

## **IX-023 - FENÔMENOS HIDRÁULICOS E RESULTADOS ENCONTRADOS EM UM SISTEMA CONSTRUÍDO - ESTUDO DE CASO**

**Débora Salomé Möller<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade FUMEC

Pós-graduada Aperfeiçoamento em Gestão e Tecnologia de Resíduos e Efluentes pela Faculdade IETEC

**Marcos Rocha Vianna**

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia da UFMG. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. Engenheiro consultor.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua São João Evangelista, 655 - Santo Antônio - Belo Horizonte - Minas Gerais - CEP: 30330-140 - Brasil - Tel: +55 (31) 3287-5914 - e-mail: [deborasmoller@gmail.com](mailto:deborasmoller@gmail.com)

### **RESUMO**

O estudo de caso refere-se a um trecho de tubulação para transporte de esgoto sanitário, que apresentou capacidade de transporte menor que a calculada no projeto. Desta forma, aventou-se a hipótese de que essa redução poderia estar sendo causada pelo aprisionamento de ar ao longo da tubulação, mesmo não apresentando um perfil favorável a esse impasse. Para solucioná-lo foram feitos estudos teóricos e montagem de sistemas, permitindo efetuar toda a análise do problema, com os devidos critérios.

Na primeira parte do trabalho foi construído um sistema com o perfil mais simplificado, objetivando analisar todos os fenômenos hidráulicos observados e direcionar para a montagem do segundo sistema.

Com a instalação do segundo sistema já foi possível observar a ocorrência de um escoamento mais uniforme e, além disso, relacioná-lo com a vazão e as velocidades às quais o sistema foi submetido.

O trabalho busca explicitar os fenômenos hidráulicos encontrados, relacioná-los à literatura e aos resultados encontrados, além de tentar encontrar soluções para o estudo de caso em questão.

**PALAVRA-CHAVE:** Aprisionamento de ar, Fenômenos hidráulicos, Estudo de caso.

### **INTRODUÇÃO**

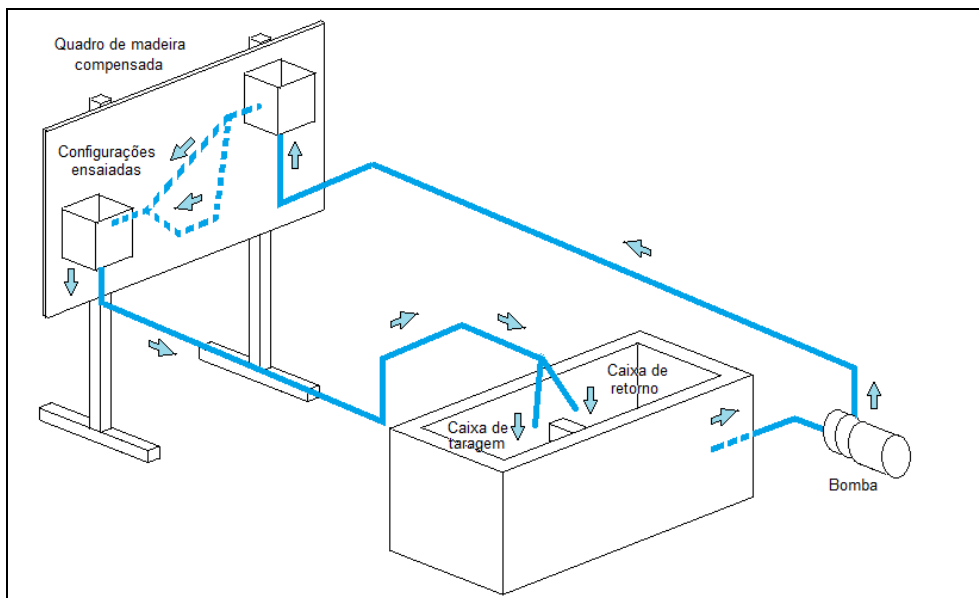
Estudo de caso retrata um problema hidráulico que uma empresa de engenharia deparou. A situação apresentava um conduto forçado operando por gravidade, no qual estava apresentando desempenho inferior ao projeto, mesmo que o perfil da tubulação não favorece-se o aprisionamento, aventou-se a possibilidade da presença de ar dentro do conduto,

Estudos teóricos foram realizados para posteriormente desenvolver um modelo físico instalado em laboratório. Ao longo dos ensaios realizados no modelo notou-se a capacidade do perfil em aprisionar ar, além de presenciar a ocorrência de vários fenômenos hidráulicos que serão descritos no artigo. Foi possível analisar dois perfis de tubulação, o primeiro mais simplificado e o segundo com o perfil mais próximo da tubulação do estudo de caso.

Os fenômenos hidráulicos encontrados no primeiro modelo, foram de grande importância para os resultados encontrados no segundo. Várias alterações foram feitas nas tubulações, sendo possível analisar as respostas das mudanças utilizadas no perfil de escoamento. Este artigo apresenta além dos fenômenos hidráulicos encontrados, mas também as medidas utilizadas para resolvê-los e as comparações dos resultados encontrados.

