



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO, CONTROLE E ROBÓTICA**

**PAULO ROBERTO OLIVEIRA**

**MEDIÇÃO DE VAZÃO DE LÍQUIDOS COM PLACA DE ORIFÍCIO**

Salvador, Bahia  
2015

**PAULO ROBERTO OLIVEIRA**

**MEDIÇÃO DE VAZÃO DE LÍQUIDOS COM PLACA DE ORIFÍCIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Automação, Controle e Robótica da Faculdade de Tecnologia SENAI - Cimatec como requisito final para a obtenção do título de Especialista em Automação, Controle e Robótica.

Orientador: Prof. Msc. Oberdan Rocha Pinheiro.

Co-orientador: Prof. Msc. Milton Bastos de Souza.

Salvador, Bahia  
2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

O48m Oliveira, Paulo Roberto

Medição de vazão de líquidos com placa de orifício / Paulo Roberto Oliveira. – Salvador, 2015.

49 f. : il. color.

Orientador: Prof. MSc. Oberdan Rocha Pinheiro.  
Coorientador: Prof. MSc. Milton Bastos de Souza.

Monografia (Especialização em Automação, Controle, e Robótica) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2015.

Inclui referências.

1. Medição de vazão. 2. Vazão de líquidos. 3. Placa de orifício. 4. Concêntrica. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Pinheiro, Oberdan Rocha. III. Souza, Milton Bastos de. IV. Título.

CDD 681

**PAULO ROBERTO OLIVEIRA**

**MEDIÇÃO DE VAZÃO DE LÍQUIDOS COM PLACA DE ORIFÍCIO**

Projeto final de curso aprovado com nota 8,5 (oito e cinco) como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Automação, Controle e Robótica, tendo sido julgado pela Banca Examinadora formada pelos professores:

---

**Msc. Oberdan Rocha Pinheiro – Orientador**  
**Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC**

---

**Msc. Milton Bastos de Souza – Professor**  
**Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC**

Salvador, 13 de outubro de 2015.

## **DEDICATÓRIA**

Ao Grande Arquiteto do Universo, por permitir meu devir...

A toda minha família biológica alicerce e base de lançamento das minhas conquistas neste plano...

“N,se otito, n,se rere”,

“Enia n,se otito irunmalé g,be”

“Seja verdadeiro, seja justo”

“Os que assim procedem são amparados pela espiritualidade”

Provérbios da etnia lorubá

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Oberdan Rocha Pinheiro, apoio fraterno nas varias etapas deste projeto.

A minha família, pelo incentivo, apoio, confiança e motivação.

Aos colegas da Turma ACR-42263 pelos momentos de sabedoria e desenvolvimento que vivenciamos.

Aos professores do Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

Ao professor orientador deste TCC pelas informações, instruções e orientação na busca de melhor perfeição para este trabalho.

## RESUMO

Este trabalho é o resultado de nossas observações ao longo de vários anos de prática de engenharia em movimentação de fluidos de que, a tecnologia da placa de orifício, embora seja um dos mais antigos métodos de medição de vazão, continua tendo larga aplicação especialmente na indústria, entretanto, apresenta sua literatura, as informações técnicas e de engenharia muito dispersas, dificultando sua consulta para que um estudante ou novo profissional obtenha conhecimentos que lhe permitam um desenvolvimento profissional mais rápido e menos intuitivo.

Para a elaboração deste trabalho foi utilizada a metodologia de pesquisa bibliográfica, combinada com a nossa experiência neste ramo do conhecimento, o que nos permitiu estreitar a linha de estudo para a placa de orifício concêntrico que consideramos como um modelo básico, por onde toda a aprendizagem deve ser iniciada.

Assim, o presente texto expõe além da teoria, toda a nossa experiência prática de engenharia para concatenar em uma única publicação, uma série de informações teóricas e práticas, permitindo que qualquer profissional interessado, obtenha conhecimentos para o dimensionamento de sistemas de medição de fluxo com placa de orifício.

Palavras-chave:

Medição de vazão; Vazão de líquidos; Placa-de-orifício; Concêntrica



## **ABSTRACT**

This work is the result of our observations over a number of years of practice fluid movement in engineering that the orifice plate technology, although it is one of the oldest methods of measurement, still has wide application especially in presenting industry however its literature, technical information and engineering widely dispersed, making it difficult to query for a student or young professional knowledge enabling them to get a professional development faster and less intuitive.

