da vazão mássica para o fluxo quente, usando-se a eq. 3, proveniente da equação fundamental da troca de calor (eq. 4) obtém-se a vazão para o lado frio, que somada à da parte quente dá o valor total (eq. 5).

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_q c_{pq} \Delta T_q}{c_{pf} \Delta T_f} \quad (3)$$

$$Q = \dot{m}_q c_{pq} \Delta T_q = \dot{m}_f c_{pf} \Delta T_f \quad (4)$$

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_q + \dot{m}_f \quad (5)$$

Quanto aos cálculos referentes às condições operacionais do equipamento, as equações levam em conta parâmetros como diferença de temperatura por média logarítmica (ΔT_{ml}), o coeficiente global de troca de calor (U) e da área de troca (A). Os índices 1 e 2 presentes na variável ΔT indicam a seção onde foi obtida o valor da temperatura. Para um trocador de corrente paralela tanto o fluido quente quanto o frio entram pela seção 1 e saem pela 2. Já para o contra corrente, enquanto um dos líquidos entra pela 1 e sai pela 2, o outro percorre o caminho inverso, conforme mostram as Figs. 2 e 3, INCROPERA (1998), abaixo, onde os índices h, c, i e o, que acompanham a variável T (temperatura), representam respectivamente quente (hot), frio (cold), entrada (in) e saída (out).

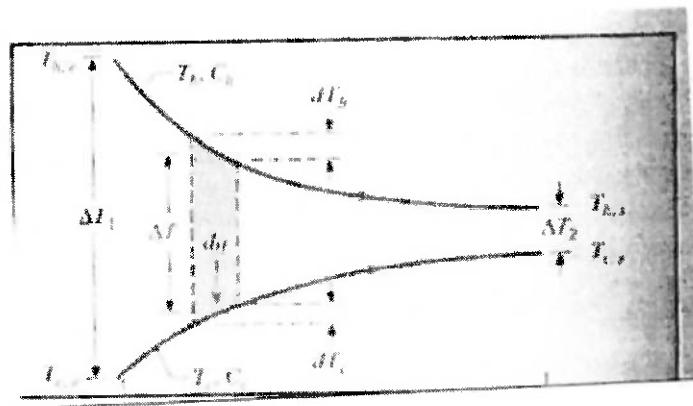


Figura 2: Distribuições de temperaturas num trocador de calor corrente paralela

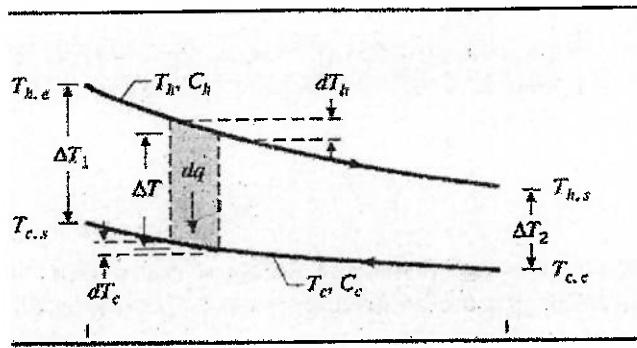


Figura 3: Distribuições de temperaturas num trocador de calor contra corrente

Desta forma, têm-se as eq. 6, que auxiliada pela eq. 7 e outras definições e fórmulas, definem o dimensionamento de um trocador de calor.

$$Q = UA\Delta T_{ml} \quad (6)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (7)$$

Para a determinação do coeficiente global de troca de calor (U), são levadas em conta parcelas referentes à troca de calor por convecção dos fluidos quente e frio (h_q e h_f) e por condução do material (R_w) do tubo. Desta forma, a eq. 8, além das definições representadas pelas eqs. 9 e 10, são destinadas ao cálculo de U .

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + R_w A + \frac{1}{h_q} \quad (8)$$

$$A = \pi D_i L \quad (9)$$

$$R_w = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} \quad (10)$$

Nas equações acima D_o e D_i representam os diâmetros externo e interno, respectivamente, L é o comprimento de troca e k é o coeficiente de troca de calor por condução.

Para o cálculo dos termos de convecção, primeiro calcula-se o número de Reynolds para a caracterização do escoamento ($Re \geq 10000$: escoamento turbulento; $Re < 10000$: escoamento laminar). A equação de Reynolds é dada pela eq. 11 abaixo.

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_H \mu} \quad (11)$$

Os valores de ρ , μ , v e D_H representam, respectivamente, a massa específica, a viscosidade dinâmica, a velocidade do fluido e o diâmetro hidráulico dos tubos. Ao se aplicar a eq. 12, onde p significa o perímetro “molhado” da seção em questão, para este caso, o tubo interno $D_H = D_i$ e para o externo $D_H = D_o + D_i$.

$$D_H = \frac{4A}{p} \quad (12)$$

Caso o escoamento seja dado como turbulento, usa-se a eq. 13 para encontrar o número de Nusselt (Nu), sendo Pr, o número de Prandtl, tabelado em função da temperatura média do fluido:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (13)$$

No caso de o escoamento ser laminar, o número de Nusselt é determinado através da Tab. 2, INCROPERA (1998), que relaciona os diâmetros externo e interno encontrada abaixo:

Tabela 2: Determinação de Nu para escoamento laminar

D_i / D_o	Nu
0	-----
0,05	17,46
0,10	11,56
0,25	7,37
0,50	5,74
1,00	4,86

Com o valor de Nu determinado, o próximo passo é a determinação do coeficiente de convecção, Eqs. 14 e 15.

$$h_f = Nu \frac{K}{D_i} \quad (14)$$

$$h_q = Nu \frac{K}{D_o - D_i} \quad (15)$$

Com o intuito de aplicar as Eqs. 1 a 15 listadas nas páginas anteriores e ilustrar o motivo de as restrições iniciais para o projeto serem abandonadas, será efetuado um cálculo onde, além das condições iniciais, partiu-se de um valor de potência e de resistência de um chuveiro encontrado no mercado e dos diâmetros interno e externo para, no final, se ter o comprimento de troca. O cálculo do comprimento será feito para um trocador de corrente paralela, com voltagem de aquecimento de 123V. A resistência utilizada foi retirada do chuveiro modelo Tradicional da Lorenzetti com potência de 6400 W.

As condições iniciais são as seguintes:

- $T_{q1} = 42^{\circ}\text{C}$ e $T_{f1} = 20^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente);
- $D_o = 1" = 0,0254 \text{ mm}$ e $D_i = 10 \text{ mm}$;
- $C_{pq} = 4180 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{C}$;
- $\Delta T_q = 6^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_f = 5^{\circ}\text{C}$;
- R (do chuveiro) = $2,8 \Omega$;
- k (cobre) = 450 W/mk .

Primeiro calculou-se a vazão mássica para o fluido quente e com esse valor achou-se a do líquido frio, através das Eqs. 2 e 3:

$$\dot{m}_q = \frac{213^2}{4180 \cdot 22 \cdot 2.8} = 0,0587 \text{ kg/s} \quad \text{e} \quad \begin{aligned} 0,0587 \cdot 4180 \cdot 6 &= \dot{m}_f \cdot 4180 \cdot 5 \\ \dot{m}_f &= 0,070 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

E, assim, pela Eq. 4, o valor da potência de troca de calor é:

$$\dot{Q} = 0,0587 \cdot 4180 \cdot 6 = 1472,2W$$

Com os valores de temperatura $T_{q1} = 42^{\circ}\text{C}$, $T_{q2} = 36^{\circ}\text{C}$, $T_{f1} = 20^{\circ}\text{C}$ e $T_{f2} = 25^{\circ}\text{C}$, calculou-se ΔT_{ml} com a Eq. 7 e com o valor da área de troca (Eq. 9), achou-se a relação de $1/U$, baseada na Eq. 6:

$$\Delta T_{ml} = \frac{22 - 11}{\ln\left(\frac{22}{11}\right)} = 15,87K, \quad A = \pi \cdot 0,010 \cdot L = 0,0314L \quad \text{e}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{15,87 \cdot 0,0314L}{1472,2} = 0,000338L$$

O valor do termo de condução R_wA (a partir da Eq. 10) está descrito abaixo:

$$R_wA = \frac{\ln\left(\frac{0,0254}{0,01}\right)}{2\pi \cdot 450 \cdot L} \cdot 0,0314L = 0,00001033$$

Para achar os valores de μ , K , Pr para o fluido frio e o quente deve-se tirar a temperatura média dos dois líquidos dentro do tubo, que nada mais é do que a média aritmética entre as temperaturas de entrada e de saída. Para o lado frio esse valor é de $22,5^{\circ}\text{C}$ e o quente 39°C . Assim, para $22,5^{\circ}\text{C} = 295,5\text{ K}$: $\mu = 0,000959\text{ Ns/m}^2$; $K = 0,606\text{ W/mk}$ e $Pr = 6,62$ (fluido frio).