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Como ponto de partida foi implantando no sistema um perfil de tubulação mais simplificado. Todas as adversidades encontradas no primeiro perfil implantado, serviram de suporte para a construção do segundo perfil, que apresentou características mais próximas da tubulação do estudo de caso. Na figura 1 é apresentado um esquema do sistema completo.



**Figura 1: Esquema do sistema.**

O modelo simplificado apresentado na figura 2 foi importante para o resultado bem-sucedido do segundo modelo. Os fenômenos hidráulicos importantes no funcionamento do sistema foram muito fáceis de serem notados e vistos.



**Figura 2: Modelo simplificado: foto**

No segundo modelo, por apresentar um fluxo mais estável do que o primeiro modelo, foi possível fazer a comparação das vazões e as características de escoamento, assim sendo feita uma análise mais detalhada. Os resultados encontrados serão mais aprofundados na íntegra do trabalho. Também se aproximou mais do perfil da tubulação do estudo de caso, em formato de sifão, como pode ser visto nas figuras 3 e 4.

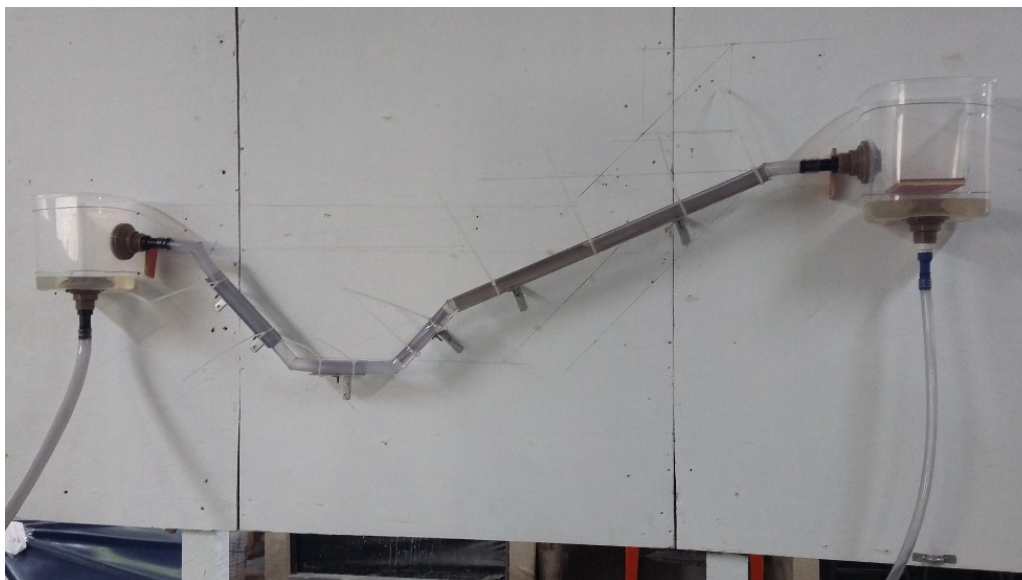


Figura 3: Segundo modelo: foto.

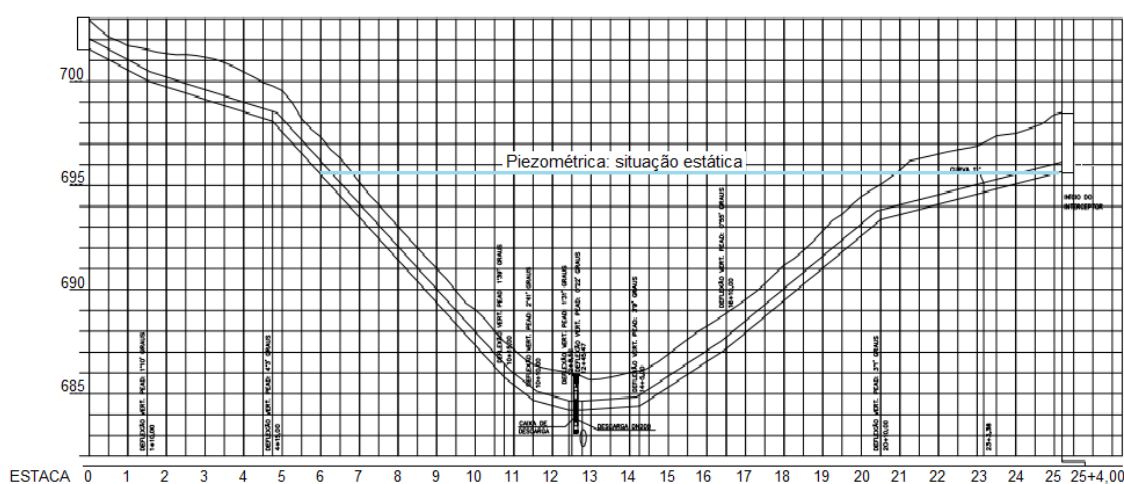


Figura 4: Perfil da canalização estudada e piezométrica correspondente à situação estática.