For the preparation of this work was used the bibliographical research methodology combined with our experience in this branch of knowledge, which allowed us to narrow the line of study for the concentric orifice plate which we regard as a basic model, where all learning should be started.

Thus, the present work beyond theory, all our practical experience of engineering to concatenate into a single publication, a number of theoretical and practical information, allowing any interested professional, get knowledge for the design of flow measurement systems orifice plate.

Key words:

Flow measurement; Liquid flow; Orifice-plate; Concentric

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elemento deprimogênio	14
Figura 2 – Equação da continuidade	16
Figura 3 – Filete líquido para dedução da equação de Bernoulli	17
Figura 4 – Tubo de Venturi	19
Figura 5 – Bomba a jato d'água	20
Figura 6 – Tubo de Pitot	21
Figura 7 – Pistão hidráulico	22
Figura 8 – Escoamento sob gravidade	23
Figura 9 – Empuxo	24
Figura 10 – Placa de orifício concêntrica	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de comprimento equivalente de válvulas e conexões	28
Tabela 2 – Tabela de coeficiente de atrito para tubos de aço	29

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AGA-3 - American Gas Association – AGA report nº 3; Part 2.

ISO - International Organization for Standardization.

NBR - Norma Brasileira Registrada.

SI - Sistema Internacional de Unidades.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	10
1.1 Metodologia	10
1.2 Histórico da medição de vazão	11~12
<b>CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO</b>	13
<b>2 Teoria aplicada</b>	13
2.1 Conceito de vazão	13
2.2 Unidades	13~14
2.3 Elementos de primogênios	14
2.4 Teoria resumida	14
2.5 Equação da continuidade	15
2.6 Equação de Bernoulli	16~18
2.7 Aplicações da equação de Bernoulli	19
2.8 Viscosidade	25
2.9 Número de Reynolds	25
2.10 Perda de carga	27~29
<b>CAPÍTULO 3 – CONCLUSÃO</b>	30
<b>3 A medição de vazão com placa de orifício</b>	30
3.1 Conceitos	30~36
3.2 Dimensionamento de uma placa de orifício concêntrica	36~38
3.3 Dimensionamento via software de uma placa de orifício concêntrica	39
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b>	40
<b>REFERÊNCIAS</b>	41~42
<b>ANEXOS</b>	43
Anexo 1- Folha de dados cálculo manual	43~44
Anexo 2- Memória de cálculo informatizado	45
Anexo 3- Folha de dados cálculo informatizado	46~47

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 METODOLOGIA**

No campo da Hidrometria a medição de vazão em condutos fechados apresenta importância singular, pois, o alto nível de industrialização da sociedade moderna, demanda a fabricação de produtos em áreas físicas reduzidas, onde a circulação dos insumos se dá normalmente em condutos fechados com pressões acima ou abaixo da pressão atmosférica.

Neste trabalho, procuramos juntar a nossa experiência de vários anos de prática de engenharia com os fundamentos teóricos da medição de vazão com placa de orifício de forma a que, uma única publicação, possa servir de alicerce para consulta e aprendizado para o dimensionamento e a resolução de problemas de engenharia.

Na nossa pesquisa não encontramos publicação igual ou com propósito similar.

Para a execução, foram feitas consultas a literatura específica, pesquisas na Internet, consultas a normas nacionais e internacionais aplicáveis escolhendo-se com base na nossa experiência, os tópicos a serem apresentados e que permitirão conhecimento básico pleno ao leitor.

O trabalho apresenta, inicialmente, os conceitos de vazão e o seu histórico, em seguida são apresentados diversos conceitos, variáveis físicas e cálculos matemáticos relacionadas a vazão e finalmente é apresentado um estudo de caso prático de dimensionamento, primeiro utilizando calculadora científica, e em seguida, utilizando software de engenharia específico, ao final, é apresentada a documentação técnica relativa que deve ser gerada em um projeto.

## 1.2 HISTÓRICO DA MEDIÇÃO DE VAZÃO

A necessidade de medir vazão surgiu com a industrialização e a urbanização, onde a canalização e distribuição de água para uso doméstico, ensejou a necessidade de criação de uma fonte de arrecadação para a administração pública.