Com esses valores, através das Eqs. 11 e 14 e Tab. 2, achou-se os números de Reynolds, Nusselt e o coeficiente de convecção para o lado frio:

$$Re = \frac{4 \cdot 0,07}{\pi \cdot 0,01 \cdot 0,000959} = 9293,7 \text{ (laminar)}$$

Da Tab 2, $D_i/D_o = 0,5$ e $Nu = 6,45$. Assim o valor de h_f fica:

$$h_f = \frac{6,45 \cdot 0,606}{0,01} = 390,87$$

Para $39^{\circ}\text{C} = 312\text{ K}$; $\mu = 0,0006694\text{ Ns/m}^2$, $K = 0,6304\text{ w/mK}$ e $Pr = 4,43$. Com esses valores temos os números de Reynolds e Nusselt e h_q (Eq. 15):

$$Re = \frac{4 \cdot 0,0587}{\pi \cdot (0,010 + 0,0254) \cdot 0,0006694} = 3153,98 \text{ (laminar)}$$

Da Tab. 2, $D_i/D_o = 0,5$ e $Nu = 6,45$. Assim o valor de h_q fica:

$$h_q = \frac{6,45 \cdot 0,6304}{0,0254 - 0,01} = 264$$

Assim, temos, por uma variação da Eq. 8:

$$0,000338L = \frac{1}{390,87} + 0,00001033 + \frac{1}{264} \rightarrow L = 18,8m$$

Como pode ser visto, o valor de 18,8 m é totalmente inviável para o projeto, pois seriam necessários 19 passes para o trocador. Para viabilizar o projeto com os pré-requisitos iniciais, de acordo com o que já foi relatado na seção anterior, seriam necessários a redução da vazão mássica e do ΔT para valores que seriam impossíveis de serem medidos.

A primeira medida adotada foi a redução dos diâmetros externo e interno para 1/2" e 1/4", respectivamente. Logo depois, ao se realizar cálculos considerando essa mudança constatou-se uma melhora signifacativa no tocante ao desempenho requerido para o projeto com um menor comprimento de troca. Uma série de estudos para várias vazões foram feitos para esses valores e os dados abaixo são algumas observações desses cálculos:

- As diferenças de temperatura dos fluidos quente e frio na entrada e na saída devem ser diferentes;
- A vazão do fluido quente não pode ser muito maior que 0,10 kg/s;
- Uma pequena variação de m_q ou de ΔT_q causa grande impacto no comprimento;
- O comprimento para 213 V é bem menor.

Desta forma, os parâmetros iniciais adotados foram totalmente deixados de lado e deixou-se de estabelecer uma pequena faixa para o valor da temperatura do fluido quente na entrada ou para as variações. Para as variações, o único requisito foi de que elas teriam que ser pelo menos perceptíveis pelo medidor de temperatura.

Estabeleceu-se 3,5 m como um comprimento ideal de troca e a partir de um conjunto de pares ordenados de m_q e m_f que podem ser aplicados num trocador de calor de 3,5 m, acharam-se valores de ΔT_q e ΔT_f .

Tabela 3: Alguns pares ordenados de vazão mássica e demais variáveis operacionais

L (m)	m_q (kg/s)	m_f (kg/s)	ΔT_q (°C)	ΔT_f (°C)	Pot. (W)	U_{cp} (W/°C m²)	U_{cc} (W/°C m²)
3,5	0,03	0,15	12,95	2,59	1623,93	542,64	539,35
3,5	0,04	0,15	7,55	2,013	1262,36	542,70	540,23
3,5	0,05	0,10	4,82	2,41	1007,38	536,69	533,83
3,5	0,05	0,15	4,94	1,647	1032,46	542,97	540,99
3,5	0,075	0,15	2,26	1,13	708,51	542,83	541,51

A Tab. 3 acima possui alguns valores desses pares ordenados, além das temperaturas e suas variações, das potências e outros parâmetros operacionais do equipamento calculados em função destes. Todos os outros pares ordenados, além dos já citados, para os quais foram realizados os cálculos, bem como os gráficos do coeficiente de troca de calor (U) em função da vazão dos fluidos frios, levando-se em conta cada vazão da água aquecida, tanto para o trocador de corrente paralela quanto para o contra corrente, encontram-se no ANEXO C.

BUSCA E DETALHAMENTO DE SOLUÇÕES

À medida que os cálculos eram feitos, dúvidas que prejudicavam o andamento do projeto surgiam e, desta forma, iniciou-se a busca por soluções, principalmente no tocante à parte dimensional e operacional do equipamento. Com isso, pode-se dizer que não só essas duas partes ocorreram quase que simultaneamente, como também uma era a razão do desenvolvimento da outra. No entanto, mesmo quando se iniciavam fases posteriores, novas questões se levantavam, o que torna possível a constatação de que problemas de todos os tipos (e consequentemente soluções) surgiram constantemente até o fim do projeto. A metodologia para a procura de alternativas e a escolha da que melhor atendia aos requisitos, foi sempre a mesma, independente do problema: a consulta à bibliografia especializada ou a pessoas com grande conhecimento do assunto, além da verificação se a solução era a que, dentre todas, a que melhor atendia aos pré-requisitos estabelecidos para cada problema. Deve-se acrescentar também que soluções com larga aplicação em dispositivos similares foram privilegiados.

A primeira questão relevante à fase relacionada a este tópico se fez quanto ao tipo do trocador de calor que melhor atenderia às necessidades deste projeto: o de corrente paralela, o de contra-corrente. Uma rápida análise às duas soluções trouxe uma idéia que foi incorporada ao projeto e que trouxe uma nova filosofia, otimizando principalmente a aplicação didática do trocador: com o auxílio de algumas válvulas implantadas ao longo da tubulação, as duas soluções foram unidas, o que proporcionará ao futuro usuário do equipamento um monitoramento das diferenças de funcionamento dos dois tipos e determinando o mais eficiente.

Além disso, outra pendência se fazia referente ao escoamento dos fluidos quente e frio nos tubos. Para esse caso deveria ser levado em conta a economia de material isolante e a maior facilidade para montagem deste no equipamento e, assim, adotou-se que o fluido de baixa temperatura circularia pelo duto externo e o de alta pelo interno, pois assim além da economia, as chances de o fluido aquecido perder calor para o meio se reduzem, já que o caminho percorrido por este é menor e os tubos com escoamento de água a temperatura ambiente não precisam do isolamento por motivos óbvios. Na Fig. 4 encontra-se um esquema do equipamento, já com a incorporação da união entre os dois modelos. Deve-se notar no desenho que enquanto o fluido aquecido passa pela tubos pintados em vermelho (tubulação interna do trocador), o de temperatura mais amena circula pelos dutos azuis (tubulações externa e auxiliar do circuito de integração).

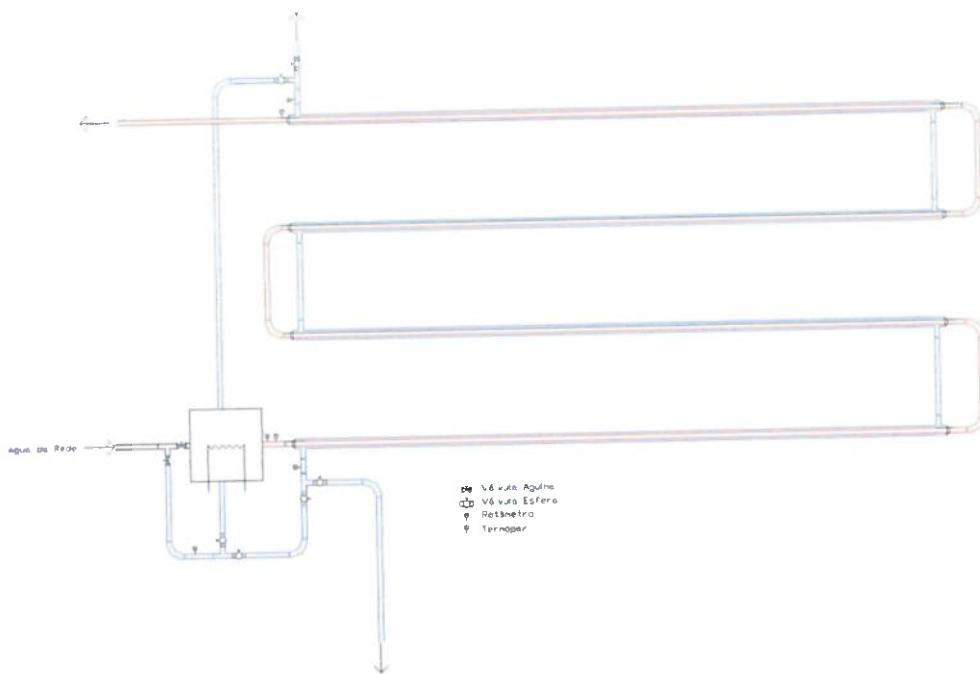


Figura 4: Esquema representativo dos locais por onde o fluido passa

Além da junção dos tipos de trocador, outras duas decisões importantes foram tomadas ainda durante a fase de cálculos. Uma delas se faz referente ao número de passes. Como pode ser visto no tópico anterior, o uso de apenas um passe era totalmente inviável, pois os comprimentos de troca calculados eram muito superiores ao da mesa. Assim, quando foi estabelecido o valor de $L = 3,5$ m, para uma melhor acomodação do equipamento, definiu-se o número de passes como 4.

A outra escolha foi quanto ao material dos tubos e conexões. Os principais critérios de escolha empregados foram o preço, a capacidade de fazer com que o fluido troque calor o mais intensamente possível, a disponibilidade no mercado tanto para tubos quanto conexões e válvulas e a facilidade para manuseio durante a construção, principalmente no tocante ao processo de soldagem. Dos principais materiais usados para essa finalidade, entre eles cobre, PVC, latão, alumínio, inox e aço galvanizado, o cobre foi escolhido por ter uma melhor relação custo – capacidade de trocar calor – disponibilidade no mercado. Na Tab. 4, INCROPERA (1998), estão listados os valores do coeficiente de troca de calor por condução (k) para os materiais pesquisados. Quanto mais alto o valor de k , maior a capacidade de o material desempenhar a sua função de troca.