### Resultados encontrados no primeiro modelo

No primeiro modelo (Figura 2) pode-se deparar com três fenômenos hidráulicos ao longo dos ensaios, que foram:

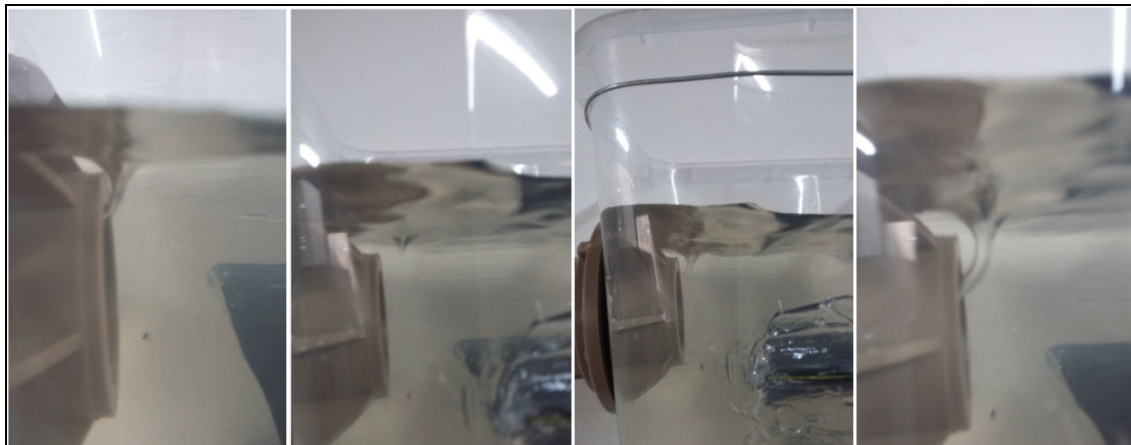
- Agitação excessiva na Câmara de montante
- Vórtice na entrada da tubulação
- Presença de pressão negativa

### Agitação Excessiva na Câmara de montante

Como ponto de partida o primeiro problema observado foi a agitação excessiva na câmara de entrada da tubulação, que estava acarretando a entrada excessiva de ar no sistema do modelo 1. Esse fenômeno deveu-se as pequenas dimensões, assim a carga de velocidade da água nesse local foi responsável por grande agitação em sua superfície. O problema foi solucionado com a instalação de um defletor na entrada de água no reservatório de entrada. Após a instalação do dispositivo, o sistema passou a fluir de forma tranquila

### Vórtice na entrada da tubulação

O segundo fenômeno constatado foi a formação de vórtice na entrada do sistema (FIGURA 5), que também possibilitou a entrada em grandes quantidades de ar. Este pode se tornar tema de futuras pesquisas.



**Figura 5: Vórtice formado no reservatório de entrada: foto.**

Notou-se no primeiro sistema que o escoamento da tubulação só se tornava uniforme a partir de certa vazão, pois não possibilitava a formação do vórtice.

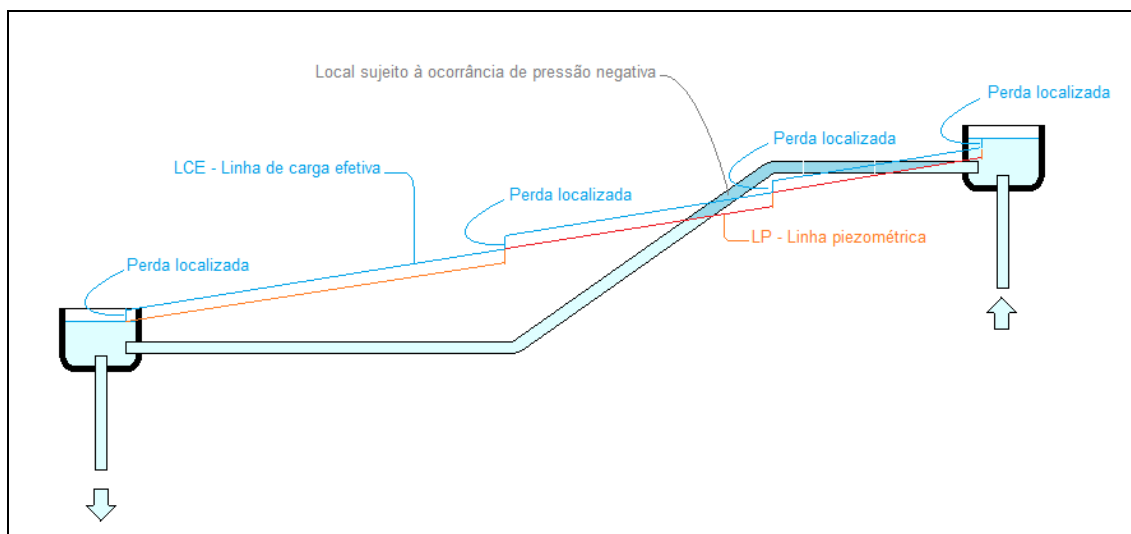
### Presença de pressão negativa

Por fim, para as últimas análises deste modelo foram instalados piezômetros ao longo da tubulação, que permitiram constatar a ocorrência de pressões negativas no sistema. Este primeiro arranjo testado não permitiu a realização de cálculos específicos de perdas de carga em seus diversos trechos. Os pontos em que as pressões negativas ocorreram podem ser vistos na figura 6.

