

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

LEONARDO FELIPE DOS SANTOS

WILLIAN DE OLIVEIRA MAIA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM APARATO PARA AS AULAS
PRÁTICAS DAS DISCIPLINAS MECÂNICA DOS FLUIDOS E
HIDRÁULICA DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO *CAMPUS* ALTO
PARAOPEBA

Ouro Branco

Dezembro de 2015

Leonardo Felipe dos Santos

Willian de Oliveira Maia

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM APARATO PARA AS AULAS
PRÁTICAS DAS DISCIPLINAS MECÂNICA DOS FLUIDOS E
HIDRÁULICA DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO *CAMPUS* ALTO
PARAOPEBA

Trabalho de contextualização e integração curricular II apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel de Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profº Emmanuel Kennedy da
Costa Teixeira

Ouro Branco

Dezembro de 2015

Sumário

1	Introdução.....	4
2	Objetivo.....	5
3	Revisão de literatura.....	6
3.1	Linha de energia, linha piezométrica e perda de carga.....	6
3.1.1	Fórmula universal da perda de carga contínua	8
3.1.2	Fórmula de Hazen-Williams.....	11
3.1.3	Fórmula de Flamant.....	12
3.1.4	Expressão geral das perdas localizadas	12
3.1.5	O método dos comprimentos equivalentes.....	13
3.1.6	O método do número de diâmetros	13
3.2	Tomada intermediária entre dois reservatórios	15
3.3	Tempo de esvaziamento	15
4	Metodologia	18
4.1	Determinação do coeficiente de Flamant.....	20
4.2	Cálculo de vazão e/ou nível d'água no reservatório R_1 utilizando a equação de Flamant	222
4.3	Tomada intermediária entre dois reservatórios	244
4.4	Tempo de esvaziamento	277
5	Resultados e discussões	288
5.1	Determinação do coeficiente de Flamant.....	299
5.2	Cálculo de vazão e/ou nível d'água no reservatório R_1 utilizando a equação de Flamant	299
5.3	Tomada intermediária entre dois reservatórios	311
5.4	Tempo de esvaziamento de reservatórios	322
5.5	Considerações sobre o aparato	333
6	Conclusão.....	344
7	Referências.....	355

1 Introdução

O modelo tradicional de educação, no qual o professor apenas repassa o seu conhecimento aos alunos, sem que estes se expressem, reflitam e questionem - é cada vez mais criticado no meio educacional, principalmente observando-se que a geração atual é cada vez mais informada e tecnológica, o que faz a aula convencional perder espaço. Assim, novas ferramentas de ensino devem ser utilizadas, de forma a estimular os discentes, levando-os a busca da solução de problemas.

Diante do contexto, a postura experimental pode ser uma das soluções para facilitação do aprendizado. Para Ronqui (2009) as aulas práticas têm seu valor reconhecido. Elas estimulam a curiosidade e o interesse de alunos, permitindo que se envolvam em investigações científicas, ampliem a capacidade de resolver problemas, compreender conceitos básicos e desenvolver habilidades. Além disso, quando os alunos se deparam com resultados não previstos, desafia sua imaginação e seu raciocínio. As atividades experimentais, quando bem planejadas, são recursos importantíssimos no ensino. Apesar disso, constata-se que essas atividades representam uma parcela muito pequena das aulas realizadas.

No curso de Engenharia Civil – Campus Alto Paraopeba da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) – essa situação não é diferente. O novo projeto pedagógico do curso estipula que sejam ministradas nas disciplinas Mecânica dos Fluidos e Hidráulica nove aulas práticas em cada uma. Entretanto, isso ainda não é possível devido à ausência de aparatos suficientes que possibilitem esse número de aulas experimentais. Atualmente ocorrem seis aulas práticas em Mecânica dos Fluidos e três em Hidráulica.

Assim, esse trabalho visou, além de envolver os alunos do curso na área experimental, estimulando-os a pensar, desenvolver e executar um projeto de um aparato para aulas práticas das disciplinas citadas, de forma que permitisse maior número de experimentos em um único aparato.

2 Objetivo

Projetar e executar um aparato que possibilite um aumento no número das aulas práticas das disciplinas Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, com o intuito de apresentar suas teorias de forma prática.

2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos visam desenvolver os seguintes experimentos para as aulas práticas:

- Determinação do coeficiente de Flamant para tubulação em acrílico;
- Demonstração da variação da linha de energia devido à variação da vazão de escoamento;
- Determinação das vazões de escoamento quando se tem uma tomada de água entre dois reservatórios;
- Determinação do coeficiente de descarga de um orifício a partir do tempo de esvaziamento de um reservatório.

3 Revisão de literatura

3.1 Linha de energia, linha piezométrica e perda de carga

Quando se trata de um escoamento permanente, pode-se recorrer a equação da energia (Equação 1) para conhecimento de suas características hidráulicas.

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (1)$$

Onde:

- $\frac{p_i}{\gamma}$ é a carga de pressão (m);

- $\frac{V_i^2}{2g}$ é a carga cinética (m);

- Z_i é a carga de elevação (m);

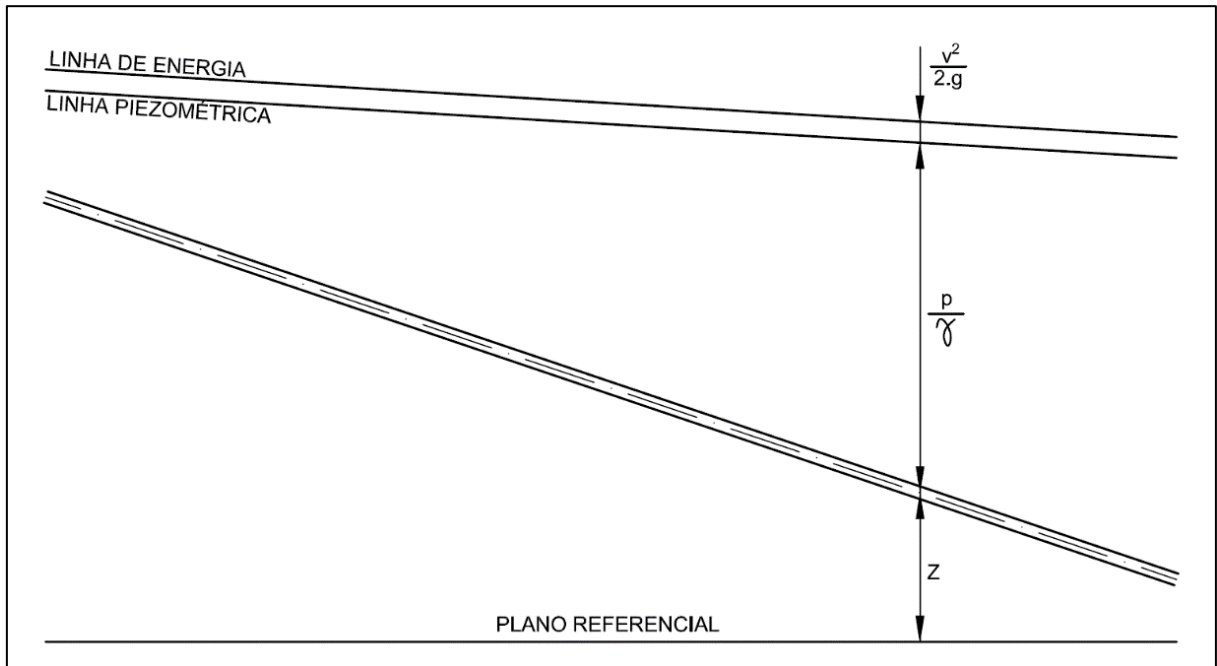
- ΔH_{ij} é a perda de carga total (m), dada pela soma das perdas de carga contínua (h_f) e acidental (h_a).

A linha de energia, ou linha de carga, é uma linha imaginária que representa a energia de escoamento do fluido, com relação a um dado referencial. É obtida através da soma das três parcelas de carga da Equação 1. O resultado dessa soma é denominado cota energética.

A linha piezométrica é a linha representativa das cotas piezométricas, que são dadas pela soma das cargas de pressão e elevação. Pode ser traçada utilizando-se piezômetros, os quais são manômetros de colunas líquidas, sendo a carga de pressão dada pelo valor da coluna líquida acima da tubulação.

Tem-se que as duas linhas são defasadas no valor da carga cinética. Na Figura 1 estão representadas as linhas de energia e piezométrica para um trecho de tubulação.

Figura 1 - Três parcelas de energia



Para a Equação 1, podem ser feitas as seguintes considerações:

- Para um trecho de tubulação de diâmetro constante, no qual o escoamento é permanente e uniforme, a carga cinética é constante;
- A diferença entre as duas cotas geométricas pode ser obtida sabendo-se o ângulo entre o trecho de tubulação e o plano de carga efetivo. Medindo-se a distância (L_{12}) inclinada entre os dois pontos, basta multiplicá-la pelo seno do ângulo;
- Medindo-se a altura de coluna d'água (h) no piezômetro, obtém-se a carga de pressão na seção onde o piezômetro está instalado.