Tabela 4: Coeficientes de troca de calor por condução para alguns materiais

Material	k (W/m K)
Cobre	450
PVC	5
Latão	110
Alumínio	177
Aço Inoxidável	15,1
Aço Galvanizado	60,5

Para a seleção do material a ser usado como isolante térmico do tubo externo do trocador bem como das conexões e tubulações auxiliares, os critérios foram praticamente os mesmos, apenas levando-se em conta que ao invés de se procurar um material com alta propensão à troca de calor, o objetivo agora era um que fizesse o contrário. Dos materiais pesquisados como a lã de vidro e o Isover, o melhor encontrado foi o poliestireno expandido em formato de tubo (Tubex), com aplicação específica para esse tipo de projeto e que leva vantagem em relação aos seus concorrentes principalmente no tocante a facilidade de manuseio durante a fabricação.

Uma das poucas dúvidas referentes à parte construtiva do projeto se fazia pertinente ao local de alojamento da resistência. A premissa básica era a de máximo isolamento térmico de forma a não dispersar calor para o meio. Levando isso em conta e com o objetivo de se ter o mínimo de trabalho para encapsulamento, adotou-se o próprio chuveiro como invólucro, visto que este, feito de PVC, já servia para essa aplicação, sendo necessária apenas uma adaptação por meio de um conector para ligar as tubulações na entrada e saída deste. Caso o isolamento apenas com a

carcaça não seja suficiente, a idéia mais adequada seria o revestimento desta com o Tubex cortado e moldado de acordo com o formato.

Quanto às válvulas a serem selecionadas, dois tipos seriam necessárias para desempenhar funções totalmente diferentes. Para a seção onde o fluxo se divide em dois, necessitava-se de um tipo de válvula que, através de um comando manual, pudesse controlar os fluxos de modo que as variações das vazões do fluido quente e frio pudessem ser independentes. Para essa função foi designada a válvula agulha, por ser muito usado neste tipo de controle. Já no controle do escoamento do trocador de calor entre corrente paralela ou contra corrente na tubulação auxiliar carecia-se de um dispositivo abre-fecha que disponibilizava ou não o total acesso a uma determinada tubulação. Assim foi escolhida a válvula esfera, o tipo de dispositivo de abertura ou fechamento total mais usado nesse tipo de trabalho. Como ambos os tipos de válvulas escolhidas têm conexões por meio de rosca, o uso do conector para ligar estas aos dutos também se fez imprescindível.

Com isso, a última das principais determinações a ser feita seria em relação a instrumentação. Para a medição de temperatura, dentre os vários tipos de termopares, foi escolhido o tipo J no formato de um fio, por este estar enquadrado na faixa de temperatura de operação (entre 20°C e 70°C), além de possuir um baixo custo e ser facilmente instalado no equipamento por meio de uma solda ligando a ponta do fio ao tubo. Neste dispositivo, a temperatura é obtida por meio de uma relação entre a resistência deste, medida por um multímetro, e a temperatura. Quanto ao medidor de vazão, foi escolhido o rotâmetro em detrimento da placa de orifício, pela sua capacidade de obter uma medida mais exata sem apresentar uma grande fonte de perda de carga para o escoamento, mesmo levando-se em conta o seu preço que é

substancialmente maior. No entanto, para a faixa de vazão de água a ser medida na pressão de operação do equipamento (0 ~ 30 kg/s), o diâmetro compatível do rotâmetro é igual a 1/2" e, com isso, seria necessário o uso de duas reduções consecutivas, ou de conectores, tanto na entrada quanto na saída do equipamento.

Estando as principais soluções para o projeto determinadas, o próximo passo dado foi o detalhamento destas, com o objetivo de facilitar o entendimento do projeto nas fases posteriores e torná-lo mais concreto, através da confirmação dos valores e alternativas escolhidas.

Com isso, foram confeccionados um desenho, presente no ANEXO D, e assim definiu-se através deste uma lista dos materiais, equipamentos e instrumentos a serem usados na construção do trocador de calor, bem como suas respectivas quantidades e aplicações:

- Tubo de cobre, diâmetro 1/2" (5,00 metros): duto externo do trocador e compartimento de alojamento da resistência;
- Tubo de cobre, diâmetro 1/4" (10,00 metros): duto interno do trocador e tubulação auxiliar de acesso e descarga do equipamento;
- Redução de cobre, diâmetro 1/2" - 1/4" (14 unidades): 8 para o trocador de calor, 4 para os rotâmetros e 2 para o compartimento de alojamento da resistência;
- Redução de cobre, diâmetro 1" - 1/2" (2 unidades): 2 para os rotâmetros;
- Curva de 90 graus de cobre, diâmetro 1/4" (14 unidades): 6 para o trocador de calor e 8 para a tubulação auxiliar;
- Tê de cobre, diâmetro 1/4" (4 unidades): 4 para a tubulação auxiliar;

- Tubo para isolamento térmico em polietileno expandido (Tubex), diâmetro interno de 1/4" (2,0 metro): isolamento térmico da parte externa da tubulação interna do trocador;
- Tubo para isolamento térmico em polietileno expandido (Tubex), diâmetro interno de 1/2" (8,0 metros): isolamento térmico da tubulação externa do trocador e do compartimento de alojamento da resistência;
- Válvula esfera, corpo de cobre/latão, diâmetro 1/4" (6 unidades): dutos auxiliares;
- Válvula agulha, corpo de cobre/latão, diâmetro 1/4" (2 unidades): logo depois da seção de separação dos fluidos;
- Chuveiro, 6400 W, 220 V (1 unidade): tubulação de fluido quente;
- Termopar (fio), tipo J, comprimento 2 m (4 unidades): entradas e saídas do trocador para fluidos quente e frio;
- Rotâmetro, escala de 0 ~ 0,3 Kg/s (2 unidades): entrada do trocador para fluidos quente e frio;
- Conectores 1/4" (flange) – 1/4" (rosca NPT) e 1/4" NPT – 1/4" NPT, corpo latão (20 unidades): conexão das válvulas agulha e esfera com a tubulação;
- Conectores 1/4" (flange) – 1/4" (rosca NPT) e 1/4" NPT – 1/2" NPT (4 unidades): conexão dos rotâmetros com a tubulação;
- Durepox (1 rolo): vedação do chuveiro;
- Teflon (1 rolo): vedação de roscas;
- Varetas de solda, 40 % de prata na composição (10 unidades): soldas em geral.

É importante salientar que o desenho encontrado no ANEXO D não tem caráter técnico, visto que alguns instrumentos usados não foram representados da maneira mais correta, requisito de um desenho técnico, sendo que o único intuito deste é o de facilitar a visualização do equipamento para as pessoas envolvidas na etapa de construção, além de outras que tiveram contato com o projeto.

SUPRIMENTOS

Esta etapa corresponde a parte de suprimento de um projeto de engenharia. Toda atividade realizada desde que uma lista de materiais para um projeto é gerada até a entrega dos materiais e equipamentos ao seu destino final, imediatamente após passar por uma atividade de inspeção. Toda etapa de suprimento de um projeto deve se comprometer com a compra dos produtos necessários pelo menor preço, melhor qualidade possível - ou seja, melhor custo-benefício - dentro do prazo estipulado.

O primeiro passo logo após a geração de uma lista de materiais é a especificação dos mesmos. Essa etapa corresponde à listagem de todas as características de um item a ser comprado de forma a facilitar a identificação do mesmo por parte do fornecedor, evitando incômodos e mau entendidos na hora da compra e do recebimento. Para a especificação dos materiais para este projeto, os materiais foram divididos em três partes: tubulação e mecânica, elétrica e instrumentação, de acordo com as Tabs. 5, 6 e 7 abaixo.

Tabela 5: Especificação dos materiais (tubulação e mecânica)

Descrição	Dimensão	Sch.	Material	Qtde	Un.
Tubo rígido, sem costura, soldável	$d = 1/2"$	$t = 1\text{mm}$	Cobre	5	m
Tubo rígido, sem costura, soldável	$d = 1/4"$	$t = 1\text{mm}$	Cobre	10	m
Redução, soldável	$d = 1/2" - 1/4"$	$t = 1\text{mm}$	Cobre	14	pç
Curva 90º, soldável	$d = 1/4"$	$t = 1\text{mm}$	Cobre	14	pç
Válvula Esfera, acionamento manual	$d = 1/4"$		Latão	6	pç
Tubex	$d = 1/4"$	$t = 9\text{mm}$		2	m
Tubex	$d = 1/2"$	$t = 9\text{mm}$		8	m
Tê, soldável	$d = 1/4"$	1 mm	Cobre	4	pç
Válvula Agulha, acionamento manual	$d = 1/4"$		Latão	2	pç
Conecotor (flange – rosca)	$1/4" - 1/4"$		Latão	24	pç
Conecotor (rosca – rosca)	$1/4" - 1/4"$		Latão	20	pç

Conecotor (rosca – rosca)	1/4" – 1/2"		Latão	4	pç
Rolo de Durepoxy				1	pç
Veda-rosca			Teflon	1	pç
Vareta para solda			10 % de Prata	10	pç

Tabela 6: Especificação dos materiais (elétrica)

Descrição	Potência (W)	Tensão (V)	Qtde	Unidade
Chuveiro elétrico	6400	220	1	unid.