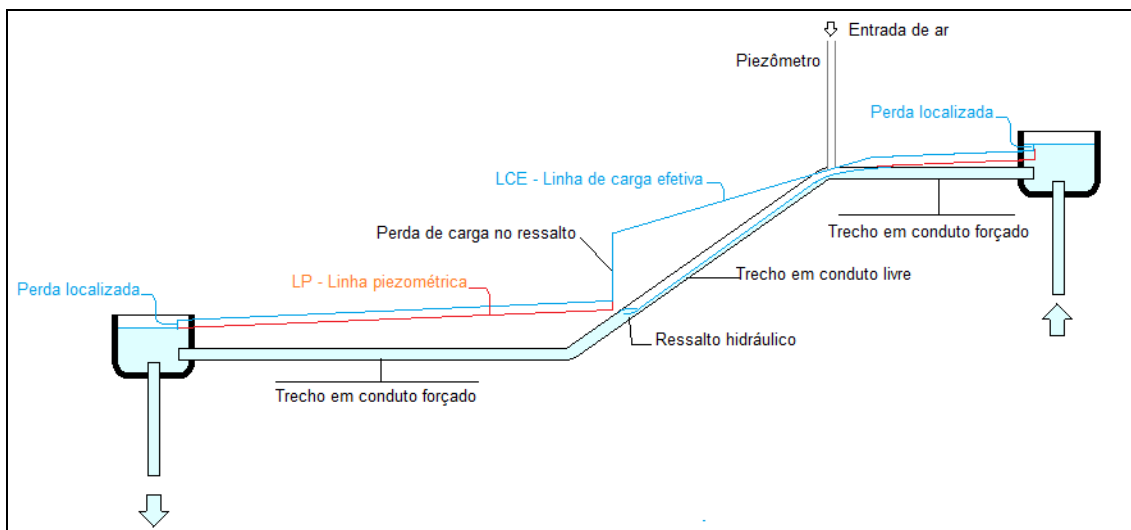


**Figura 6: Piezômetros instalados no sistema.**

Como mencionado por Lescovish (1972), tubulações que apresentam ponto com pressão negativa necessitam de cuidado especial, pois a instalação de dispositivo de alívio de ar, pode causar um efeito contrário, acarretando em uma grande quantidade de entrada de ar ao sistema, como mostra figura 8.



**Figura 7: Sistema hidráulico testado: situação sem piezômetro.**



**Figura 8: Sistema hidráulico testado: situação com piezômetro.**

Uma maneira de evitar a ocorrência da pressão negativa nesse local seria a alteração do perfil da tubulação, ou das cotas dos reservatórios

## Resultados encontrados no segundo modelo

Através das medições das vazões foi possível associar os valores encontrados, aos fenômenos observados. Todos os valores escritos na tabela são em função da altura encontrada na caixa de taragem, junto ao diâmetro médio calculado (TABELA 1).



**Tabela 1: Resultados encontrados após a medição das vazões.**

Ensaio s	Altura utilizada (m)	Volume reservatório (m³)	Tempo de medição (segundos)	Vazão (m³/s)	Diâmetro médio do conduto *(cm)	Diâmetro médio do conduto (m)	Área da seção de escoamento *(m²)	Velocidade de escoamento (m/s)
1	0,0010	0,00032	30	0,0000107	1,814	0,0181	0,00026	0,0413
2	0,0032	0,00102	30	0,0000341	1,814	0,0181	0,00026	0,1321
3	0,0048	0,00154	30	0,0000512	1,814	0,0181	0,00026	0,1982
4	0,0040	0,00128	30	0,0000427	1,814	0,0181	0,00026	0,1652
5	0,0060	0,00192	30	0,0000640	1,814	0,0181	0,00026	0,2477

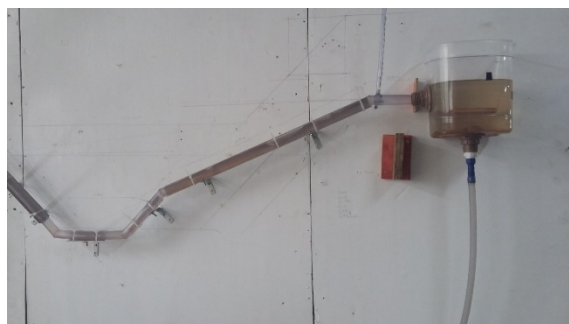
Através da análise da tabela 1 pode-se perceber que foram encontrados valores apenas de 5 ensaios, tal fator deve-se a ocorrência de sifonagem para valores maiores que os do ensaio 5. Devido ao fenômeno citado vazões maiores 0,0000640 m³/s não fixavam, sempre expurgando a ar com muita pressão, alterando o funcionamento do sistema.