De posse das três considerações e aplicando-as na Equação 1 tem-se a Equação 2.

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma}\right) + (Z_1 - Z_2) = \Delta H_{12}$$

$$(h_1 - h_2) + L_{12} \sin \alpha = \Delta H_{12} \quad (2)$$

Onde: α é o ângulo entre o trecho de tubulação e o plano de carga efetivo.

3.1.1 Fórmula universal da perda de carga contínua

Para o cálculo da perda de carga contínua, quando se conhece o parâmetro f denominado “fator de atrito”, a perda de carga pode ser calculada pela fórmula universal de perda de carga ou equação de Darcy-Weisbach (Equação 3).

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Onde:

- h_f é a perda de carga contínua (m);
- f é o fator de atrito (adimensional);
- L é o comprimento do trecho onde é analisada a perda de carga (m);
- D é o diâmetro (m);
- v é a velocidade (m/s);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

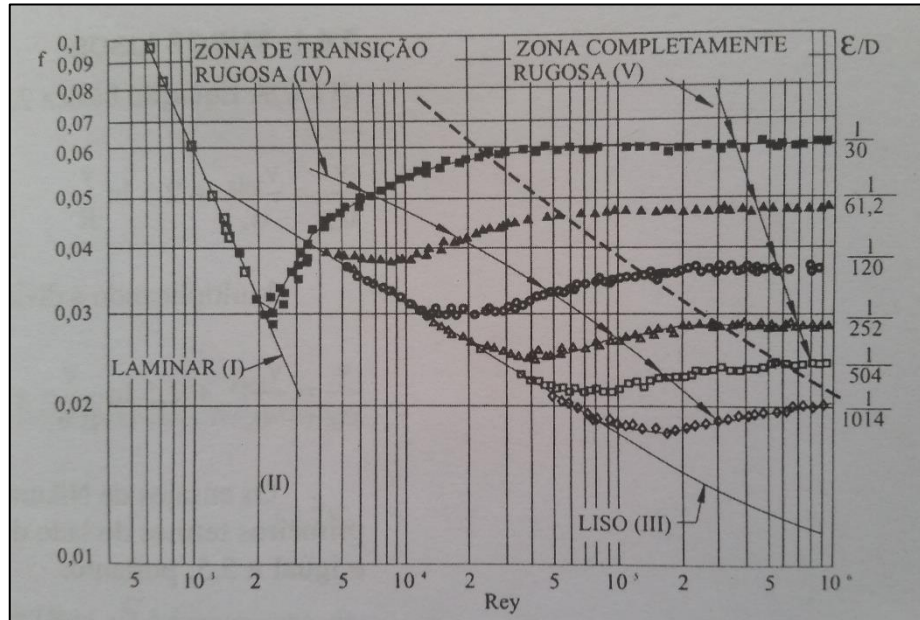
O fator de atrito pode depender da rugosidade do material, sendo sua determinação um pouco trabalhosa. Existem algumas maneiras para a determinação desse fator de atrito, as quais serão discutidas a seguir.

3.1.1.1 Experiência de Nikuradse

Em 1933, J. Nikuradse publicou os resultados de um trabalho experimental para a determinação do fator de atrito em tubulações circulares. Os ensaios foram realizados com tubos lisos cuja parede interna foi revestida com grãos de areia, sensivelmente esféricos, de granulometria controlada, criando assim uma rugosidade uniforme e artificial de valor ε , correspondente ao diâmetro do grão de areia. Desta forma, pode-se levantar, para os escoamentos turbulentos, as relações entre o fator de atrito f , o número de Reynolds Re , e a rugosidade relativa artificial ε/D (PORTO, 2006. pág 36).

A Figura 2 representa um resumo do resultado dos testes feitos por Nikuradse, que permitem uma análise de cinco regiões, que são delimitadas com base no número de Reynolds, que pode ser determinado através da Equação 4.

Figura 2 – Harpa de Nikuradse



$$Rey = \frac{\rho D V}{\mu} \quad (4)$$

Onde:

- ρ é a massa específica;
- μ é a viscosidade dinâmica.

As regiões apresentadas na Figura 2 são:

Região I - $Rey < 2300$, o escoamento é laminar, o fator de atrito é independente da rugosidade do tubo e $f = \frac{64}{Rey}$.

Região II - $2300 < Rey < 4000$, região crítica na qual f não é caracterizado.

Região III - O fator de atrito depende apenas do número de Reynolds.

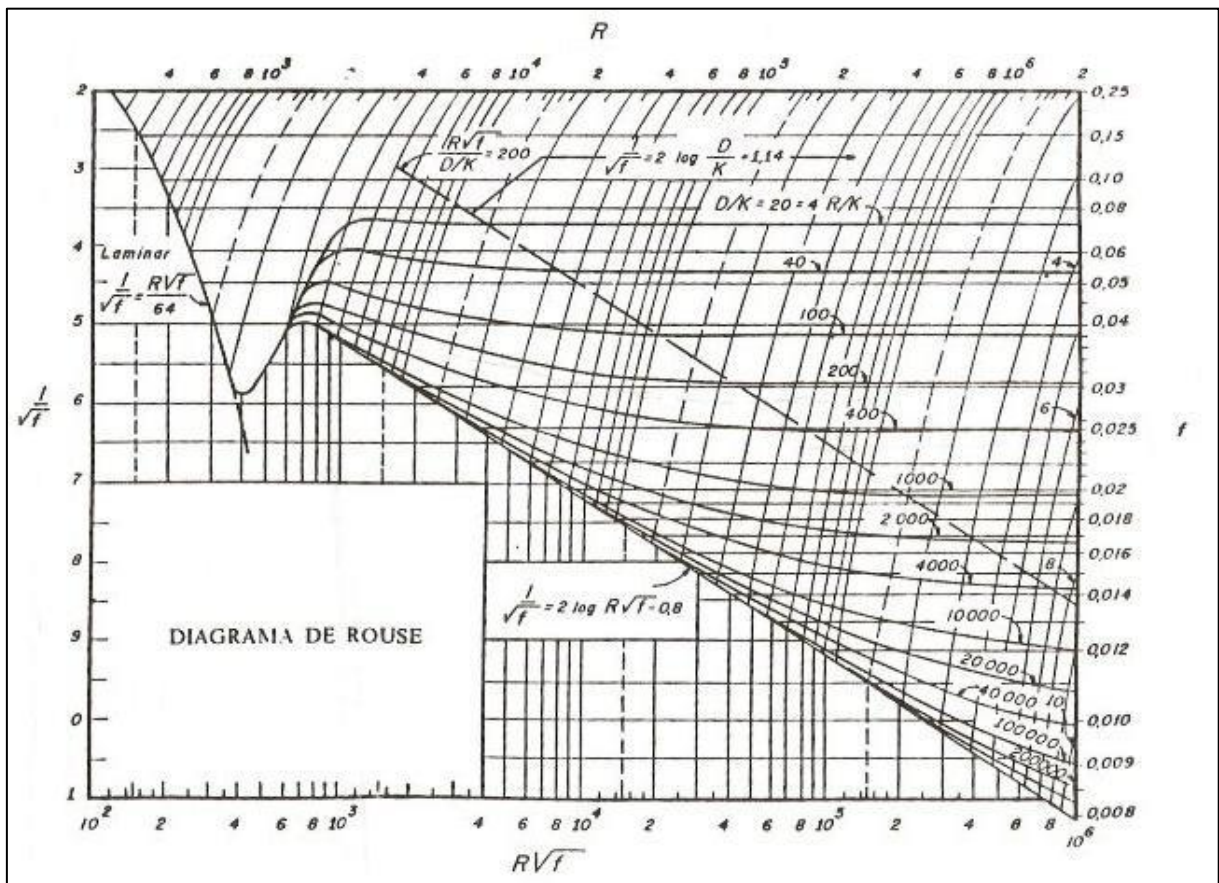
Região IV - Fator de atrito depende ambos, da rugosidade relativa e do número de Reynolds.

Região V - Fator de atrito depende apenas da rugosidade relativa.

3.1.1.2 Diagrama de Rouse

Os resultados obtidos com os experimentos e testes de Nikuradse eram bastante satisfatórios, porém não se ajustava bem aos dados experimentais de ensaios em tubos de rugosidade natural. Foi então que Colebrook e White apresentaram uma formulação para o fator de atrito trabalhado com tubos comerciais de vários materiais. Posteriormente Hunter Rouse estendeu e comprovou esse trabalho e representou a formulação proposta por Colebrook e White na forma de um gráfico, apresentado na Figura 3.