Tabela 7: Especificação dos materiais (instrumentação)

Descrição	Qtde	Un.	Modelo	Obs
Termopar (fio)	4	unid.	Tipo J	comp. 2m, solda na ponta, isolação de pvc
Rotâmetro	2	unid.		vazão de 0 a 0.3 kg/s, temperatura entre 20 e 70°C, pressão atmosférica, fluido água, diam. 1"

Após a especificação, o próximo passo foi a procura por fornecedores em potencial e o envio de cartas-convites a estes. Este artifício serviu como base para a emissão das cotações e orçamentos e, de posse dessas informações, o responsável pelo projeto pôde realizar análises técnicas e comerciais e escolher as propostas mais viáveis. No ANEXO E deste trabalho se encontra um modelo de uma carta convite a um dos muitos fornecedores em potencial. Na busca por fabricantes e comerciantes dos itens da lista de materiais usou-se como fonte o site Guia NEI (www.guianei.com.br), que por ter auxiliado muito nessa parte do trabalho, merece ser lembrado neste documento.

Tabela 8: Os materiais e seus respectivos fornecedores

Descrição	Qtde	Unidade	Fornecedor
Tubo rígido	5	m	Shock Metais
Tubo rígido	10	m	Shock Metais
Redução	14	pç	Casa da Oca
Curva 90º	14	pç	Shock Metais
Válvula Esfera	6	pç	Divaltec
Tubex (1/4")	2	m	Disparcon
Tubex (1/2")	8	m	Disparcon
Tê	4	pç	Casa da Oca
Válvula Agulha	2	pç	Conectron
Chuveiro	1	pç	Bi-Campeão Ferragens
Conectores	48	pç	Limarco
Vareta de solda	10	pç	Supercromo
Teflon	1	pç	Limarco
Durepox	1	pç	Bi-Campeão Ferragens

Com o recebimento das cotações e a realização das análises, eis acima a Tab. 8 com os fornecedores detentores das melhores propostas para cada item da lista de materiais, onde a compra foi, então, realizada.

Tendo os fornecedores selecionados, em seguida seria feita a confecção e emissão de uma ordem de compra ou uma carta-convite, que nada mais é do que uma confirmação do pedido de um determinado produto junto ao seu fornecedor, assinada por este. No ANEXO E deste trabalho encontra-se um exemplo de carta de intenção feita junto a um dos fornecedores (Shock Metais).

Com o recebimento dos materiais, o próximo e último passo dessa etapa foi a inspeção dos mesmos. Esta atividade tem por base a verificação de todas as características do item suprido pertinentes à função desempenhada por este no projeto por meio de desenhos, folhas de dados e certificados de testes. Os parâmetros a serem checados e os testes a serem realizados são definidos pelo Plano de Inspeção e Testes. No caso deste projeto foram feitos apenas o teste dimensional, o qual

verifica se as dimensões (e a metragem no caso dos tubos) do item adquirido estão de acordo, e o de certificado de material. Após passarem pela inspeção, os ficam então autorizados para serem montados. No ANEXO E encontra-se um exemplo de certificado de material para um tubo de cobre, com 1/2" de diâmetro, obtido junto ao fornecedor (Shock Metais).

FABRICAÇÃO

Com toda a definição do projeto feita e os materiais adquiridos, inspecionados e liberados para utilização, faltava apenas tornar todo o trabalho feito anteriormente em realidade e assim deu-se início à etapa de fabricação.

A construção do equipamento se deu de forma relativamente simples, visto que os processos e procedimentos utilizados são comumente empregados na montagem de todo tipo de máquina em geral. Todas as uniões entre os dutos e conexões de cobre, além dos termopares foi feita por meio de uma solda tipo Oxi-Acetileno (exceção feita à cantoneira de suporte dos rotâmetros e chuveiro, soldada com eletrodo). A Fig. 5 mostra uma peça sendo soldada por uma solda tipo Oxi-Acetileno. No caso das ligações entre os tubos com os medidores de vazão, com as válvulas e com o chuveiro, utilizou-se um conector para roscas NPT e flanges nas devidas dimensões dos materiais.

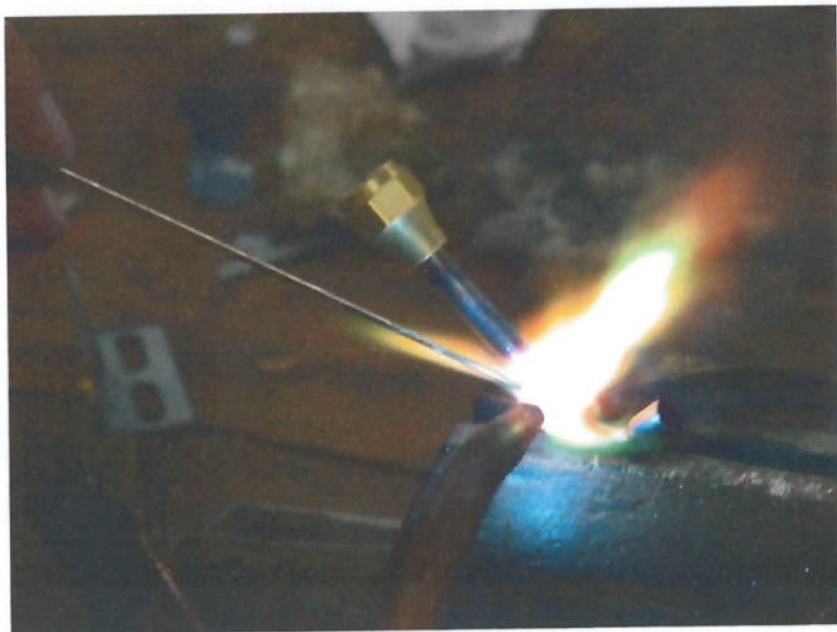


Figura 5: Execução de solda tipo Oxi-Acetileno

Quanto ao procedimento de montagem, o primeiro passo foi o corte dos dutos para a tubulação interna e externa do trocador. Para haver interligação entre os tubos externos possibilitando com que o fluido aquecido executasse os 4 passes previstos, foi feito um furo no duto externo sem que o interno fosse atingido e soldou-se um pequeno trecho com diâmetro $1/4"$. Enquanto isso, o artifício usado para a linha do fluido com temperatura mais baixa, como pode ser visto no desenho do ANEXO D, foi a utilização de curvas soldadas aos tubos, de modo que a água não aquecida pudesse completar o seu percurso. Na Fig. 6, pode-se ver na parte de cima o resultado do método adotado.



Fig. 6: Detalhe da montagem das curvas para a tubulação interna do trocador

Já o fechamento do tubo externo foi feito ao se soldar uma redução $1/2" - 1/4"$, vedando a passagem entre este e o interno. Na Fig. 7, pode-se ver como estava montados os tubos internos e externos antes da redução sendo soldada e na Fig. 8, como ficou depois.



Figura 7: Detalhe dos tubos do trocador antes da tampa de vedação



Figura 8: Detalhe dos tubos do trocador depois de soldada a tampa de vedação

Quando a parte mais importante do trocador já estava fabricada, passou-se então a cortar e soldar os tubos e conexões do circuito auxiliar do equipamento. Como pode ser visto na Fig. 9, tal qual aparece no desenho, as válvulas esfera aparecem logo após um tê de forma que possa-se alternar entre o circuito de contra corrente e o de corrente paralela através da abertura e fechamento dessas válvulas. Tanto para as válvulas esfera quanto para as de agulha, a montagem com o tubo se deu por meio de

conectores rosqueadas e flangeadas, sendo 2 conjuntos para cada dispositivo (um para a entrada e outro para a saída).

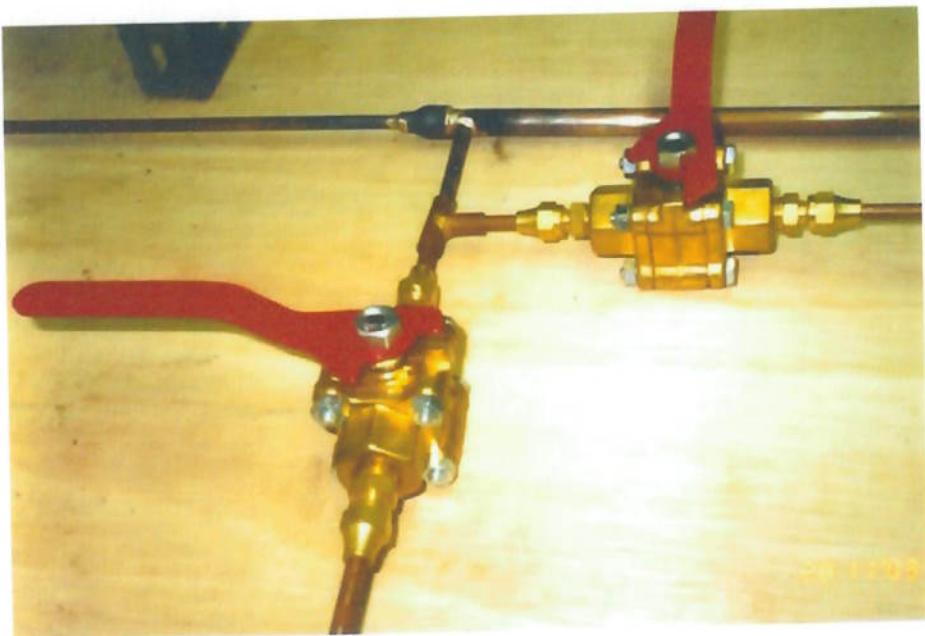


Figura 9: Detalhe da montagem do circuito auxiliar

Simultaneamente à construção do circuito auxiliar foi feita também a montagem do suporte para o chuveiro e os rotâmetros. Como já foi afirmado anteriormente, esse processo se deu por meio de solda com eletrodo e, com isso, um simples pedaço de canaleta se transformou em um suporte. Neste, os dispositivos de medição de vazão mássica são fixos diretamente com parafusos, enquanto que o chuveiro possui uma abraçadeira, presa também por parafusos. Essa montagem pode ser vista nas Figs. 10 e 11 abaixo.