As primeiras medições de vazão foram executadas por egípcios e romanos, cujas obras de adução de água são visíveis e servem de ruínas turísticas ainda nos dias atuais, existindo referências em uma obra de Frontinus no ano 90 de nossa era. Fonte: **(Delmée;2003)**,

Leonardo da Vinci (1452-1519) no séc. XV publicou “Sobre o movimento da água e das águas pluviais”.

No início do Séc. XVII, Galileu Galilei (1564-1642) pelo método experimental deu sua contribuição aos fundamentos da medição de vazão e, seu discípulo, Evangelista Torricelli (1608-1647) estabeleceu a equação sobre o escoamento livre da água através de orifícios.

Dois físicos do séc. XVIII: Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonardo Euler (1707-1783) definiram as bases da Mecânica dos Fluidos.

Em seu tratado de hidrodinâmica de 1738, Bernoulli formulou a principal lei sobre o movimento dos líquidos chamada de “Equação de Bernoulli”.

Euler estabeleceu as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos.

Ainda no séc. XVIII, Henry Pitot (1695-1771) apresentou em um trabalho, um instrumento que passou a ser conhecido como “Tubo de Pitot” na atualidade “Pitot” e que era capaz de medir a velocidade da água.

Em 1797, Giovanni Venturi (1746-1822), publicou seus estudos sobre o que, na época, foi chamado de “Tubo de Venturi”, hoje conhecido em Hidrodinâmica como “Venturi”.

No séc. XIX, os físicos Jean Poiseuille (1799-1869) (escoamento em tubos capilares e viscosidade dos fluidos), Sir George Stokes (1819-1903) (trabalhos sobre a hidrodinâmica) e Osborne Reynolds (1842-1912) (número de Reynolds) contribuíram significativamente para a evolução da tecnologia da medição de vazão.

A revolução industrial, com seus processos produtivos cada vez mais complexos, impulsionou a intensificação dos estudos sobre a medição de vazão evidenciados pelo grande número de congressos mundiais que buscavam a troca e uniformização de informação e tecnologia por exemplo:

1932, Congresso de Milão – estabeleceu dados básicos sobre placas de orifício e bocais de vazão.

1934, Congresso de Estocolmo – consolidou dados existentes.

1939, Congresso de Helsinque – normalizou os bocais-venturi.

1948, Congresso de Paris – mudou coeficientes existentes e normalizou os coeficientes às tomadas a D e D/2.

As normas internacionais ISO- R541 “Medição de Vazão por Placas de Orifício” e ISO- R781 “Medição de Vazão por Tubo de Venturi” publicadas nos anos 60, foram atualizadas pela ISO-5167, publicada inicialmente em 1981 e subscrita por todos os países-membros 10 anos depois.

No Brasil, a medição de vazão com dispositivos deprimogênios é uma aplicação relativamente nova advinda com a implantação da indústria petrolífera nos anos 50 e consolidando-se a medida que o parque industrial brasileiro se expandia.

No caso particular da medição baseada em placas de orifício e no Brasil, adotam-se as normas ISO-5167 e AGA-3.



## CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO

### 2 TEORIA APLICADA

#### 2.1 CONCEITO DE VAZÃO:

Segundo Delmée, 2003, defini-se vazão, fluxo ou taxa de escoamento, como o volume de um fluido (líquido, gás ou vapor) que escoar por unidade de tempo através de determinada seção transversal de um conduto que pode ser livre (canal, rio ou tubulação a pressão atmosférica) ou um conduto fechado (tubulação com pressão positiva ou negativa).

É o volume de determinado fluido que passa por uma determinada seção de um conduto em uma unidade de tempo. Fonte: **(Cassiolo, Cezar, 2010)**.

#### 2.2 UNIDADES:

As unidades usualmente adotadas são as do SI – Sistema internacional de unidades e, são na maioria dos casos assim expressas:

2.2.1 Vazão em volume (vazão volumétrica): m<sup>3</sup>/s (metro cúbico por segundo)

Nesse unidade, a vazão para líquidos pode estar relacionada com condições reais (condições de operação) ou pode na medição de gases, estar relacionada com condições de referência (pressão e temperatura).

2.2.2 - Pressão e pressão diferencial em Pascal (Pa)

2.2.3 – Comprimento em metro (m).

2.2.4 - Temperatura em grau absoluto (K)

2.2.5 - Massa específica em kgf/m<sup>3</sup>

2.2.6 – Viscosidade em Pascal por segundo (Pa/s)

2.2.7 – Vazão em massa (vazão mássica): kg/h (quilograma por hora).