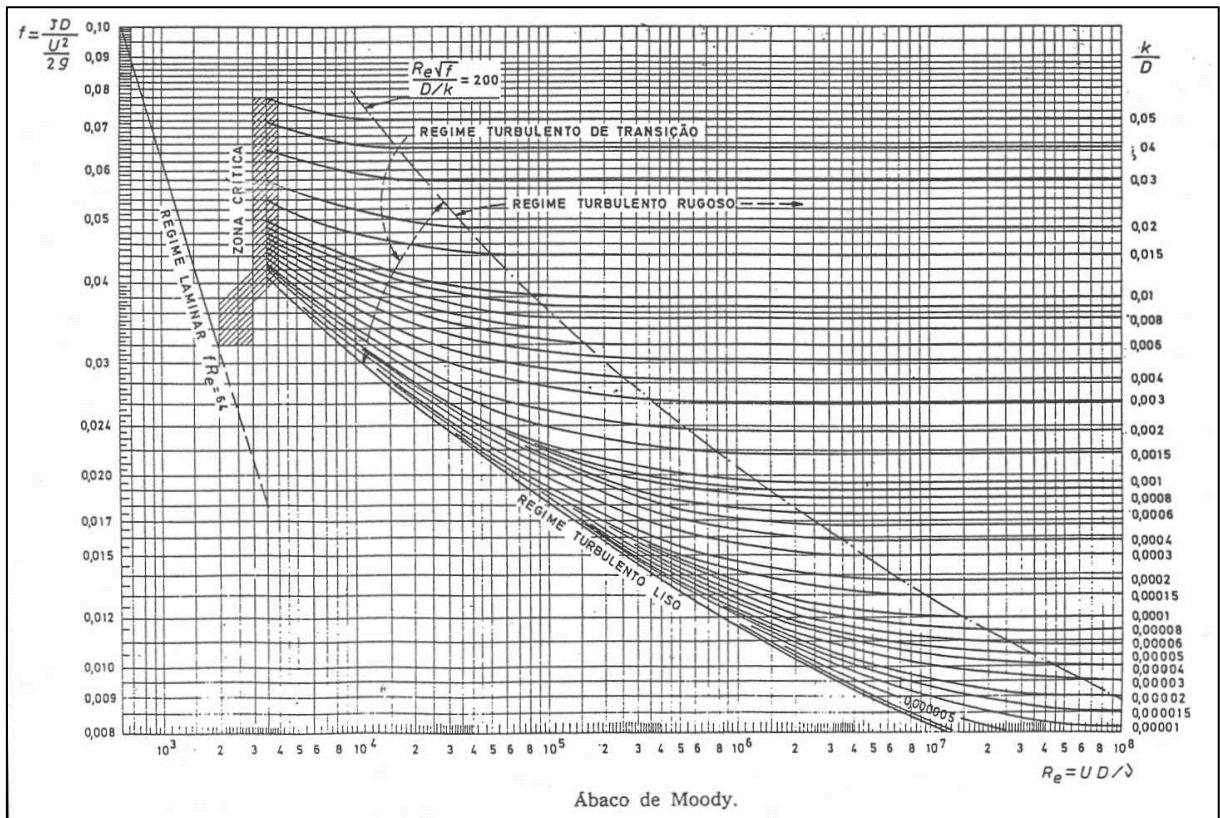
Figura 3 – Diagrama de Rouse



3.1.1.3 Diagrama de Moody

Segundo dados históricos, dois anos depois da confecção do Diagrama de Rouse, Lewis Moody recriou o diagrama de Rouse que é a forma mais aceita atualmente, e esse deve ser um dos diagramas mais usados na engenharia, o qual é apresentado na Figura 4.

Fígura 4 – Diagrama de Moody



Em que se possui a rugosidade relativa, e do número de Reynolds, encontra-se o coeficiente de atrito que deve ser aplicado na Equação 3.

3.1.2 Fórmula de Hazen-Williams

Para o cálculo de perda de carga contínua uma das fórmulas mais utilizadas na engenharia hidráulica é a de Hazen-Williams (Equação 5), que deve ser aplicada para tubos cujo diâmetro é maior ou igual a 50 mm e de preferência escoamento turbulento de transição e redes de distribuição de água.

$$h_f = 10,646 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \frac{L}{D^{4,87}} \quad (5)$$

Onde:

- h_f é a perda de carga (m);
- Q é a vazão escoada no tubo (m^3/s);
- L é o comprimento do trecho onde é analisada a perda de carga (m);

- D é o diâmetro (m);
- C é coeficiente de Hazen-Williams da tubulação ($m^{0,37}/s$).

3.1.3 Fórmula de Flamant

Para o cálculo da perda de carga contínua em tubulações de diâmetros pequenos, 12,5 a 100 mm, é usada a Equação de Flamant (Equação 6).

$$h_f = 6,1b \frac{L}{D^{4,75}} Q^{1,75} \quad (6)$$

Onde:

- b representa o coeficiente de Flamant da tubulação ($s^{1,75}/m^{0,5}$).

3.1.4 Expressão geral das perdas localizadas

A perda de carga acidental, ou localizada, ou singular, ocorre quando o fluido tem sua direção e/ou velocidade de escoamento alterada. Este tipo de perda está relacionado com as peças especiais instaladas ao longo da tubulação. A perda de carga localizada pode ser calculada pela expressão geral apresentada na Equação (7).

$$h_a = K \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Onde:

- K é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds, da rugosidade da parede e, em alguns casos, das condições de escoamento.

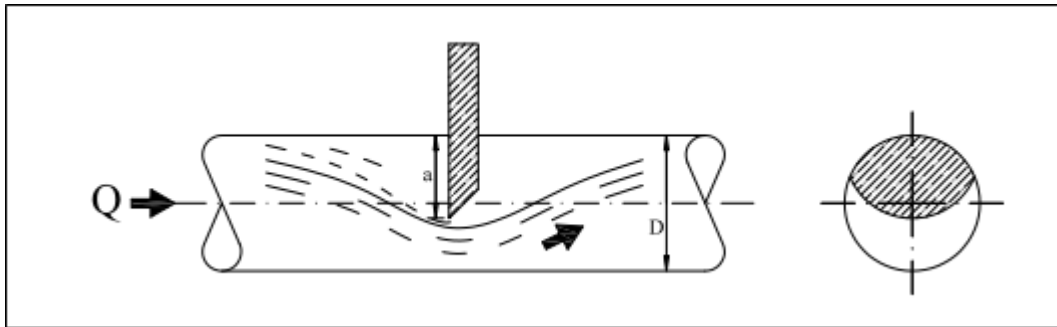
Em algumas peças especiais, tais como registros, a perda de carga localizada pode variar em função do seu grau de fechamento, como pode ser observado na Figura 5. Para o caso do registro de gaveta, essa proporção é dada na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores para K com o registro parcialmente aberto

a/D	0,00	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88
K	0,15	0,26	0,81	2,06	5,52	17,00	97,80

Fonte: PORTO, 2006. pág 76.

Figura 5 - Registro de gaveta parcialmente aberto



3.1.5 O método dos comprimentos equivalentes

O método dos comprimentos equivalentes consiste em encontrar um determinado comprimento virtual para cada acessório, de modo que esse comprimento virtual tenha a mesma perda de carga que teria o acessório utilizado.

Esse comprimento virtual para cada acessório encontra-se na Tabela 2.

3.1.6 O método do número de diâmetros

O método do número de diâmetros consiste em encontrar um determinado comprimento virtual que é dado pela Equação 8.

$$L_V = L + \sum_i^q N_i D_i \quad (8)$$

Onde:

- L_V é o comprimento virtual (m);
- L é o comprimento da tubulação (m);
- N_i é o número de diâmetros da peça especial (adimensional);
- D_i é o diâmetro da tubulação que encaixa na peça (m);
- q é a quantidade de peças (adimensional).

Esse número de diâmetros para cada acessório encontra-se na Tabela 3.