Figura 10: Suporte do rotâmetro montado na mesa



Figura 11: Detalhe da fixação do suporte na mesa

Com o término da montagem dos tubos, válvulas, chuveiro e instrumentos de medição no seu devido lugar, foram feitos alguns testes no tocante a vazamentos nas soldas e na vedação do chuveiro e, após este, a verificação da parte elétrica e da eficiência da resistência ao aquecer a água. Durante esta etapa, constatou-se que a

pressão interna do chuveiro era muito alta levando-se em consideração a resistência do material usado para vedação. Assim sendo, outra solução para o aquecimento da água teve de ser buscada. A única alternativa encontrada foi o uso de uma resistência própria para esse tipo de aplicação, revestida por um tubo com isolamento térmico. A Fig. 12 mostra a parte de tubulação e instrumentação do equipamento quase montada, porém ao se comparar a foto com o desenho, vê-se que faltavam ainda alguns pequenos detalhes.



Figura 12: Vista superior da parte de tubulação do equipamento

O último passo na construção do trocador é a implantação do material isolante. Como o Tubex já tem a sua principal aplicação destinada ao isolamento de dutos, sua instalação foi de certa forma simples. Basta cortar o material num tamanho e igual ao

tubo a ser isolado e fazer um corte lateral para abri-lo e encaixá-lo de modo que fique ajustado e sem folga. Para o encaixe em reduções é recomendado que o diâmetro do isolante seja igual ao do lado maior da redução. No lado menor, coloca-se lã de vidro para completar o espaço vazio. A fixação do Tubex e do próprio trocador é feita com uma abraçadeira prendendo-os a alguns calços que suspendem o equipamento em relação à mesa. A Fig. 13 mostra o tubo já revestido com o seu isolante e a abraçadeira fixando-o.

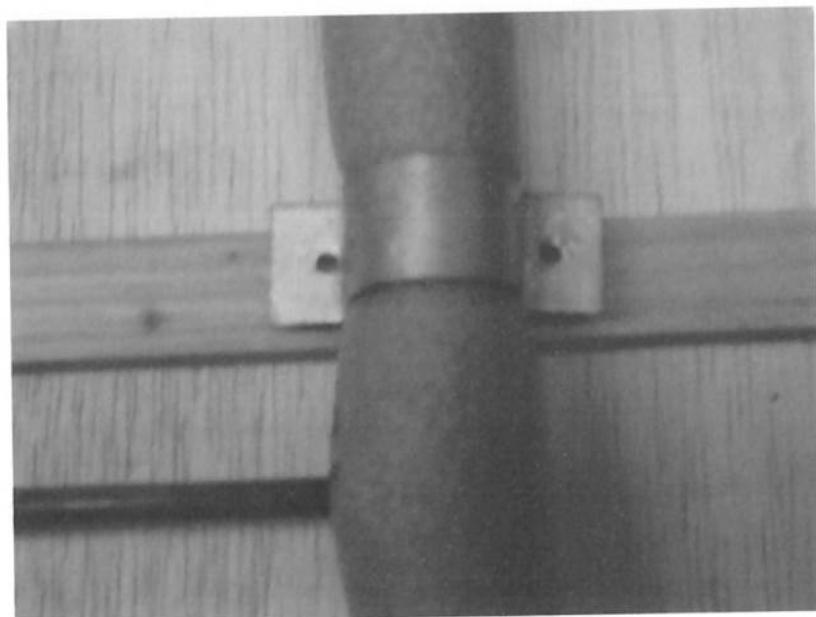


Figura 13: Fixação de tubo por abraçadeira

OPERAÇÃO E TESTES

Esta seção tem o objetivo de ensinar o futuro usuário a operar o equipamento, extraíndo os valores das vazões mássicas e temperaturas corretamente. A primeira ação a ser tomada é ajustar a configuração das válvulas esfera para a utilização do trocador como contra corrente ou corrente paralela. No desenho encontrado no ANEXO D, pode-se reparar que as válvulas estão numeradas de 1 a 6. Para o equipamento operar como corrente paralela, as válvulas 1, 3 e 5 devem estar abertas. Com as válvulas 2, 4 e 6 na posição de abertura, trabalha-se com o trocador do tipo contra corrente. Para saber se a válvula está aberta ou não, basta olhar a posição da alavanca, caso esta esteja paralela ao corpo da válvula, a posição de abertura está confirmada. Para fechá-la basta girar a alavanca até que esta fique aproximadamente perpendicular ao corpo.

Ao se abrir a torneira do laboratório, o primeiro passo se faz pela regulação da vazão dos dois fluxos, através da válvula agulha. Para o aquecimento da água, liga-se a tomada da resistência em alguma tomada e o único cuidado a ser tomado é o de manter água sempre circulando, afim de que esta não queime. Um método que pode ser empregado para acelerar o processo de aquecimento, é o corte momentâneo no fluxo de água fria fechando a válvula 6, para o trocador de corrente paralela, ou 4, para o contra corrente. A medida da vazão é diretamente obtida através do rotâmetro. O operador, nesse caso, só terá que se preocupar em converter a unidade da medida dada pelo instrumento (l/h) para a que será usada nas anotações, se necessário. A obtenção dos valores de temperatura, no entanto, não é direta. É necessário o uso de um multímetro, e com a voltagem medida, obtém-se o valor da temperatura, através de uma relação entre as duas grandezas, relacionada com o material do termopar, que

é caracterizado como uma termoresistência. Além disso deve-se mergulhar as pontas soltas dos termopares em um algum fluido com temperatura constante, o qual é denominado de “zero físico” e a sua temperatura é a temperatura de referência, ou seja, a verdadeira temperatura da seção é a soma da temperatura dada pelo termopar com a de referência.

Para a parte de testes, algumas modificações tiveram de ser feitas em relação ao formato final do equipamento. As medições de vazão foram realizadas através do método balde – balança – cronômetro, pois os rotâmetros ainda não haviam sido comprados (os que aparecem nas fotos tem efeito apenas ilustrativo). Além disso, não foi ainda implantado um sistema para destinar toda a água que sai do trocador e, desta forma, toda a coleta foi feita por baldes.

Durante a etapa de testes os principais problemas detectados se em relação ao funcionamento da configuração de contra corrente e aos valores de vazão mássica encontrados, muito abaixo dos obtidos na medição destinada à obtenção da curva da rede, já mencionada anteriormente. Para o fluido aquecido, o valor máximo de vazão detectado foi de 0,038 kg/s e para o frio foi de 0,035 kg/s. Somando as duas vazões o valor total é de 0,073 kg/s, muito abaixo dos 0,288 kg/s encontrados anteriormente. A menos que entre as duas medições alguma grande alteração na rede tenha ocorrido, o único fator plausível para tal queda é a perda de carga sofrida pelo fluido durante todo o percurso dentro do trocador já que este possui vários elementos que contribuem para a obstrução da passagem do fluido como, por exemplo, válvulas, curvas, reduções, entre outros.

Quanto ao não funcionamento da configuração de contra corrente, foram feitas medições de temperaturas para várias vazões de fluido aquecido e frio e em todos

eles o valor de saída do fluido frio excedia consideravelmente o do quente. Especula-se que a razão para tal fenômeno é a pequena distância entre o termopar que mede a saída do frio em relação ao que mede a entrada do quente e, com isso, o tubo de saída poderia estar se aquecendo por condução. Isso também pode ser visto na configuração de corrente paralela, pois a temperatura de entrada do fluido frio (a seção de entrada do fluido frio no corrente paralela corresponde à de saída no contra corrente) variou entre 27 e 29°C, sendo que o normal seria em torno de 25 °C (temperatura ambiente). Para esse problema sugere-se a mudança de posição do termopar que realiza essa medição para um local em que não seja afetado pela temperatura de entrada do fluido quente.

Abaixo encontra-se a Tab. 4 que possui todos os valores medidos (vazões mássica e temperaturas de entrada e saída para ambos os fluxos), além de outros calculados (diferença de temperatura por média logarítmica e potência trocada) que ilustram o funcionamento do equipamento. A temperatura de referência nesse caso foi de 26 °C. Como o trocador não está operando como deveria na configuração de contra corrente, as medidas foram feitas apenas para corrente paralela.