2.2.8 Outras unidade de vazão : Fonte: **(Web Calc-2015)**

Bpd (Barril por dia) ; Cfh (Pé Cúbico por hora) ; Ton/h (Tonelada por hora) ; Nm<sup>3</sup>/h (Normal metro cúbico por hora) ; Sm<sup>3</sup>/h (Standard metro cúbico por hora) ; Gpm (Galões por minuto)

01 galão americano = 3,875 litros = 0,0038 m<sup>3</sup>.

01 barril americano = 159 litros = 0,159 m<sup>3</sup>

01 pé cúbico americano = 28,316 litros = 0,028316 m<sup>3</sup>

Nm<sup>3</sup>/H ou Sm<sup>3</sup>/h = 01 m<sup>3</sup> @ 0C° and 1,033 kgf/cm<sup>2</sup>abs

### 2.3 ELEMENTOS DEPRIMOGÊNIOS:

São diversos elementos aplicáveis em um sistema de medição de vazão que, ao serem inseridos em uma tubulação entram em contato direto com o fluido em escoamento, causando condições conhecidas de queda de pressão relacionadas com a velocidade e a área da seção transversal no local da instalação, os trechos da tubulação na entrada e saída destes elementos são por sua vez, conectados a medidores de pressão diferencial que dão uma medida indireta da vazão medida.

Como elementos deprimogênicos citamos o tubo de Pitot, o tubo de Venturi, o Bocal, o Annubar e a Placa de orifício.

A figura (1) abaixo, ilustra o conceito de elemento deprimogênio:

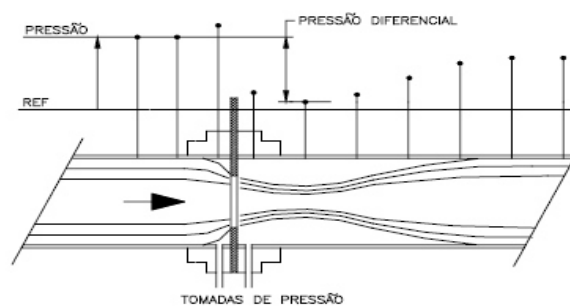


Figura 1 – Elemento deprimogênio

(Fonte: **BRINGER, 2015**)

### 2.4 TEORIA RESUMIDA:

A teoria de medição de vazão por pressão diferencial é fundamentada em leis físicas conhecidas. As equações teóricas devem ser complementadas por

coeficientes práticos para que a vazão possa ser medida com exatidão. A teoria considera a equação da continuidade e a equação de Bernoulli.

## 2.5 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE:

A equação da continuidade aplica-se diretamente a líquidos incompressíveis fluindo em um duto completamente preenchido e cuja seção varia de  $S_1$  para  $S_2$ , sendo a vazão volumétrica ( $Q$ ) igual ao produto da velocidade ( $V$ ) pela seção ( $S$ ) assim, deduz-se pela equação da continuidade que, num conduto fechado, a vazão é igual e constante em qualquer ponto desta tubulação, sendo limitada, se mantidas as condições de escoamento, pelo trecho de menor diâmetro, assim conforme a equação (1) temos a equação geral da continuidade:

$$Q = S_1V_1 = S_2V_2 \quad (1)$$

Podemos exemplificar com um procedimento prático em nosso dia-a-dia quando, em nosso jardim, desejamos molhar as plantas mais distantes e estrangulamos a nossa mangueira apertando-a, na realidade, o que causamos naquele momento, é uma diminuição da seção transversal da mangueira e, esta redução de seção, produz uma redução da vazão total na mangueira com aumento da velocidade de escoamento, o que lança a água para o ponto mais distante. Com a redução, geramos energia de movimento (velocidade) em detrimento da queda de pressão (trabalho).