Tabela 2 – Comprimento virtual dos acessórios

Diâmetro (pol)	Joelho 90° Raio Longo	Joelho 90° Raio Médio	Joelho 90° Raio Curto	Joelho 45°	Curva 90°	Curva 45°	Saída Normal	Saída com Bocal	Registro de Gaveta Aberto	Registro de Globo Aberto	Registro de Ângulo Aberto	Tê Passagem Direta	Tê Saída de Lado	Tê Saída Bilateral
1/2	0,2	0,4	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0
3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4
1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7
5/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3
3/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8
2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5
5/2	1,3	1,7	2,0	0,9	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	0,3	4,3	4,3
3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2

Tabela 3 – Número de diâmetros

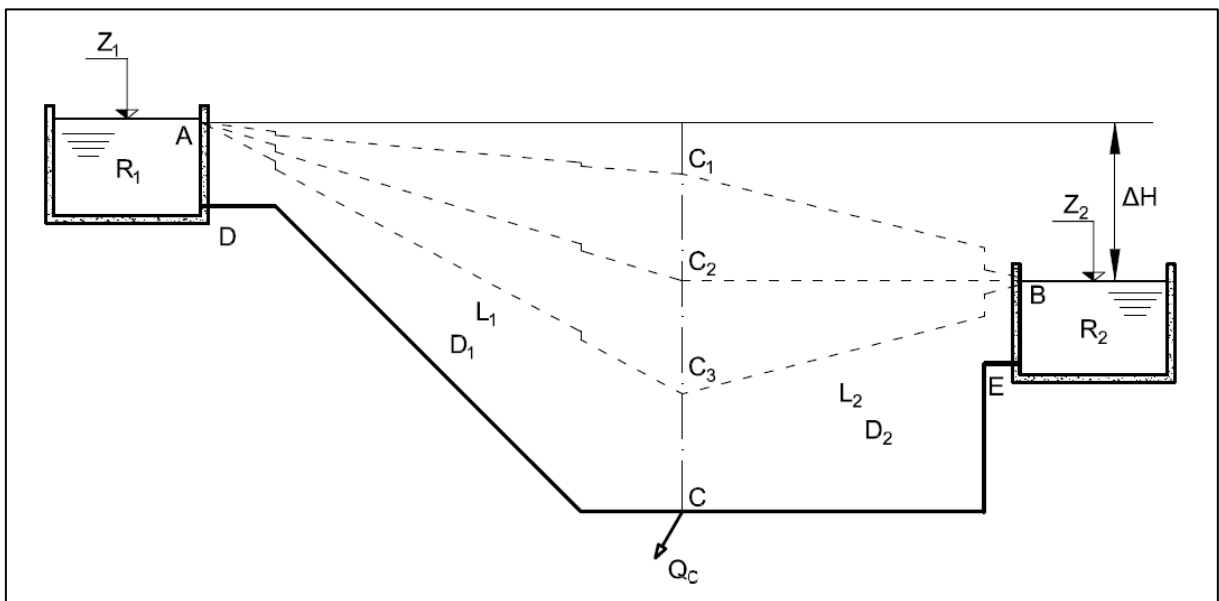
Acessório	Nº de diâmetros	Acessório	Nº de diâmetros
Joelho 90° raio longo	22	Saída com bocal	30,2
Joelho 90° raio médio	28,5	Registro de gaveta aberto	7,0
Joelho 90° raio curto	34	Registro de globo aberto	342,0
Joelho 45°	15,4	Registro de ângulo aberto	171,5
Curva 90°	17,5	Tê passagem direta	21,8
Curva 45°	7,8	Tê saída lateral	69,0
Saída normal	14,7	Tê saída bilateral	69,0

Fonte: PORTO, 2006. pág 86.

3.2 Tomada intermediária entre dois reservatórios

Uma rede de distribuição de água pode ser abastecida por dois reservatórios em cotas distintas, como apresentado na Figura 6, onde a rede se inicia no ponto C. O reservatório de cota superior (R_1) sempre abastecerá o sistema. Já o reservatório inferior (R_2) pode abastecer o sistema, sendo denominado reservatório de compensação, e também ser abastecimento, neste caso sendo denominado reservatório de sobra.

Figura 6 - Disposição das linhas piezométricas



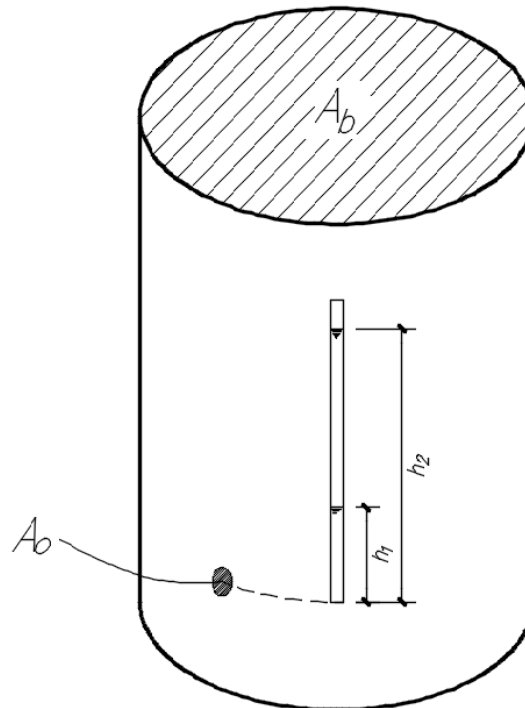
A cota energética no ponto C determina a função de R_2 . No caso da demanda no ponto C ser grande, baixa cota energética como apresentada pela linha energética C_3 , o reservatório será abastecedor, caso contrário ele será abastecido, sendo essa situação representada pela linha energética C_1 .

Para o caso da linha energética C_2 , R_2 não será abastecido nem abastecedor.

3.3 Tempo de esvaziamento

Tempo de esvaziamento de um reservatório é o tempo total gasto para que a água escoe do ponto de cota inicial (h_2) até um ponto de cota final (h_1), exemplificados na Figura 7. Nesse processo haverá mudança na vazão, na pressão, na velocidade, pois se trata de um escoamento transitório, devido ao fato de que essas condições variam com o tempo.

Figura 7 - Barrilete em perspectiva isométrica



Chamando de ponto 0 a superfície d'água e ponto 1 a saída a jusante do orifício de área A_o e aplica-se a Equação 1, levando em conta as seguintes hipóteses:

- A pressão em 0, bem como a pressão em 1, será a pressão atmosférica;
- A carga cinética em 0 será desprezível, pois a vazão escoada será pequena, e área da lâmina d'água relativamente grande;
- A cota geométrica em 0 será a diferença de nível (h) entre 0 e 1, variando com o tempo e adotando-se o referencial no ponto 1;
- A perda de carga entre ambos os pontos não será levada inicialmente em consideração, pois se admitirá escoamento ideal entre 0 e 1. Assim, tem-se uma velocidade teórica (v_{th}) em 1.

Com isso, obtém-se a Equação 9.

$$v_{th} = \sqrt{2gh} \quad (9)$$

Sabe-se pela equação da continuidade que vazão(Q) é:

$$Q_{th} = A_o v_{th} = A_o \sqrt{2gh}$$

Tem-se também que:

$$Q_{th} = -\frac{dvol}{dt} = -A_b \frac{dh}{dt} = A_o \sqrt{2gh} \quad (10)$$

Onde A_b é a área da base do barrilete, mostrado na Figura 7.

O sinal negativo indica que o volume diminui com o aumento do tempo.

Isolando dt na equação e integrando-o de 0 ate o tempo total (T_t), obtém-se a Equação 10.

$$T_{th} = \frac{-A_b}{A_o \sqrt{2g}} \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{\sqrt{h}} dh = \frac{2A_b}{A_o \sqrt{2g}} (\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1})$$

Como se tratava de uma vazão teórica obtém-se um tempo teórico. Para corrigi-lo deve-se dividi-lo por um coeficiente de descarga (C_d), resultando na Equação 11.

$$T_t = \frac{2A_b}{C_d A_o \sqrt{2g}} (\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}) \quad (11)$$

4 Metodologia

Para elaboração e execução do projeto do aparato, levou-se em conta alguns fatores, dentre eles:

- Reaproveitamento da água usada nos experimentos;
- Evitar a cavitação na instalação de recalque instalada para abastecer o sistema do aparato;
- Aproveitamento do sistema para a maior quantidade de experimentos possíveis.

O aparato foi construído com barriletes de PVC de aproximadamente 20 litros, tubulação de $\frac{1}{2}$ " em acrílico, peças especiais em latão e PVC, bomba centrífuga de $\frac{1}{2}$ cv, tubulação da instalação de recalque de 1" no trecho de sucção e $\frac{3}{4}$ " no trecho de recalque, ambas em PVC, como está ilustrado na Figura 8. O trecho de recalque possui uma bifurcação, donde são gerados três seguimentos, um segue para R1, outro para R2, ambos com rotômetros instalados, e por ultimo um seguimento para o reservatório de abastecimento geral. Foram divididos em sistemas integrados que poderão funcionar isoladamente, fechando os registros, como é mostrado na Figura 9 ou em conjunto, abrindo os registros, como mostrado na Figura 10.