Tabela 9: Valores medidos durante o teste

Ponto	m_q (kg/s)	m_f (kg/s)	T_{f1} (°C)	T_{q1} (°C)	T_{f2} (°C)	T_{q2} (°C)	ΔT_q (°C)	ΔT_f (°C)	ΔT_{ml} (°C)	P (W)	U (W/m ² °C)
1	0,013	0,029	27,0	56,0	33,0	34,0	23,0	6,0	8,315	1249,82	2152,74
2	0,010	0,026	27,0	70,0	38,0	39,0	32,0	11,0	11,167	1337,60	1715,63
3	0,026	0,023	28,0	40,0	33,0	34,0	7,0	5,0	4,427	760,760	2461,42
4	0,038	0,035	27,0	36,0	29,0	30,0	7,0	2,0	3,641	1111,88	4373,85
5	0,038	0,020	28,0	36,0	31,0	32,0	5,0	3,0	3,366	794,20	3379,09
6	0,038	0,006	28,0	35,0	32,0	33,0	3,0	4,0	3,083	476,52	2213,47
7	0,004	0,035	29,0	98,0	34,0	36,0	64,0	5,0	18,921	1070,08	810,00
8	0,004	0,014	28,0	98,0	44,0	47,0	54,0	16,0	21,271	902,88	607,95
9	0,007	0,006	26,0	86,0	58,0	59,0	28,0	32,0	14,410	819,28	814,30
10	0,036	0,012	29,0	36,0	31,0	32,0	5,0	2,0	3,083	752,40	3494,95

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todo objetivo por trás de todo trabalho escolar é sempre de fazer com que o aluno aplique utilize o seu conhecimento sobre algum determinado assunto e que no final tenha sempre algo novo aprendido. Esta foi a principal razão de o responsável por este trabalho ter escolhido este tema para desenvolver ao longo do ano. Além de ter sido uma ótima oportunidade de relembrar conceitos de uma das mais importantes matérias da engenharia mecânica (Transferência de Calor), este trabalho foi uma grande fonte de aprendizado para o que virá depois desses 5 anos de graduação: o exercício da real engenharia, já que ao longo do ano, passou-se por todas as etapas de concepção e concretização de um projeto, saindo de algo próximo do nada para se chegar a um equipamento pronto e funcionando.

Muitos erros e acidentes aconteceram, a maioria graças à falta de experiência do aluno em vivenciar situações similares, no entanto, à medida em que os reveses apareciam e eram solucionados, o projeto ganhava força e o aluno motivação para começar um novo passo, e assim, mesmo percorrendo um caminho um pouco oblíquo, no final teve-se a certeza de que tudo acabaria bem, independente do resultado, pois as duas metas citadas nas primeiras linhas deste tópico foram cumpridas com sucesso.

BIBLIOGRAFIA

- Incropera, F.P., De Witt, D.P., 1998, "Fundamentos de transferência de calor e de massa", 4^a ed., Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil;
- Fraas, A.P., Ozisik, M.N., 1965, "Heat Exchangers Design", Wiley, Nova Iorque, EUA;
- Callister, W.D., 2000, "Material's science and engineering: an introduction", 5a ed., Wiley, Nova Iorque, EUA;
- Dieter, G.E., 1986, "Mechanical Metallurgy", 3a ed., McGraw-HILL, Nova Iorque, EUA;
- www.guianei.com.br;
- www.lorenzetti.com.br;
- JP Engenharia, 2002, "Expediting and Inspection – Technical Qualification", JP Brasil.

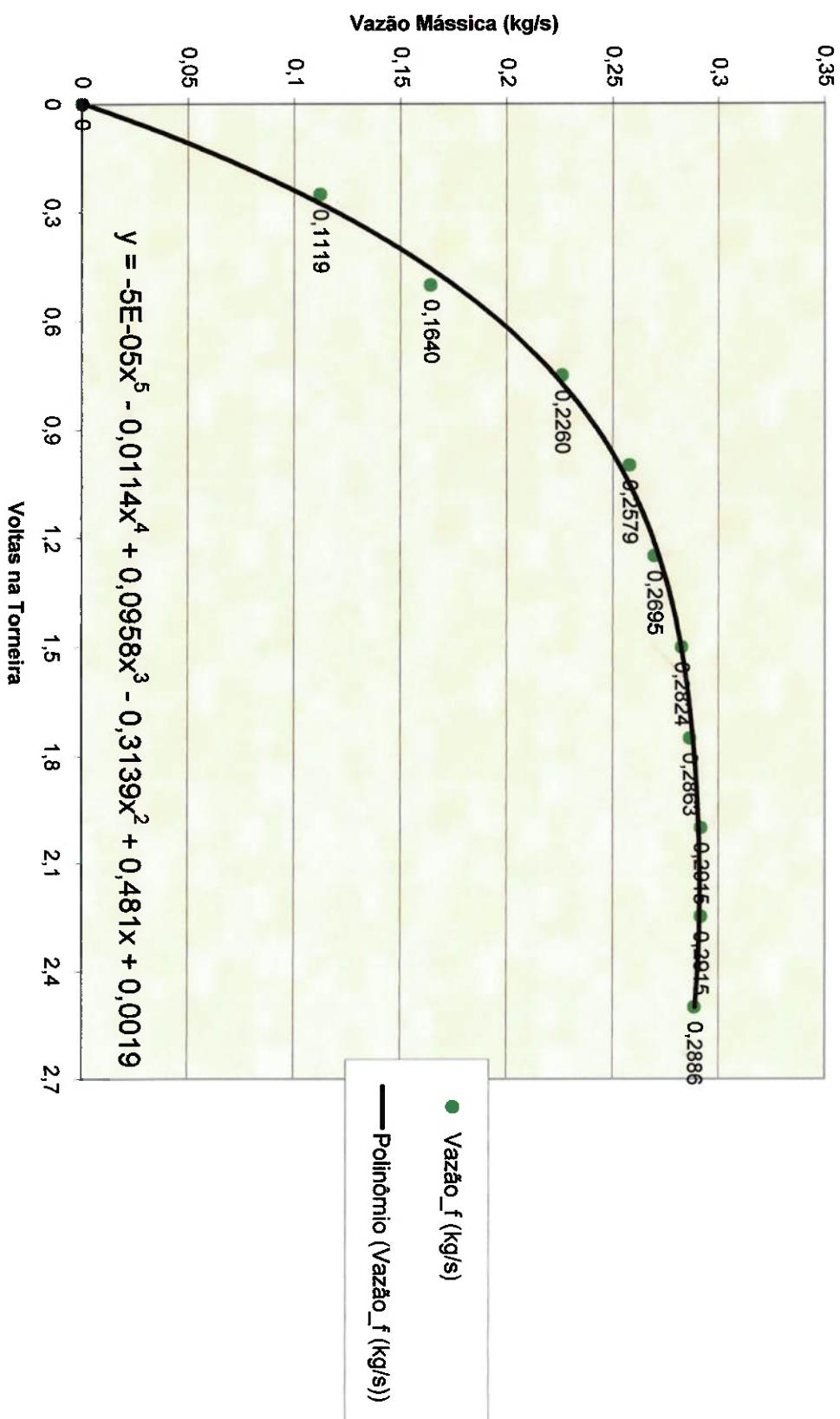
ANEXO A: CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS

Cronograma Para Projeto Integrado I e II (Tarefas Realizadas)												
Mês	Março	Abri	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro		
Semana	1 2 3 4											
Def. das Restrições												
Med. da Vazão na Rede												
Med. da Tensão na Poli												
Cálculos												
Dim. e Est. do TC												
Sist. de Aquec. da Áqua												
Características do TC												
Número de Passes												
Vazão												
Busca de Soluções												
Número de Passes												
Material												
Medidores												
Vedaçāo da Resistēnciā												
Tubos e Conexões												
Matriz de Decisão												
Matriz de Decisão												
Def. dos Critérios												
Matriz de Decisão												
Pré Proj. e Rel. Parcial												
Desenhos Técnicos												
Reunir Bibliografia												
Confeccāo do Relatório												
Compra das Peças												
Pesq. de Fabric. e Preços												
Compra das Peças												
Construção												
Soldagem												
Montagem												
Colocacāo dos Medidores												
Ensaios												
Ensaios												
Correções a Serem Feitas												
Proj. e Relatório Final												
Resultados dos Ensaios												
Confeccāo do Relatório												
Apresentacāo Final												