As partículas do líquido, que pertencem a um filete de fluxo, nunca podem deixar o tubo de fluxo, porque a velocidade ( $V$ ) é paralela às linhas de corrente que limitam o tubo (ou filete). Para um líquido incompressível, as quantidades do mesmo que passam pelas diversas seções transversais do tubo de fluxo, na unidade de tempo, devem ser iguais. Com base na análise da figura 2 abaixo ilustrada:

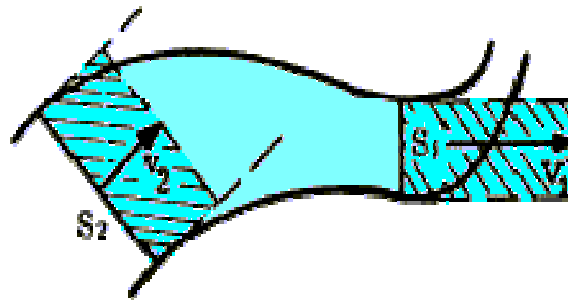


Figura 2 – Equação da continuidade  
(Fonte: **Autor, 2015**)

Verifica-se que, ao construir-se um cilindro de altura  $V_1$  sobre a superfície  $S_1$ , passará através desta superfície  $S_1$ , na unidade de tempo, uma quantidade de líquido justamente igual ao volume do cilindro. Para as duas secções  $S_1$  e  $S_2$  evidencia-se, conforme a equação (2) :

$$S_1.V_1 = S_2.V_2 \text{ ou } V_1/V_2 = S_2/S_1 \quad (2)$$

Que nos permite calcular a distribuição das velocidades num tubo de fluxo (por exemplo, num conduto hidráulico).

Quanto maior for a área da seção transversal, menor a velocidade.

## 2.6 EQUAÇÃO DE BERNOULLI:

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para estabelecer a relação entre velocidade e pressão num filete líquido cujo diâmetro (em hipótese, muito pequeno) varia num certo trecho passando de uma seção  $S_1$  para uma seção  $S_2$ .

Para deduzirmos a equação de Bernoulli, procederemos da seguinte maneira:

Dado um tubo de fluxo delgado (filete líquido), representado na figura 3 abaixo, limitaremos entre duas secções transversais  $S_1$  e  $S_2$ , determinado

volume  $dV$  do líquido (ilustração abaixo). A posição (localização) desse volume será dada pelo espaço "s" sobre a trajetória, ao longo da linha de fluxo  $Q_0Q$  (pontilhada no desenho). A velocidade "v" e a pressão em "Q" são funções da posição s:  $v = v(s)$ ,  $p = p(s)$ .

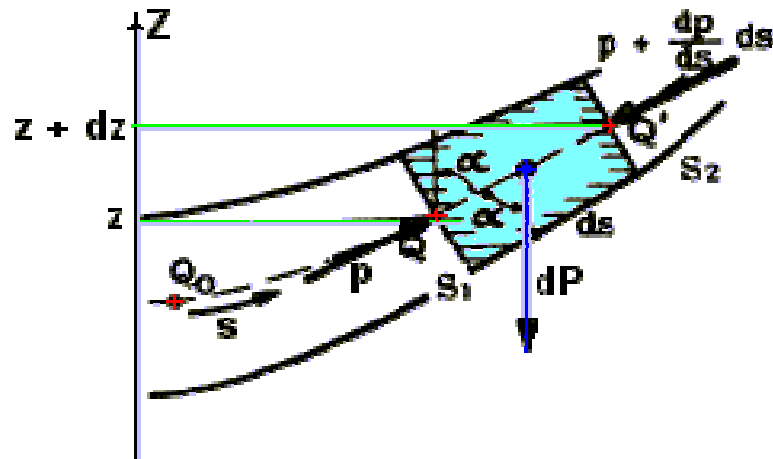


Figura 3 – Filete líquido para dedução da equação de Bernoulli

(Fonte: **Delmée, 2003**)

Suponhamos também, que o líquido está num campo de gravidade uniforme  $g$ , então atuará sobre o líquido contido no volume  $dV$ , o peso  $dP$ . Introduziremos, por isso, ainda um eixo vertical de coordenadas  $z$ . Como já está dada a linha de fluxo, será também  $z$  função de  $s$ :  $z = z(s)$ .