Figura 8 – Aparato experimental executado no Laboratório de Engenharia Civil



Figura 9 – Representação esquemática do aparato - Sistema isolado (medidas em milímetros)

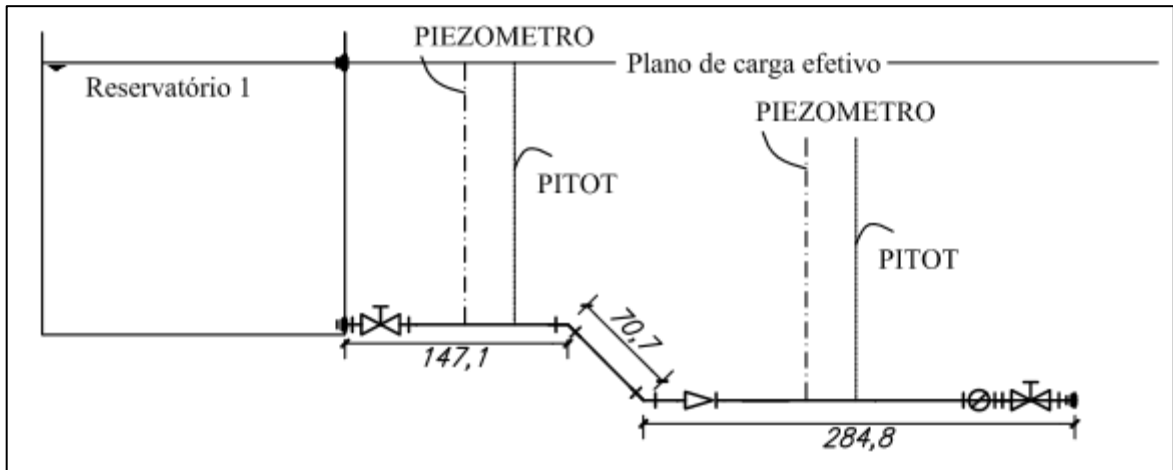
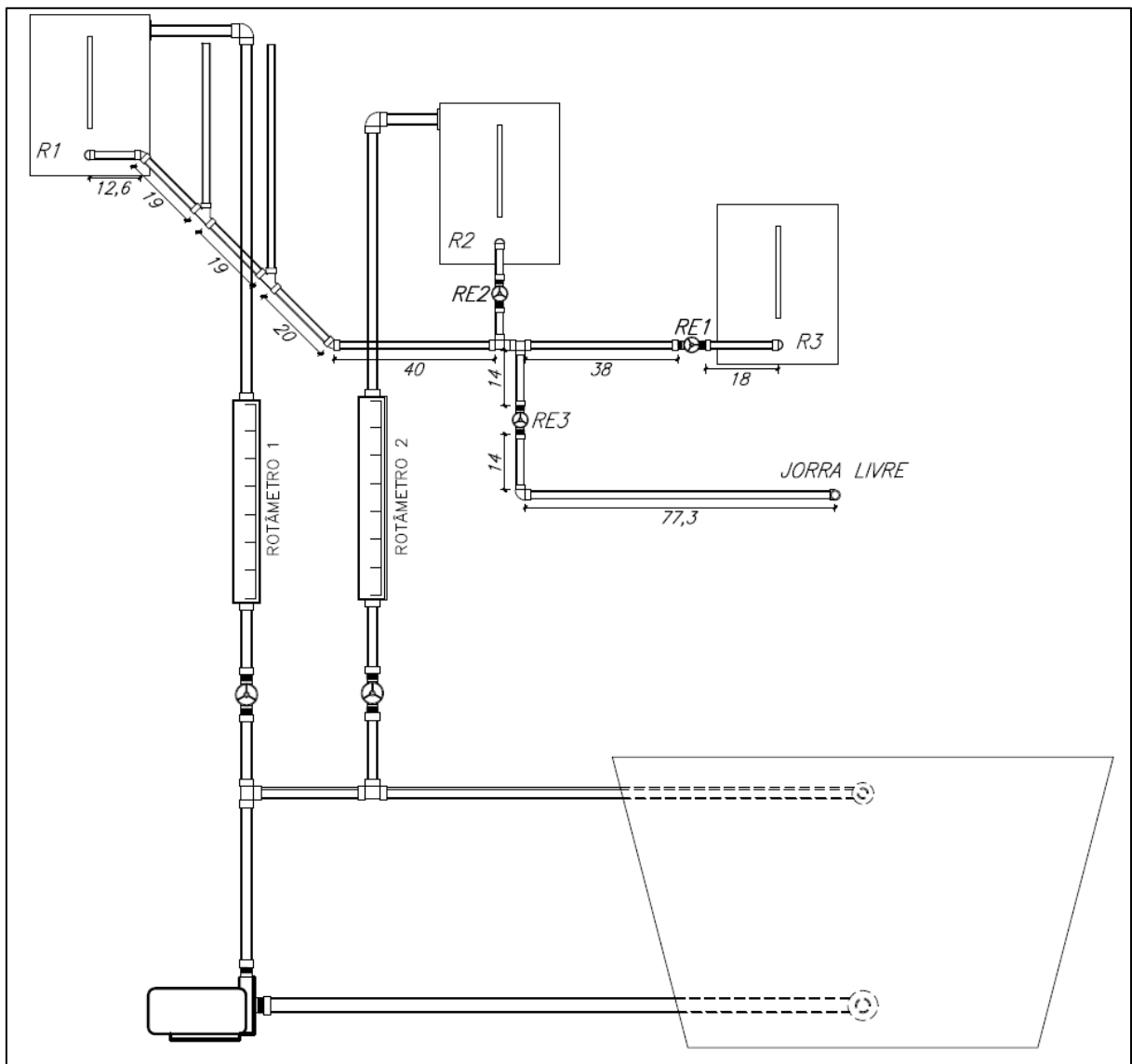


Figura 10 – Representação esquemática do aparato - Sistema em conjunto (medidas em centímetros)



A seguir serão descritos os experimentos que foram testados neste trabalho e já poderão ser realizados em aula prática.

4.1 Determinação do coeficiente de Flamant

Como o diâmetro da tubulação utilizada no aparato é de 15,60 milímetros não se deve calcular a perda de carga contínua pela equação de Hazen-Williams, a qual é uma das principais equações utilizadas na prática de projetos. Para o diâmetro utilizado, o recomendado é a utilização da equação de Flamant. Entretanto, é difícil encontrar na literatura o coeficiente (b) de Flamant para tubulação em acrílico. Logo, um experimento possível de ser feito é a determinação desse coeficiente.

Aplicando-se a equação de energia (Equação 1) entre os pontos “1” e “2”, apresentados na Figura 11, com referencial em “1”, tem-se:

$$h_1 + L_{12} \sin 45^\circ = h_2 + \Delta H_{12}$$

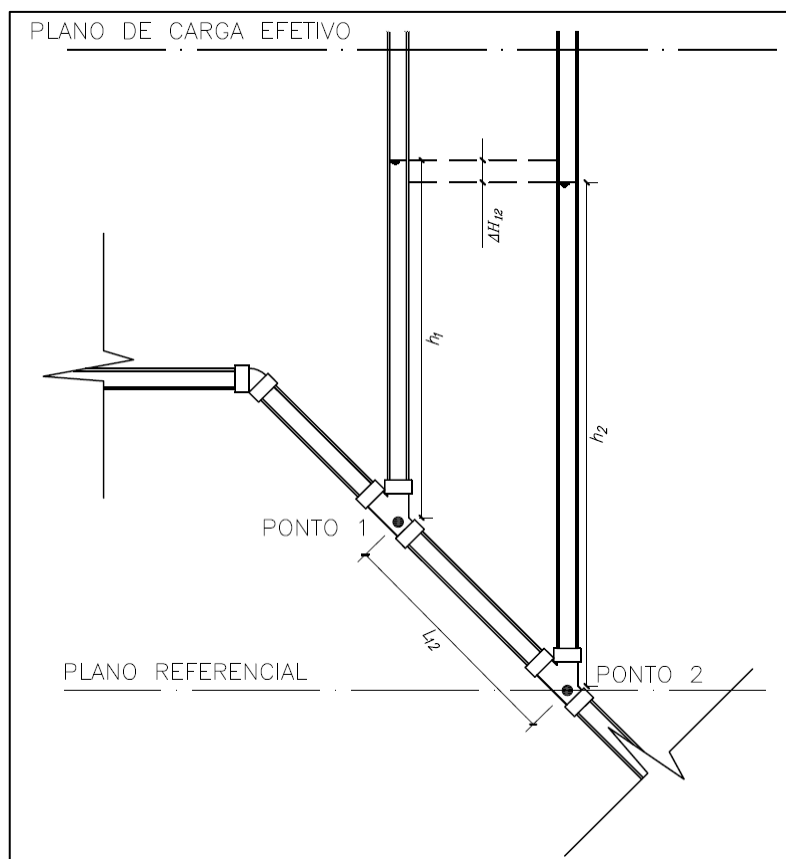
Isolando a perda de carga e substituindo a equação de Flamant (Equação 6) tem-se:

$$hf = \Delta H_{12} = 6,1b \frac{l}{D^{4,75}} Q^{1,75} = (h_1 - h_2) + L_{12} \sin 45$$

Isolando b na equação acima e fazendo $l = L_{12}$, tem-se a Equação 12 para o cálculo do coeficiente (b) de Flamant.

$$b = \frac{(h_1 - h_2) + L_{12} \sin 45}{6,1 \frac{L_{12}}{D^{4,75}} Q^{1,75}} \quad (12)$$

Figura 11 – Trecho com piezômetros



Realizou-se testes variando a vazão (Q) e medindo-se os valores de h_1 e h_2 . O valor de “b” é calculado aplicando-se esses valores na Equação 12, sabendo o valor de L_{12} .