Assim que o ar era expurgado o volume do reservatório diminuía, mas logo em seguida uma quantidade de ar entrava no conduto, e então o volume do reservatório tornava a aumentar. Desta forma, para que o problema fosse resolvido, foi instalada uma ventilação no conduto.

### Instalação da ventilação

A ventilação foi instalada na entrada do sistema, com o objetivo de minimizar ou cessar os problemas hidráulicos supracitados (FOTO 9). Desta forma foram feitos novos ensaios e análises do funcionamento do sistema, para poder dizer o efeito da ventilação instalada.

Um total de oito ensaios foram realizados, o que foi possível notar que ocorreu a estabilização de mais vazões. Antes de a ventilação ser instaladas vazões acima 0,0000640 m³/s não fixavam, e após o processo percebeu-se que pode ser medidas vazões acima desse valor.



**Foto 9: Ventilação instalada no sistema.**

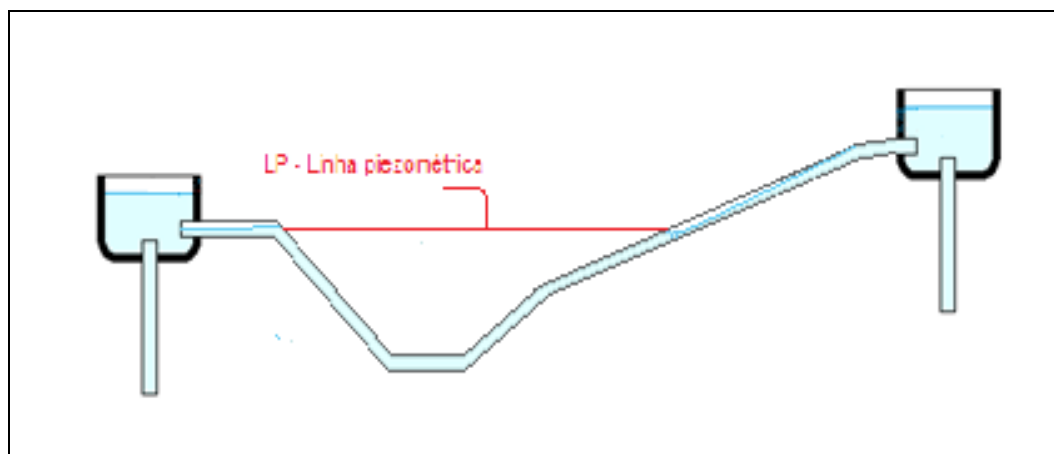
Pôde-se perceber que as vazões do ensaio 1, 2 e 3 (TABELA 3) tiveram um escoamento ideal, pois apresentou no início da tubulação escoamento em condutos abertos, trabalhando a pressão atmosférica, mas mais a jusante da tubulação notou-se que o fluido passava a atuar como escoamento de conduto forçado. Além desses fatores, pode-se notar que a perda de carga medida, apresentou valores próximos à perda de carga calculada, esses valores serão explicitados nos itens subsequentes.

Os ensaios 4 e 8 apresentaram um escoamento mais irregular, no qual, em alguns instantes a entrada do conduto apresentava-se afogada, e em outros instantes com escoamento livre. No momento que a entrada do sistema apresentava-se afogada, a perda de carga medida era nula, como se os pontos de medição estivessem

alinhados, ou como se tivesse ocorrido ganho de carga (FIGURA 10). Tal fator pode ser devido à formação de uma zona de alta pressão, no local onde a bolha aparentava escoar em conduto forçado.

**Tabela 3: Valores encontrados após medição feita.**

Ensaio	Altura média (m)	Volume do reservatório (m³)	Tempo de medição (s)	Vazão (m³/s)	Vazão (L/s)	Diâmetro médio do conduto (m)	Área média (m²)	Velocidade média (m/s)
1	0,001	0,00032	30	0,0000107	0,0107	0,0181	0,000257174	0,0415
2	0,002	0,00064	30	0,0000213	0,0213	0,0181	0,000257174	0,0830
3	0,004	0,00128	30	0,0000427	0,0427	0,0181	0,000257174	0,1659
4	0,015	0,0048	30	0,0001600	0,1600	0,0181	0,000257174	0,6221
5	0,0178	0,005696	30	0,0001899	0,1899	0,0181	0,000257174	0,7383
6	0,0188	0,006016	30	0,0002005	0,2005	0,0181	0,000257174	0,7798
7	0,012	0,00384	30	0,0001280	0,1280	0,0181	0,000257174	0,4977
8	0,0043	0,001376	30	0,0000459	0,0459	0,0181	0,000257174	0,1783



**Figura 10: Perfil da tubulação nos ensaios 4 e 8.**

Os outros pontos medidos, apresentaram vazões mais elevadas, na qual a boca de entrada apresentava-se totalmente afogada. Como mencionado no item anterior, vazões muito elevadas não fixavam no sistema, mas após a instalação da ventilação, notou-se que estas passaram a fixar. A tubulação apresentou um escoamento contínuo.