Sobre o volume de líquido  $dV$ , entre as duas secções  $S_1$  e  $S_2$  atuam, então, as seguintes forças:

- 1 — Aquela proveniente da pressão  $p(s)$  no ponto  $Q$ ; que indicaremos por  $p(s)$ ;
- 2 — Aquela proveniente da pressão  $p(s+ds)$  no ponto  $Q'$ ; que indicaremos como equação (3.1) abaixo:

$$P(s+ds) = P(s) + \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right) \times ds \quad (3.1)$$

3 — Do peso  $dP$ , interessa-nos somente o seu componente na direção da tangente. Ele vale na equação (3.2) :

$$dP \cdot \cos \alpha = dP \cdot (dz/ds) \rightarrow dP = (dP \cdot (dz/ds)) / \cos \alpha \quad (3.2)$$

Valerá, então, para o componente da força total sobre  $dV$ , tomada na direção do movimento (tangente, portanto, à linha de fluxo QoQ) conforme a equação (3.3) abaixo:

$$dm \times (dv/dt) = dFs \quad (3.3)$$

Sendo (3.3) a equação de Newton, aplicada ao volume líquido  $dV$ .

Designando-se ainda, por “ $r$ ” a densidade absoluta do líquido e recordando-se que:  $dV = S \cdot ds$ , a equação de Newton adquire, ao longo de uma linha de fluxo, conforme o desenvolvimento da equação (4) o seguinte aspecto:

$$pS \cdot ds (dv/dt) = S\{p - (p + (\partial p / \partial s) ds)\} - p \cdot S \cdot ds \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

$$p \cdot ds (dv/dt) = - S(\partial p / \partial s) ds - p \cdot S \cdot g \cdot ((dz/ds) ds) \quad (4.1)$$

$$p \cdot ds (dv/dt) + dp + p \cdot g \cdot dz = 0 \quad (4.2)$$

$$\text{ou, } (P/2)d(v^2) + dp + p \cdot g \cdot dz = 0 \quad (4.3)$$

$$d(p + ((P/2)v^2)) + p \cdot g \cdot dz = 0 \quad (4.4)$$

que, por integração, fornece a equação (4.5):

$$p + ((P/2)v^2) + p \cdot g \cdot z \quad (4.5)$$

que é uma constante ao longo de uma linha de fluxo.

Essa equação (4.5) é conhecida como equação de Bernoulli.

A grandeza “ $p$ ” é denominada pressão estática, a grandeza  $(r/2)v^2$  é a pressão dinâmica (ou cinética) e a grandeza  $rgz$  é a pressão por gravidade, (ou de posição).

Para escoamento horizontal,  $z = \text{constante}$ .

Então se reduz a equação de Bernoulli a equação (5) abaixo:

$$p + (r/2)V^2 = \text{constante ao longo de uma linha de fluxo.} \quad (5)$$

## 2.7 APLICAÇÕES DA EQUAÇÃO DE BERNOULLI:

### 2.7.1 — Tubo de Venturi

De acordo com a equação da continuidade (2), ter-se-á:

$$V_1/V_2 = S_2/S_1 \quad (2)$$

De acordo com Bernoulli, verifica-se na equação (6) abaixo também (no caso de  $z = \text{constante}$ ), que:

$$P + (r/2)V^2 = P_1 + (r_1/2)V_1^2 \quad (6)$$

O que pode ser melhor entendido analisando-se a figura 4 :

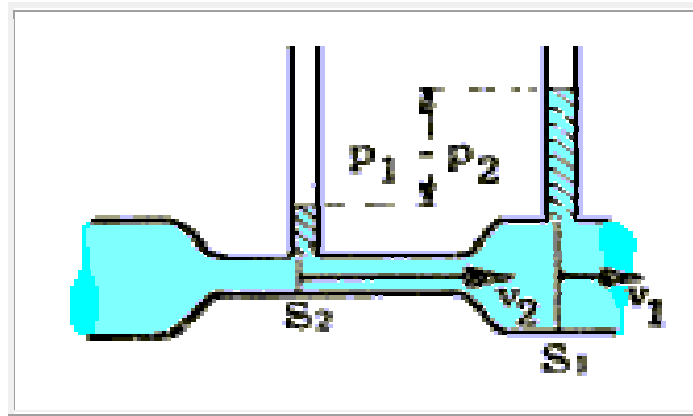


Figura 4 – Tubo de Venturi.

(Fonte: **Autor, 2015**)

Na região estreita, a velocidade  $V$  é maior, sendo menor a pressão  $P$ .