Este experimento seguiu as seguintes etapas:

- O piezômetro pode se encontrar um pouco inclinado devido à erros de montagem, logo mediu-se os piezômetros com um nível para retirar incertezas de canalização inclinada.
- Verificou-se que em alguns momentos ocorreu variação da vazão da bomba, o que foi verificado no rotâmetro durante as medições. As possíveis causas da variação da vazão são:
 - Sobreaquecimento da instalação de recalque. Neste caso deve-se liberar uma parte da vazão da bomba para o reservatório de sucção;
 - Instabilidade da energia elétrica.

- Verificou-se o nível d'água no reservatório R_1 juntamente com a vazão do rotâmetro, pois se deve esperar que o nível de R_1 se estabilize antes de se medir as alturas h_1 e h_2 do nível d'água nos piezômetros.

4.2 Cálculo de vazão e/ou nível d'água no reservatório R_1 utilizando a equação de Flamant

Logo após a saída de R_1 há um trecho com inclinação de 45° . Neste trecho instalou-se dois piezômetros, como mostrado na Figura 11.

Antes de acionar a bomba, por se tratar de uma bomba centrífuga, verificou-se se todos os registros do sistema estavam fechados, visto que assim a potência imediata requerida será menor, o que diminui a tendência da bomba queimar.

Abriu-se o registro 3 (RE3), mostrado na Figura 10, de forma a se iniciar o escoamento no trecho inclinado. Inicialmente os níveis d'água nos piezômetros são iguais ao nível da água em R_1 , ou seja, os níveis estão no plano de carga efetivo.

Na medida em que a água começa a escoar na tubulação, tem-se uma queda do nível em ambos os piezômetros. O primeiro piezômetro tem uma perda de nível referente à perda de energia no percurso da água entre R_1 e o ponto onde ele está localizado. O rebaixamento de nível no segundo piezômetro representa a perda de carga ocorrida no trecho entre ele e o primeiro piezômetro. Mede-se, então a diferença de nível entre estes dois piezômetros.

Para determinação do comprimento virtual (L_v), o qual será usado na Equação de Flamant (Equação 6), mediu-se o comprimento retilíneo total da tubulação, obtendo-se 2,20m, e listou-se as peças especiais pelas quais a água escoará, as quais estão na Tabela 4. Na mesma tabela estão apresentados os comprimentos equivalentes (L_e) de cada peça.

Tabela 4 – Comprimento equivalente das peças especiais

Peças especiais	Quantidade	L_e (m)	$L_e \times$ Quantidade
Saída de canalização	1	0,4	0,4
Joelho 90°	4	0,5	2,0
Joelho 45°	2	0,3	0,6
Tê passagem direta	2	0,3	0,6
Registro de gaveta	1	0,1	0,1
Tê passagem 90°	1	1,0	1,0
Total (m)			4,7

Assim, o comprimento virtual, o qual é a soma do comprimento retilíneo e o comprimento equivalente, é 6,90 m

Tem-se que a diferença de nível entre o piezômetro instalado na parede do reservatório R_1 e a saída final de canalização é de 0,875 metros, como está ilustrado na Figura 12. Para início do experimento, mede-se a altura (h_p) marcada no piezômetro instalado em R_1 e acrescenta-se a ela os 0,875 m, obtendo a diferença de cota geométrica entre o nível d'água de R_1 e a saída de descarga livre. Como não há variação do diâmetro da canalização no trecho, a carga cinética é constante, e como a descarga livre e R_1 possuem pressão atmosférica em seu nível d'água, ambos possuem carga de pressão nula.

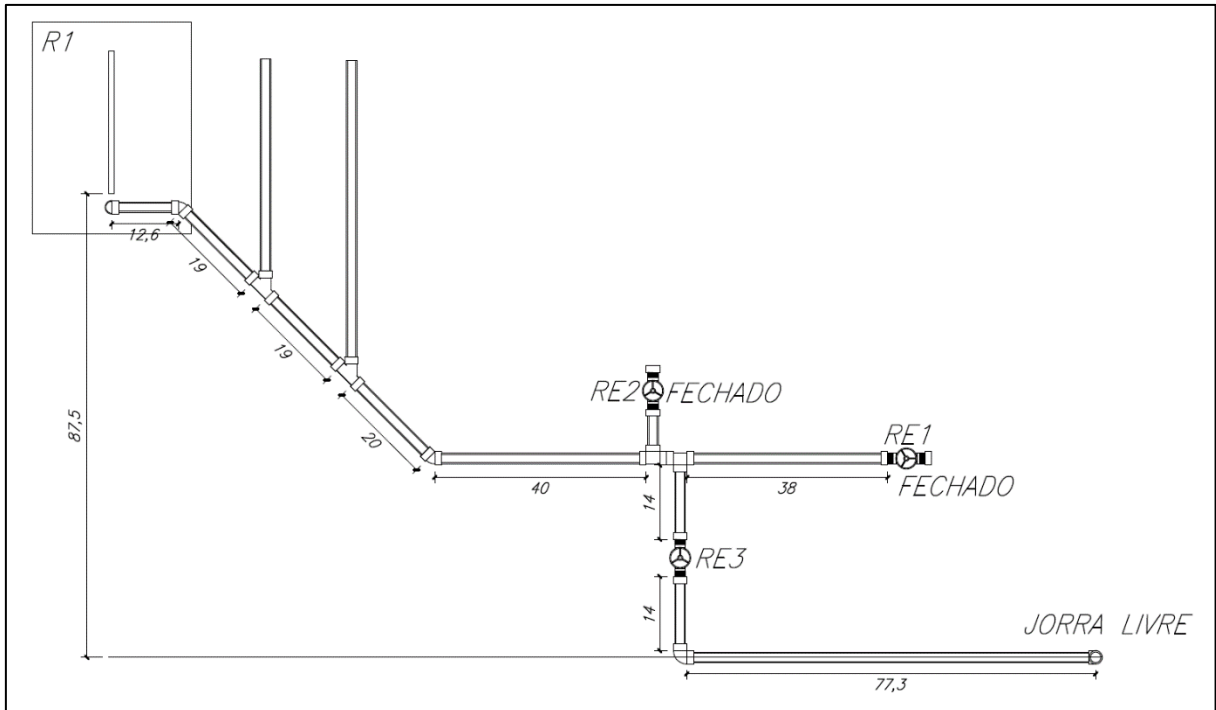
Desta forma, tem-se que a perda de energia, igualando Equação 1 à Equação 6 é dado pela Equação 13.

$$0,875 + h_p = 6,1b \frac{l_v}{D^{4,75}} Q^{1,75} \quad (13)$$

Onde:

- l_v é o comprimento virtual, o qual é igual a 6,90 m, como descrito anteriormente.

Figura 12 – Sistema do experimento sobre perda de carga (medidas em centímetros)



Pode-se agora prever a vazão escoada a partir da altura (h_p) da lâmina d'água no piezômetro instalado em R₁, ou prever a altura (h_p) a partir da vazão lida no rotômetro, de acordo com o objetivo do experimento e manipulação da Equação 13.

4.3 Tomada intermediária entre dois reservatórios

Denomina-se de ponto “a”, “b” e “c”, respectivamente, o nível d'água dos reservatórios R₁ e R₂, e o ponto onde um “tê” liga o fluxo de ambos os reservatórios, como mostrado na Figura 13.

Para o caso de R₂ não ser abastecido por R₁ e nem abastecer o ponto c, tem-se que a perda de carga entre “a” e “c” é igual à diferença de nível entre “a” e “b”. Como a pressão em “a” é a atmosférica e ainda desconsiderando as cargas cinéticas devido a seu baixo valor, aplicando-se a equação de energia (Equação 1) entre “a” e “b”, tem-se a Equação 14.