Projeto
Interrompido
por falta
de verbas

ANEXO B – CURVA DA VAZÃO MÁSSICA DA REDE

Gráfico da Vazão do Registro da Rede

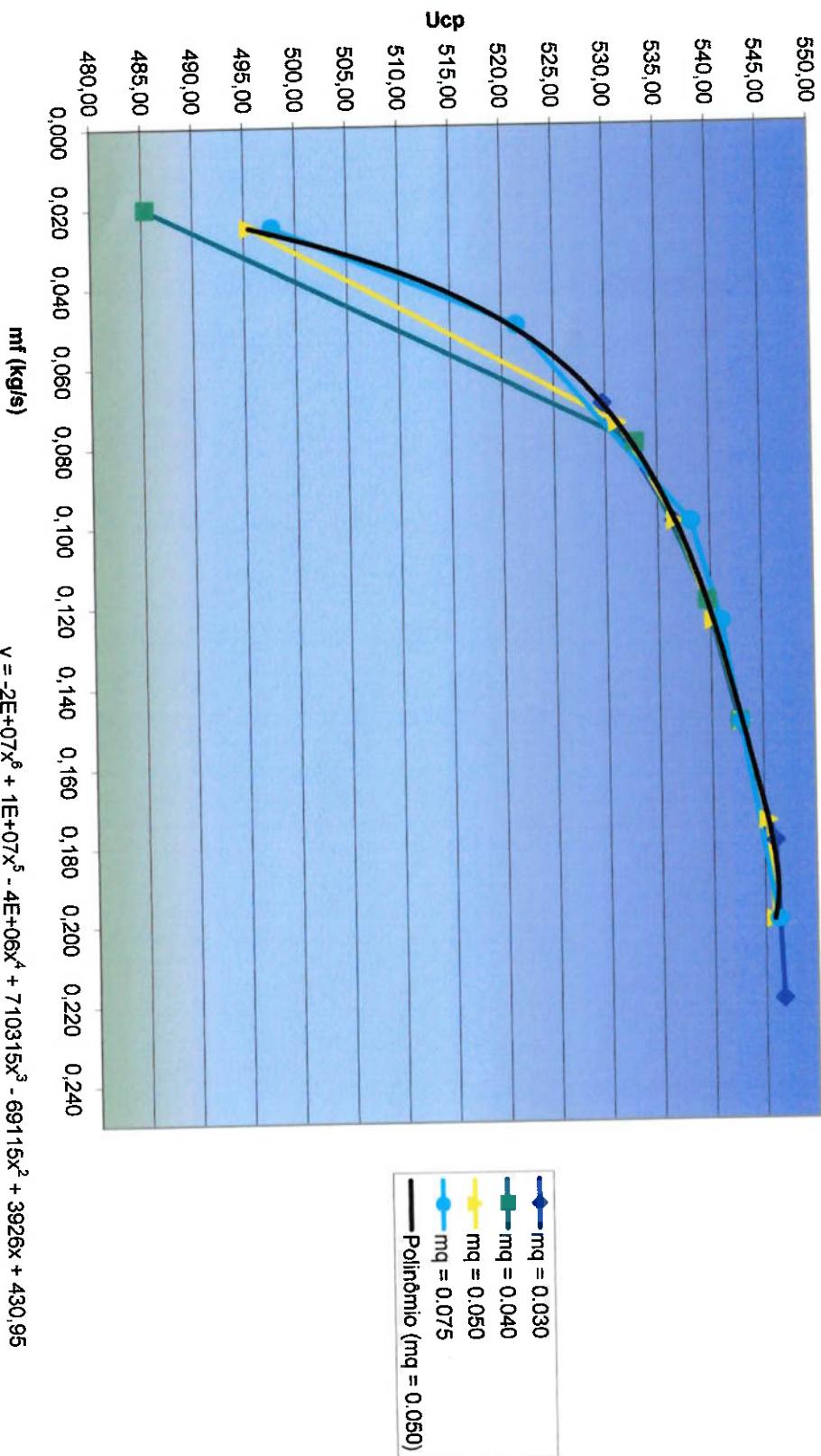


ANEXO C – RESULTADOS DOS CÁLCULOS

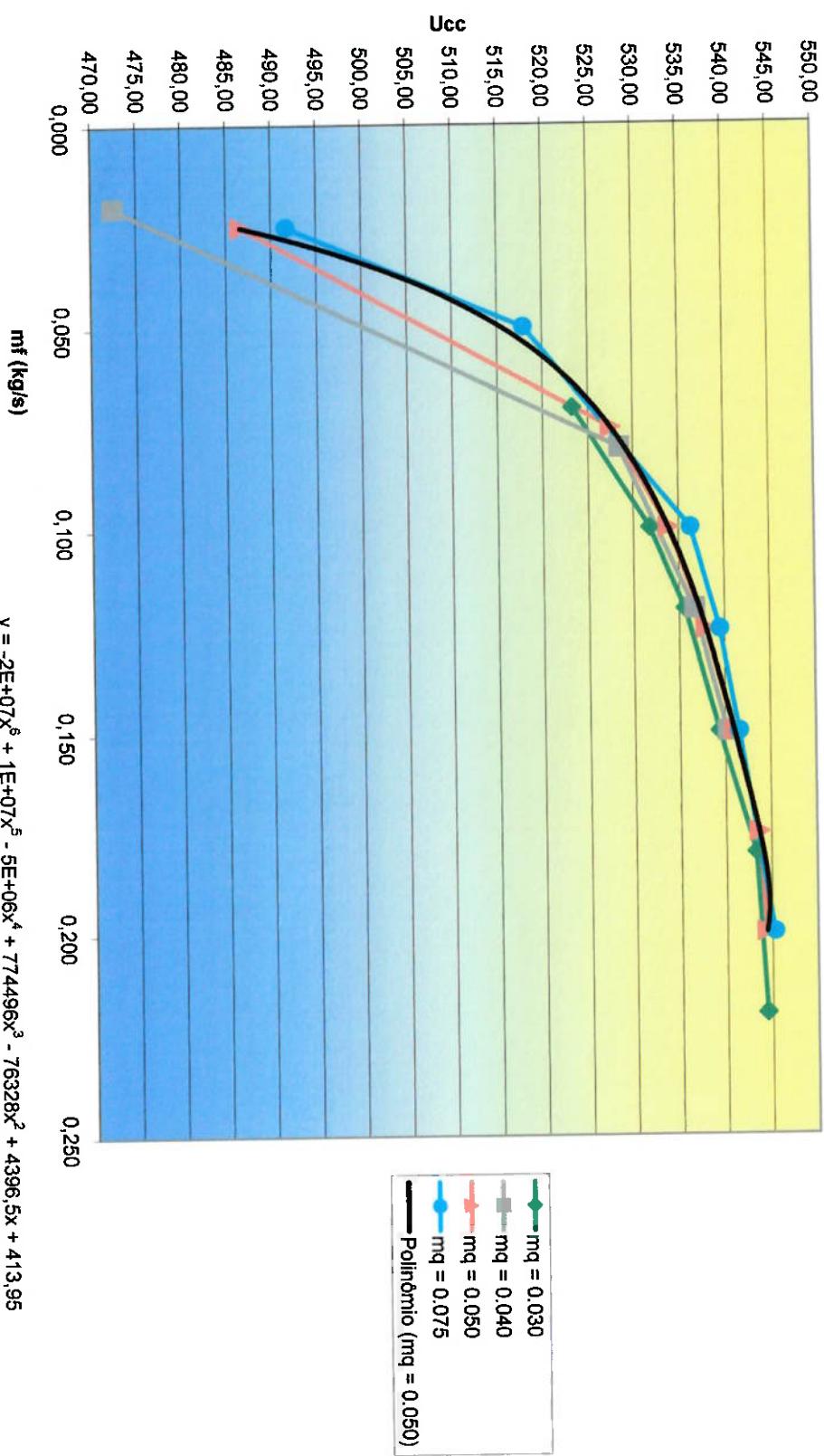
L (m)	mq	Mq	mf	Mf	dTq	dTf	Potencia	Tf1	Tq1	Tf2	dTmlcp	dTmlcc	A (m2)	Ucp	Ucc	
3.500	0,030	108.000	0,070	252.000	12.300	5,271	154.2.420	20.000	71.101	25.271	58.801	41.700	42.218	0,0698	529.77	523.27
3.500	0,030	108.000	0,100	360.000	12.650	3,795	158.6.310	20.000	71.101	23.795	58.451	42.348	42.726	0,0698	536.51	531.77
3.500	0,030	108.000	0,120	432.000	12.800	3,200	1605.120	20.000	71.101	23.200	58.301	42.601	42.922	0,0698	539.64	535.61
3.500	0,030	108.000	0,150	540.000	12.950	2,590	1623.930	20.000	71.101	22.590	58.151	42.862	43.124	0,0698	542.64	539.35
3.500	0,030	108.000	0,180	648.000	13.080	2,180	1640.232	20.000	71.101	22.180	58.021	43.021	43.242	0,0698	546.07	543.27
3.500	0,030	108.000	0,220	792.000	13.150	1,793	1649.010	20.000	71.101	21.793	57.951	43.199	43.382	0,0698	546.72	544.42
3.500	0,040	144.000	0,020	72.000	5.820	11.640	973.104	20.000	58.326	31.640	52.506	28.716	29.500	0,0698	485.34	472.45
3.500	0,040	144.000	0,080	288.000	7.250	3.625	1212.200	20.000	58.326	23.625	51.076	32.586	32.855	0,0698	532.80	528.44
3.500	0,040	144.000	0,120	432.000	7.480	2,487	1247.312	20.000	58.326	22.487	50.866	33.104	33.280	0,0698	539.66	536.63
3.500	0,040	144.000	0,150	540.000	7.550	2,013	1262.360	20.000	58.326	22.013	50.776	33.316	33.468	0,0698	542.70	540.23
3.500	0,050	180.000	0,010	36.000	3.000	15.000	627.000	20.000	50.661	35.000	47.661	20.351	21.095	0,0698	441.27	425.71
3.500	0,050	180.000	0,025	90.000	4.000	8.000	836.000	20.000	50.661	28.000	46.661	24.166	24.606	0,0698	495.48	486.61
3.500	0,050	180.000	0,075	270.000	4.710	3,140	984.390	20.000	50.661	23.140	45.951	26.542	26.728	0,0698	531.19	527.50
3.500	0,050	180.000	0,100	360.000	4.820	2,410	1007.380	20.000	50.661	22.410	45.841	26.884	27.028	0,0698	536.69	533.83
3.500	0,050	180.000	0,125	450.000	4.890	1,956	1022.010	20.000	50.661	21.956	45.771	27.211	0,0698	540.27	537.93	
3.500	0,050	180.000	0,150	540.000	4.940	1,647	1032.460	20.000	50.661	21.647	45.721	27.235	27.334	0,0698	542.97	540.99
3.500	0,050	180.000	0,175	630.000	4.980	1,423	1040.820	20.000	50.661	21.423	45.681	27.334	27.421	0,0698	545.37	543.65
3.500	0,050	180.000	0,200	720.000	5.000	1,250	1045.000	20.000	50.661	21.250	45.661	27.417	27.493	0,0698	545.91	544.40
3.500	0,075	270.000	0,025	90.000	1.830	5.490	573.705	20.000	40.440	25.490	38.610	16.511	16.714	0,0698	497.67	491.63
3.500	0,075	270.000	0,050	180.000	2.060	3.090	645.810	20.000	40.440	23.090	38.380	17.741	17.860	0,0698	521.37	517.89
3.500	0,075	270.000	0,100	360.000	2.210	1,658	692.835	20.000	40.440	21.658	38.230	18.439	18.505	0,0698	538.16	536.24
3.500	0,075	270.000	0,125	450.000	2.240	1,344	702.240	20.000	40.440	21.344	38.200	18.591	18.645	0,0698	541.01	539.45
3.500	0,075	270.000	0,150	540.000	2.260	1,130	708.510	20.000	40.440	21.130	38.180	18.694	18.740	0,0698	542.83	541.51
3.500	0,075	270.000	0,200	720.000	2.290	0.859	717.915	20.000	40.440	20.859	38.150	18.822	18.857	0,0698	546.29	545.28