#### Perda de carga no conduto

A perda de carga ao longo do conduto foi calculada por duas fórmulas distintas, Fórmula de Flamant (Formula 1) e Fórmula Universal (Formula 2). A perda de carga pela formula universal é em função de  $f$ , que varia de acordo com as características de escoamento do conduto.

$$h_f = 0,000824 \cdot \left( \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \right) \cdot L \quad \text{Fórmula (1)}$$

e

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

Assim sendo,  $f$  é calculado através do cálculo do número de Reynolds, junto as variáveis A e B. O número de Reynolds é calculado pela formula (3) a seguir:

$$Re = \frac{UD}{\mu}$$

Fórmula (3)

Onde:

Re= número de Reynolds

U= Velocidade média de escoamento

D= Diâmetro do conduto

$\mu$  = Viscosidade dinâmica do fluido ( $10^{-5}$ )

Depois de feito os cálculos do Número de Reynolds podem ser calculadas as variáveis A e B, que podem ser calculados pelas fórmulas (4) e (5) a seguir, respectivamente:

$$A = \left[ 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27\mu}{D}} \right) \right]^{16}$$

Fórmula (4)

e

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{10}$$

Fórmula (5)

Ambas as fórmulas supracitadas são em função do Número de Reynolds. Desta forma, calculado o Número de Reynolds e as variáveis A e B, pode-se fazer o cálculo de f. Através de a fórmula (6) a seguir pode-se obter f:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^7} \right]^{\frac{1}{12}}$$

Fórmula (6)

Calculados todos os valores de f, pode-se jogar na fórmula Universal, exposta no quadro 1, e obter a perda de carga ao longo do conduto. A seguir a tabela 5 apresenta os resultados encontrados.

**Tabela 1: Valores encontrados para encontrar f.**

Ensaio	Número de Reynolds (Re)	A	B	F
1	750,7243317	1,36189E+16	1,52184E+27	0,085251
2	1501,448663	1,08983E+17	2,32214E+22	0,042625502
3	3002,897327	6,15937E+17	3,54331E+17	0,045157819
4	11260,86498	6,86975E+18	231690919,9	0,03535675
5	13362,8931	8,64178E+18	14984736,89	0,034356949
6	14113,61744	9,26326E+18	6249475,511	0,034059987
7	9008,69198	4,95338E+18	8231315005	0,036832168
8	3228,114626	7,24140E+17	1,11397E+17	0,046009315



**Tabela 2: Valores das perdas de carga ao longo do conduto.**

Ensaio	Perda de carga no conduto(m) (fórmula de Flamant) <sup>1</sup>	Perda de carga (m) (Formula Universal)
1	0,000298284	0,000398103
2	0,001010598	0,000801993
3	0,003409746	0,003409063
4	0,049578341	0,054007252
5	0,066890938	0,073901256
6	0,073605204	0,081725466
7	0,033550536	0,036007005
8	0,003885694	0,004030384

A tabela 6 apresenta a comparação dos valores das perdas calculadas para os dois modelos citados. Pode-se notar que existem diferenças nos valores, mas nenhuma diferença pode ser considerada significativa.