$$\Delta H_{ac} = Z_a - Z_c \quad (14)$$

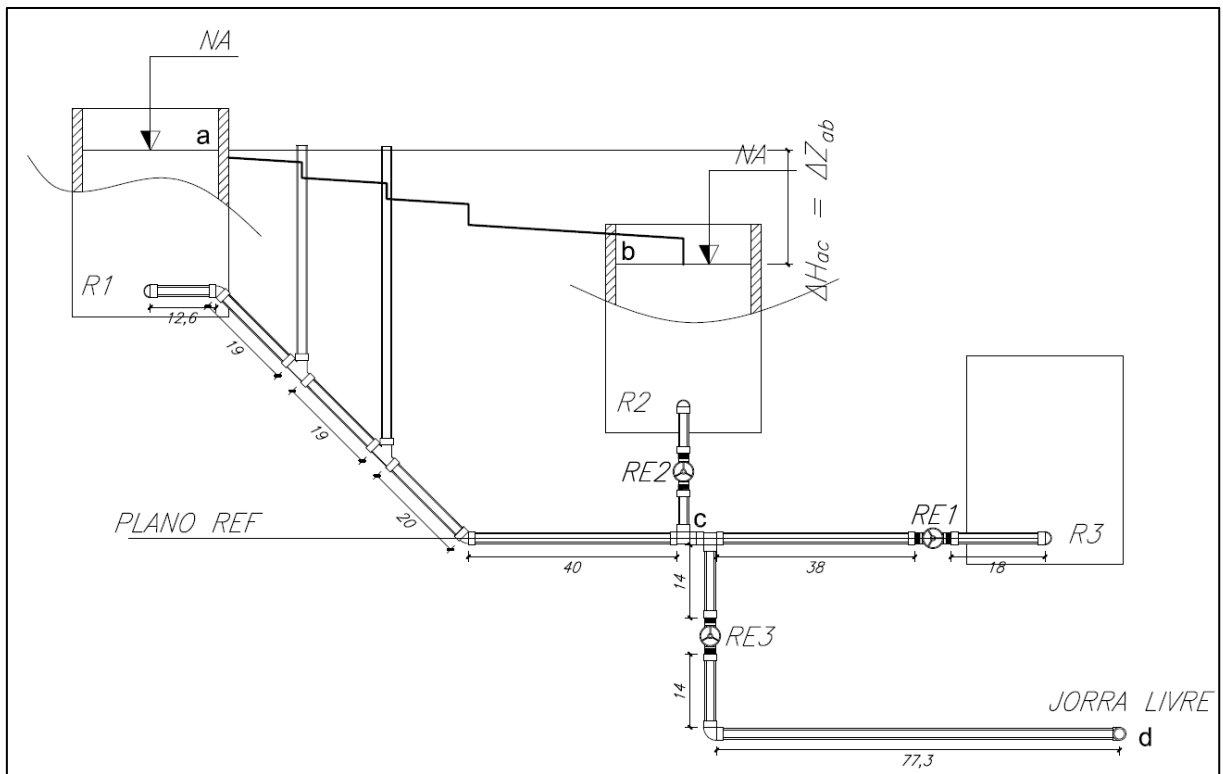
Aplicando-se também a equação de energia entre os pontos “b” e “c”, lembrando que não há escoamento no trecho entre esses pontos, como escrito no parágrafo anterior, tem-se a Equação 15.

$$\frac{p_c}{\gamma} = -Z_c + Z_b \quad (15)$$

Igualando a Equação 14 com a Equação 5, obtém-se a Equação 16.

$$\Delta H_{ac} = Z_a - Z_b = 6,1b \frac{l_{ac}}{D^{4,75}} Q_{ac}^{1,75} \quad (16)$$

Figura 13 – Perda de Carga entre “a” e “c” (medidas em centímetros)



Isolando a vazão na Equação 16, tem-se a Equação 17, com a qual se pode calcular a vazão que se deve ter para R2 não forneça nem receba água.

$$\left[\frac{(Z_a - Z_b) D^{4,75}}{6,1b l_{ac}} \right]^{\frac{1}{1,75}} = Q_{ac} \quad (17)$$

Onde:

- Q_{ac} Representa a vazão que sai de R1 (m^3s^{-1});
- l_{ac} é o comprimento virtual entre os pontos a e c (m).

Mantidos os níveis d'água (Z_a e Z_b) dos reservatórios R_1 e R_2 constantes, qualquer valor de vazão maior que a calculada pela Equação 17, o reservatório R_2 deverá abastecer o sistema, sendo para valores menores de vazão o R_2 será abastecido. Ressalta-se que quando R_2 tiver que abastecer, abre-se o registro da tubulação que o liga à bomba, como pode ser visto na Figura 8, de forma que o nível d'água Z_b permaneça constante. Quando R_2 for abastecido, há um ladrão instalado no reservatório.

Para a situação que R_2 está abastecendo o sistema, tem-se que a vazão (Q_d) que jorra livremente (ponto "d" mostrado na Figura 13) é a soma das vazões que saem de R_1 (Q_{ac}) e de R_2 (Q_{bc}). A vazão Q_d pode ser encontrada de duas formas diferentes. Pode ser calculada a partir de equações advindas da equação de energia, as quais serão mostradas a seguir, e pode ser encontrada somando as vazões observadas nos dois rotômetros, os quais fornecem Q_{ac} e Q_{bc} .

Desprezando-se as cargas cinéticas, ao se aplicar três vezes a equação de energia – primeiro entre os pontos "a" e "b", depois entre "b" e "c" e, por último, entre "c" e "d" – obtém-se as Equações 18, 19 e 20.

$$Z_a - Z_c - \frac{p_c}{\gamma} = \Delta H_{ac} \quad (18)$$

$$Z_b - Z_c - \frac{p_c}{\gamma} = \Delta H_{bc} \quad (19)$$

$$\frac{p_c}{\gamma} = Z_d + \Delta H_{cd} - Z_c \quad (20)$$

Substituindo a equação de Flamant (Equação 6) na Equação 20, obtém-se a carga de pressão em "c".

Agora, aplicando-se a equação de Flamant (Equação 6) nas Equações 18 e 19, tendo-se calculado anteriormente a carga de pressão em "c", chega-se nas Equações 21 e 22 para o calculado das vazões que saem de R_1 e R_2 , respectivamente.

$$\left[\frac{\left(-\frac{p_c}{\gamma} + Z_a - Z_c \right) D^{4,75}}{6,1bl_{ac}} \right]^{\frac{1}{1,75}} = Q_{ac} \quad (21)$$

$$\left[\frac{\left(-\frac{p_c}{\gamma} + Z_b - Z_c \right) D^{4,75}}{6,1bl_{bc}} \right]^{\frac{1}{1,75}} = Q_{bc} \quad (22)$$

Ao se somar os resultados das vazões obtidas com as Equações 21 e 21 deve-se encontrar o mesmo valor de vazão obtido somando-se as vazões observadas nos rotômetros instalados nas tubulações que abastecem R₁ e R₂.

4.4 Tempo de esvaziamento

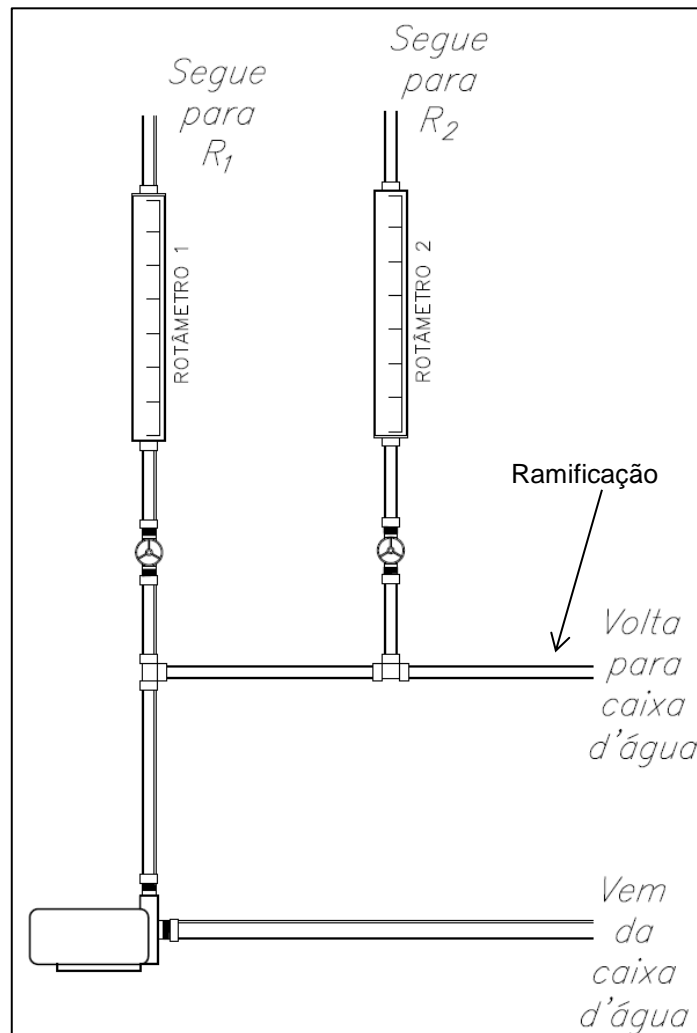
Torna-se necessário para tal experimento o conhecimento das cotas dos níveis h₁ e h₂, que estão ilustrados na Figura 7. Inicialmente, estipulou-se um tempo (T_t) de esvaziamento. Depois, mediu-se a altura (h₂) inicial da água e, após o tempo estipulado, mediu-se a altura (h₁) final. Isolando o coeficiente de descarga (C_d) na Equação 11, tem-se a Equação 23 com a qual o coeficiente pode ser calculado.

$$C_d = \frac{2A_b(\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1})}{T_t A_0 \sqrt{2g}} \quad (23)$$

5 Resultados e discussões

Durante a fase de execução e de testes do aparato foi necessárias a realização de algumas mudanças no projeto. Criou-se uma ramificação na tubulação da bomba, que é mostrada na Figura 14, para evitar seu superaquecimento, pois a altura manométrica observada é pequena para sua faixa de trabalho. Observou-se que o superaquecimento gerava grande flutuação na vazão enviada aos reservatórios. Essa variação é percebida observando, ao longo do tempo, a medição nos rotâmetros, sendo a abertura do registro mantida a mesma.