gr	V	R	Do	Di	RwA
4180	213	7,08	0,0127	0,00635	4,89E-06

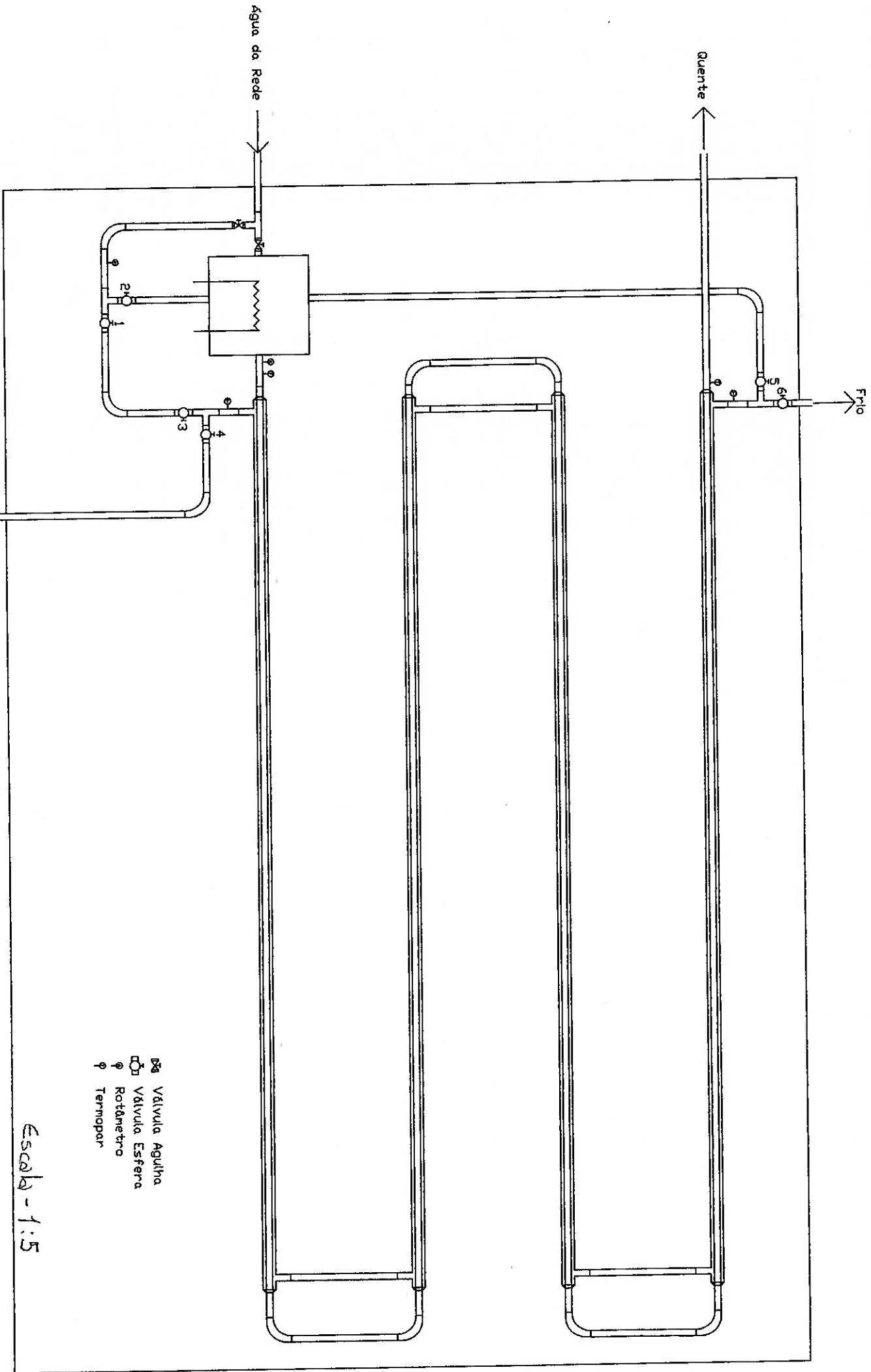
Relação de U e mq - Corrente Paralela



Relação entre Ucc e mf



ANEXO D – DESENHO DO EQUIPAMENTO



Escala - 1:5

■ Válvula Agulha
 □ Válvula Estreita
 ○ Rotâmetro
 — Termômetro

ANEXO E – DOCUMENTOS DE SUPRIMENTOS



JP ENGENHARIA

Para: Contuflex a/c Joel

Empresa: JP Engenharia

Local: São Paulo

Fax N°: 6941 8044

De: Pedro Ramos

Operação: 8000/Politécnica

Reg. N°: 8000/07

Data: 09/10/2003

Sede: Rua Verbo Divino, 1061 • 04719-002 • São Paulo • SP • Fone (11) 5180.9500 • Fax (11) 5181-3842 •

Ref.: Obra USP

Ass.: Cotação de material

U R G E N T E

Prezados Senhores

Vimos pelo presente solicitar preços e demais condições comerciais para o fornecimento dos materiais abaixo listados. Favor considerar que o fluido que passará pelos tubos, conexões e válvulas é água.

Solicitamos resposta URGENTE em mesma via.

Descrição

- 1- Válvula agulha corpo de cobre/latão extremidade soldável diâmetro 1/4", 2 peças
- 2- Válvula esfera corpo de cobre/latão extremidade soldável diâmetro 1/4" 6 peças

Atenciosamente,

Pedro Paulo Ramos
JP Engenharia – Suprimentos
Fone: 55 11 ** 5180 9656
Cel: 55 11 ** 9361 6931
Fax : 55 11** 5181 3842



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Prof. Mello Moraes, 2230 - Prédio da Engenharia Mecânica - Cidade Universitária - São Paulo - SP Cep: 05508-900

São Paulo, 11 de Novembro de 2003.

8000/02

AÇOS DIVALTEC LTDA.
Rua Dr. Pedro Mendes, 74 - VI. Santa Tereza
São Paulo/Sp

At.: Sr. Paulo

Prezados senhores,

Como representante do **DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**, localizada na Av. Prof. Melo Moraes, 2231, Prédio da Engenharia Mecânica, Cidade Universitária, portadora do CNPJ nº 63025530/0024-09, isenta de Inscrição Estadual e a partir desse momento tida como a **Contratante**, confirmo a aquisição dos produtos da **AÇOS DIVALTEC LTDA.**, denominada de agora em diante de **Contratada**, os quais estão listados abaixo:

- Válvula esfera, acionamento manual, corpo de cobre/latão, extremidade soldável, diâmetro 1/4", **04 unidades**.

O valor total dos equipamentos, com todos os impostos inclusos, é de **R\$ 150,00** (Cento e Cinquenta Reais), pagos à vista. A partir da assinatura do documento em questão, a Contratada está autorizada a prosseguir imediatamente com todas as atividades necessárias para o pleno fornecimento do item em demanda, principalmente na obtenção das garantias e seguros necessários. O prazo para a realização e disposição dos bens para retirada é de **02 dias Úteis**, a partir da assinatura desta carta.

De momento, solicito que V.Sras. confirme a aceitação desta oferta previamente estabelecida e descrita de acordo com esta Carta de Intenção, através da assinatura de uma pessoa autorizada e devolva uma cópia assinada.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Prof. Mello Moraes, 2230 - Prédio da Engenharia Mecânica - Cidade Universitária - São Paulo - SP Cep: 05508-900

Atenciosamente,

Pedro Paulo M. Ramos
JP Engenharia

**Confirmação de
Recebimento:**

_____ (assinatura)

Nome _____
(legível)

Data _____

SHOCK METALS

CERTIFICADO N°. 17518 NOTA FISCAL N°. 120810 DATA: 11/11/2003

CLIENTE

**ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE
SAO PAULO**

PEDIDO N°

MATERIAL

TUBO COBRE RIGIDO 12-70 X 0,79MM

LIGA

CA-122

ANÁLISE QUÍMICA (%)

Cr	Cu	Sn	Pb	Zn	Al	Mn	Fe
—*	RES TM	—*	—*	—*	—*	—*	—*

Ni	P	Co	Si	Ti	Sb	Mg	Be
—%	0.9±5	—%	—%	—%	—%	—%	—%

OBSERVAÇÕES:

São Paulo, 11 de Novembro de 2003.

Controle de Qualidade