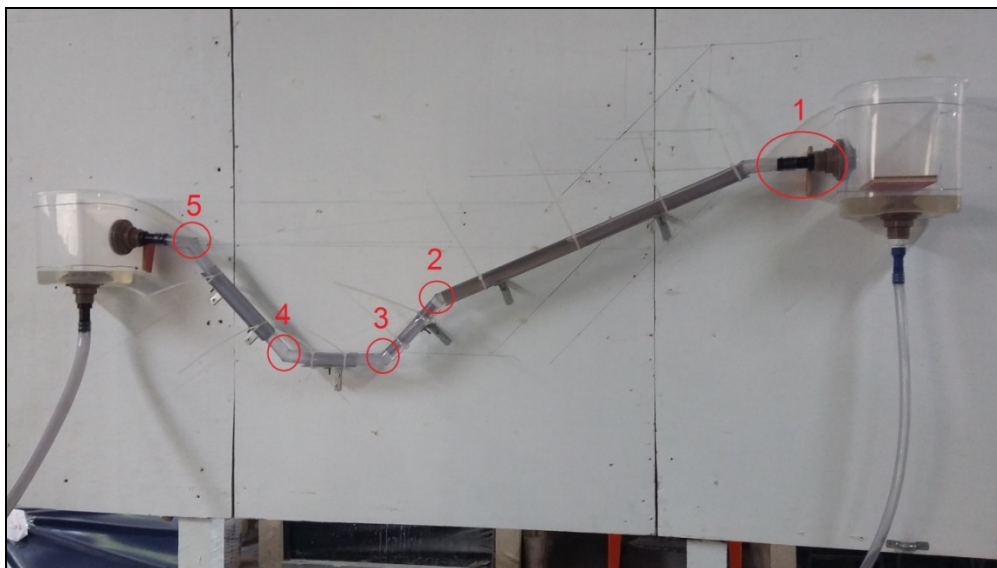
#### Perda de carga localizada

A perda de carga localizada pode ser calculada pela fórmula (7) abaixo, na qual, a variável k varia de acordo com os pontos de perdas localizadas do conduto.

$$h_f = \sum k \frac{v^2}{2g}$$

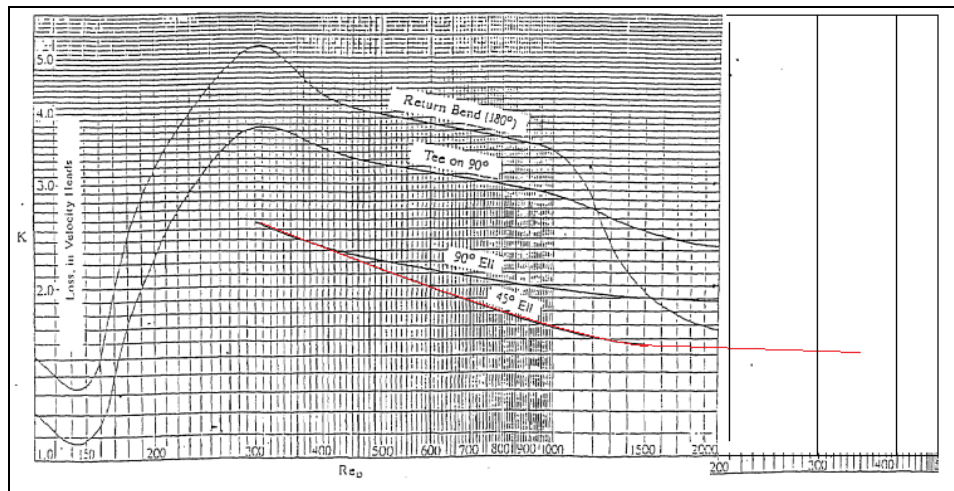
Fórmula (7)

Foram considerados cinco pontos de perda de carga (FIGURA 7), nos quais, o primeiro ponto trata-se da perda na entrada da tubulação, já nos outros quatro pontos, são perdas referentes à mudança de declividade no conduto, sendo assim considerado k para cotovelos de 45°.



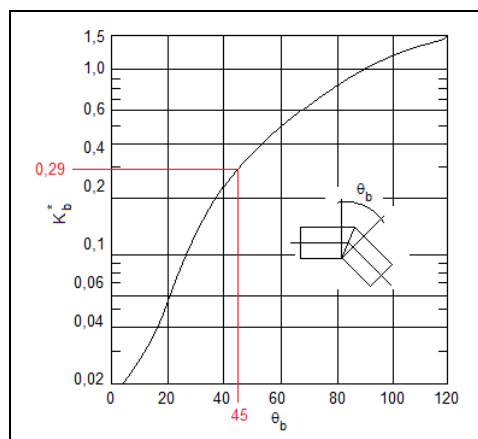
**Figura 7: Pontos de perdas de carga no conduto.**

O k presente na fórmula explicitada foi calculado de duas formas, a primeira foi através de um gráfico comparativo do número de Reynolds e o coeficiente de perda de carga (k). Como pode ser visto na figura 8, a curva utilizada para encontrar k, é a marcada em vermelho, referente a um cotovelo de 45°.



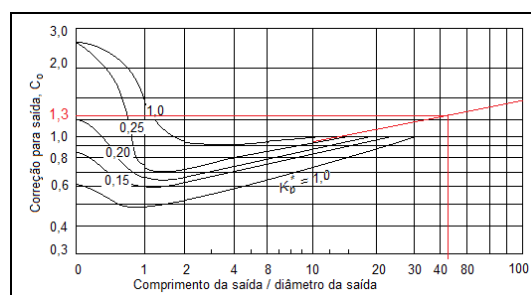
**Figura 8: Gráfico para descobrir k.**

Já a segunda forma de medição foram utilizados 3 gráficos (FIGURA 9,10 E 11). Na figura 9 foi descoberto  $k_b$ , referente a um cotovelo de 45°, no entanto, sem levar em consideração as condições de escoamento do sistema.



**Figura 9: Cotovelo de 45° versus  $k_b$ .**

Na figura 10 para o cálculo de k era determinado um fator de correção de saída de k, levando como base o comprimento do conduto, e o diametro do mesmo.