Figura 14 - Ramificação na tubulação da bomba



São apresentados a seguir valores para os experimentos descritos. Esses valores são apresentados com o objetivo de mostrar que os resultados obtidos no aparato são coerentes com a literatura.

5.1 Determinação do coeficiente de Flamant

Observou-se grande variação do coeficiente de Flamant a partir dos experimentos analisados. Esta variação advém da baixa precisão na medição das alturas piezométricas e da variação da vazão devido ao superaquecimento da bomba.

Observa-se na Tabela 5 os valores medidos e utilizados para determinação do coeficiente de Flamant (a medição de 2,3 L/s foi excluída, atribui-se à esta exclusão o fato das medições para uma pequena vazão tornarem-se imprecisos).

Tabela 5 – Coeficiente de Flamant

Q (L/min)	ΔH (m)	b ($s^{1,75}/m^{0,5}$)
2,3	0,0030	0,000328
6,1	0,0120	0,000238
8,1	0,0235	0,000284
9,5	0,0285	0,000260
9,6	0,0250	0,000234
10,0	0,0285	0,000238
b médio =		0,000251

A média obtida é uma média satisfatória, pois esse dado encontra-se próximo de coeficientes já conhecidos, por exemplo, o do tubo PVC é $0,000135 s^{1,75}/m^{0,5}$, e o do aço é $0,00023 s^{1,75}/m^{0,5}$.

5.2 Cálculo de vazão e/ou nível d'água no reservatório R₁ utilizando a equação de Flamant

Como já descrito, tal experimento gera uma vazão em função altura (h_p) da lâmina d'água no piezômetro instalado em R₁, sendo esta função representada pela Equação 13.

De posse desta equação, verificou-se em prática grande discrepância entre os valores de uma altura (h_p) calculada e a real medida, para uma mesma vazão, como apresentado na Tabela 6. Para calcular " $h_{p\text{calculado}}$ ", observou-se a vazão dada no rotâmetro (Q_{medida}) e substituiu esse valor na Equação 13.

Tabela 6 – Medições práticas de perda de carga

$h_{p\text{medido}}$ (cm)	Q_{medida} (Lmin ⁻¹)	$h_{p\text{calculado}}$ (cm)
17,00	9,21	11,29

Observa-se que o resultado obtido possui grande diferença do esperado. Como a medição dos valores de “ h_p ” e “ Q ” é de fácil controle, um dos motivos que pode ter causado tal diferença deve-se ao coeficiente (b) de Flamant, o qual foi adotado como constante, mas varia de trecho a trecho. O coeficiente (b) de Flamant usado para estimar o “ $h_{p\text{calculado}}$ ” foi o calculado no experimento descrito no item 5.1, sendo o valor de 0,000251 .

Nota-se que na formulação do comprimento virtual, apresentada na Tabela 4, a perda de carga acidental em uma peça especial de PVC é convertida para um comprimento virtual, e este comprimento é somado ao comprimento real. Deve-se ter em conta que o coeficiente (b) de Flamant irá variar para determinados trechos da tubulação, já que estes trechos irão ser compostos de comprimentos reais de acrílico e fictícios de PVC.

Percebendo-se a necessidade de cálculo de um novo coeficiente (b) de Flamant, o qual englobasse mais peças especiais de PVC e comprimentos retilíneos de acrílico, manipulou-se então a Equação 13 para isolar o coeficiente em função da altura “ h_p ” e da vazão. Realizando-se novos testes, chegou-se aos valores apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Cálculo do novo coeficiente (b) de Flamant

h_p (cm)	Q (Lmin ⁻¹)	b (s ^{1,75} m ^{-0,5})
23,20	9,61	0,0003015
11,40	8,62	0,0003258
13,80	9,03	0,0003075
20,00	8,60	0,0003556
	Média:	0,0003226

Como houve baixa variação entre os dados adquiridos experimentalmente, os resultados foram satisfatórios. Assim, o valor de “b” usado para um novo cálculo de “ $h_{p\text{calculado}}$ ” será 0,0003226.

Realizou-se novamente o experimento para comparação da altura “ $h_{p\text{medido}}$ ” e “ $h_{p\text{calculado}}$ ”, para uma mesma vazão, como apresentado na Tabela 8. Novamente, para calcular “ $h_{p\text{calculado}}$ ”, observou-se a vazão dada no rotâmetro (Q_{medida}) e substituiu esse valor na Equação 13, sendo agora utilizado o novo valor de “b”.

Tabela 8 – Medições práticas de perda de carga

$h_{p\text{medido}}$ (cm)	Q_{medida} (Lmin ⁻¹)	$h_{p\text{calculado}}$ (cm)
17,00	9,21	18,70

Estes resultados mostram-se mais satisfatórios dos que os anteriores referentes à Tabela 6.

5.3 Tomada intermediária entre dois reservatórios

O experimento consiste em determinar a vazão que torna o reservatório R_2 neutro, tanto teoricamente como experimentalmente.

Para realização do experimento, controlou-se uma vazão no rotâmetro instalado na tubulação que abastece R_1 , e verificada pelo método direto. Mediu-se os níveis d’água (h_a e h_b) nos reservatórios R_1 e R_2 . Como se precisa das cargas de elevação nos referidos níveis d’água, então se somou 0,19 m ao valor de “ h_a ”, sendo que este valor representa o desnível entre o fundo do reservatório R_1 e o plano de referência adotado.

De posse destes níveis, calculou-se a vazão dada pela equação 17. Comparou-se a vazão lida no rotâmetro com esse valor calculado. Atenta-se que na Equação 17 utilizou-se para o valor de l_{ac} a soma dos comprimentos equivalentes dados na Tabela 9. Ressalta-se também que o valor de “b” utilizado foi o novo valor encontrado no item anterior, o qual foi 0,0003226.

Os resultados de vazão calculada e medida estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 – Comprimento equivalente das peças especiais

Peças especiais	Quantidade	L_e (m)	$L_e \times$ Quantidade (m)
Saída de canalização	1	0,4	0,4
Joelho 90°	2	0,5	1,0
Joelho 45°	2	0,3	0,6
Tê passagem direta	3	0,3	0,9
Tê passagem lateral	1	0,3	1,0
Total (m)			3,9

Tabela 10 – Valores referentes às vazões medidas e calculadas

h_a (cm)	h_b (cm)	$Q_{\text{calculado}}$ (Lmin ⁻¹)	Q_{medido} (Lmin ⁻¹)
18,00	24,70	3,12	4,54

Neste experimento, nota-se o valor obtido razoavelmente diferente do valor calculado. Deve-se atribuir tal fato a flutuações da vazão durante a medição, sendo essas flutuações devidas ao superaquecimento da bomba.

5.4 Tempo de esvaziamento de reservatórios

Na Tabela 11 estão apresentados os valores medidos para determinação do coeficiente de descarga, usado no experimento de tempo de esvaziamento, que serão aplicados na Equação 23.

Tabela 11 - Cálculo do $C_{\text{dmédio}}$

A_0 (m ²)	A_b (m ²)	h_1 (m)	h_2 (m)	T_t (s)	C_d
0,070686	4,71E-5	0,240	0,114	195,25	0,5279
0,070686	4,71E-5	0,237	0,117	179,85	0,5449
$C_{\text{dmédio}} = 0,5364$					

O resultado do $C_{\text{dmédio}}$ encontrado foi bom, visto que, em média, o coeficiente de descarga de orifícios está em torno de 0,61.

5.5 Considerações sobre o aparato

O aparato cumpre bem às suas finalidades, pois respondeu a todas as expectativas. É possível a execução de todos os experimentos propostos, com certeza é um grande avanço para o curso de Engenharia Civil da UFSJ – CAP. Além disso, ele ainda pode ser expandido a fim de desenvolver experimentos posteriores.

6 Conclusão

O aparato permite ilustrar na prática a variação da linha de energia e da linha piezométrica de acordo com a variação da vazão derivada em um ponto situação entre dois reservatórios. Ilustra também a aplicação da equação de energia e da equação de Flamant para perda de carga, o que pode melhorar o aprendizado das disciplinas Mecânica dos Fluidos e Hidráulica. O aparato apresenta-se com um meio conciso para determinação do coeficiente (b) da equação de Flamant e do coeficiente de descarga de um orifício.

Assim, tem-se que o aparato desenvolvido possibilitará a ampliação do número de aulas práticas nas disciplinas Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, o que contribui para o melhoramento do aprendizado dos alunos e no desenvolvimento do curso de Engenharia Civil do Campus Alto Paraopeba – UFSJ.

7 Referências

PORTO, R.M. Hidráulica Básica. 4ª Edição. São Carlos: EESC USP, 2006. 519 pág.

RONQUI, L; SOUZA, M. R.; FREITAS, F. J. C. A importância das atividades práticas na área de biologia. Revista científica da Faculdade de Ciências Biomédicas de Cacoal – FACIMED. 2009. Cacoal – RO.