**Figura 10: Coeficiente para correção de  $k_b$ .**

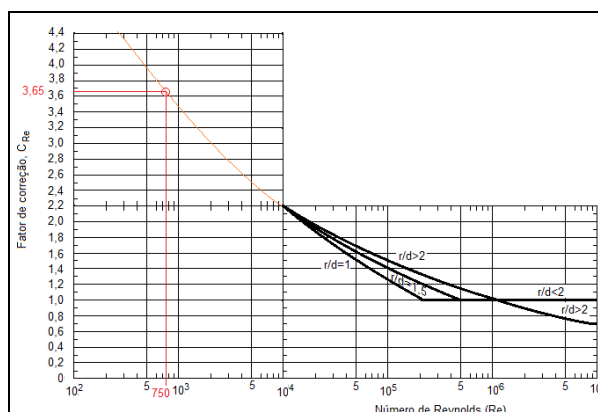


Figura 11: Fator de correção e função do número de Reynolds e  $r/d$ .

No gráfico 11 através do número de Reynolds e  $r/D$  é determinado outro fator de correção. Todos esses valores encontrados são jogados na fórmula (11):

$$k = k^* \cdot c_{re} \cdot c_D$$

Fórmula (11)

Assim calculado o  $k$ , pode-se jogar na formula da perda de carga localizada supracitada. Na tabela 7 abaixo são explicitados os valores encontrados, para cada vazão.

Tabela 3: Perdas de carga localizada.

Perda de carga localizada 1 (m)	Perda de carga localizada 2 (m)
0,000614392	0,000570876
0,002457569	0,002061142
0,009830278	0,007312772
0,13823828	0,083776347
0,194664074	0,116294542
0,217150834	0,128324975
0,088472499	0,054951028
0,011360115	0,008303984

Perda de carga total

A perda de carga total no conduto é a somatória da perda de carga localizada e a perda de carga ao longo do conduto. Na tabela 8 abaixo, foram feitos quatro cálculos de perda de carga total, na qual, foram feitas todas as possibilidades. Notou-se que os valores para vazões mais baixas (ensaios 1,2,3,4 e 8) obtiveram uma taxa de variação inferior aos que possuíam vazões mais elevadas (5, 6 e 7).

Tabela 4: Perdas de cargas totais.

Ensaio	Formula universal + hl 1	Formula universal + hl 2	Formula de Flamant + hl 1	Formula de Flamant + hl 2	Perda de carga medida (m)
1	0,00101249	0,000968978	0,000913	0,00086916	0,001
2	0,00325956	0,002863135	0,003468	0,00307174	0,002
3	0,01323934	0,010721834	0,01324	0,010722518	0,006
4	0,19224553	0,137783599	0,187817	0,133354688	-
5	0,26856533	0,190195799	0,261555	0,183185481	0,195
6	0,2988763	0,210050441	0,290756	0,201930179	0,201
7	0,1244795	0,090958032	0,122023	0,088501564	0,14
8	0,0153905	0,012334368	0,015246	0,012189678	-

A última coluna da tabela mostra as perdas de cargas medidas no sistema, desta forma é possível fazer uma análise da aplicabilidade da forma para cada regime de escoamento. Para os ensaios 4 e 8 não possível fazer a medição da perda de carga, pois o ponto de medição não apresentou uma altura fixa, como já foi mencionado nos itens anteriores.

Para tentar resolver o problema de sinofagem nos pontos 4 e 8 foi instalado outra estrutura de ventilação no sistema. Serão feitas análises dos efeitos da ventilação, junto a mais medições de vazão.

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Todos os resultados encontrados no primeiro modelo foram fundamentais para aplicação de medidas estudadas na literatura, confirmando a eficácia da solução ou acarretando novos problemas. O segundo modelo apresentou grande importância na comparação dos valores calculados para as perdas de carga, vazão no sistema, velocidade aplicada, que se apresentaram diretamente relacionada a esses parâmetros.

## **CONCLUSÕES**

O estudo mostrou que o aprisionamento de ar é de fato um fator prejudicial ao sistema, que deve ser solucionado. Sua introdução no sistema, sua permanência em seu interior, como expulsá-lo e a ocorrência de pressões negativas são elementos importantes a considerar no projeto de condutos forçados.

Ressalta-se a importância da realização de mais estudos nesta área hidráulica, tendo em vista que as referências encontradas na literatura técnica foram muito poucas e, de modo geral, com pouco embasamento experimental.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores manifestam seus mais profundos agradecimentos à empresa Engesolo Engenharia Ltda., que patrocinou a realização deste trabalho através da contratação da acadêmica Débora Salomé Móller como estagiária da empresa e bolsista de Iniciação Científica.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. LESCOVICH, Joseph E. Locating and Sizing Air-Release Valves. Journal American Water Works Association. V. 64, No. 7, p. 457-461, Jul.1972.