A construção da bomba a jato d'água (trompa), como a ilustrada na figura (5) baseia-se no princípio do tubo de Venturi :

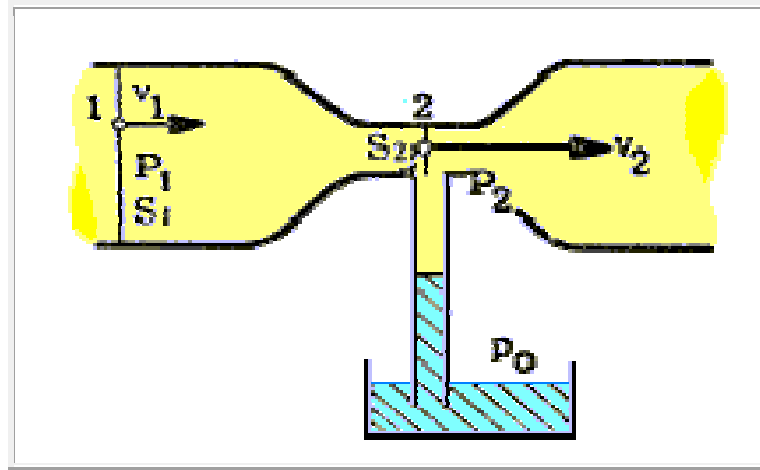


Figura 5 – Bomba a jato d'água

(Fonte: **Autor, 2015**)

Assumindo-se que  $P_2$  seja menor que a pressão barométrica  $P_0$ , a tendência é que o líquido seja impulsionado para cima, mesmo sendo  $P_1$  maior que  $P_0$ .

Pode-se, também, colocar a secção transversal  $S_2$  em comunicação com um recipiente, no qual se deseja obter o vácuo. O conteúdo fluido desse recipiente escoar, então, para o trecho onde reina a pequena pressão  $P_2$ , até que a pressão, no interior do recipiente considerado, se iguale a  $P_2$ .

De acordo com Bernoulli, a equação (7) será:

$$P_2 = P_1 - \rho \left( (V_2)^2 - (V_1)^2 \right) \quad \text{e} \quad V_2 = V_1 \left( S_1 / S_2 \right) \quad (7)$$

$$P_2 = P_1 - \rho \left( \left( S_1^2 / S_2^2 \right) - 1 \right) \cdot (V_1)^2 \quad (7.1)$$

Sendo  $(S_1 / S_2) > 1$ , teremos  $P_2 < P_1$

Com o aumento de  $V_1$ , poder-se-ia conseguir que  $P_2$  e, portanto, também a pressão no recipiente, se anulasse ou mesmo se tornasse negativa (sucção,  $P_2 < P_0$ ). Devido à vaporização da água, nunca se chega, entretanto, a uma pressão inferior à que corresponde à tensão de vapor d'água à temperatura ambiente.



A 20 °C essa tensão vale 17,5 mmHg. Fonte: (Delmée,2003)

Para obter-se um vácuo ainda melhor usa-se a bomba a jato de vapor de mercúrio ou a bomba de vapor de óleo, que operam segundo o mesmo princípio da bomba a jato d'água porém com vapor de mercúrio ou óleo como fluidos.

Como estes possuem tensões de vapor menores que a da água ( $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  mmHg), obtém-se, com essas bombas, um vácuo efetivamente melhor.

### 2.7.2 — Tubo de Pitot

O tubo de Pitot aplica-se para as medidas da velocidade, por exemplo, de aviões, a figura 6 ilustra o dispositivo.

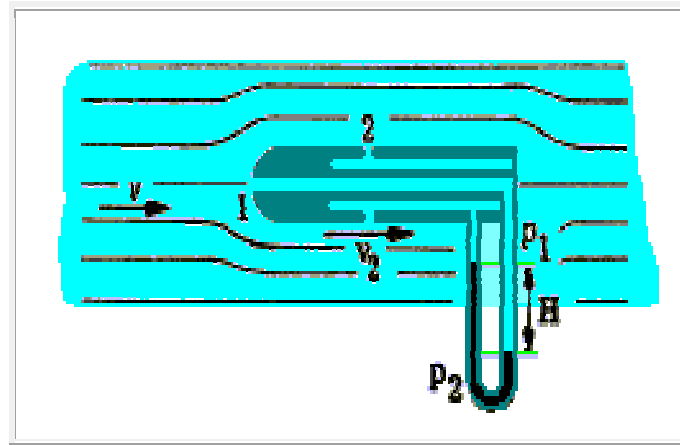


Figura 6 – Tubo de Pitot  
(Fonte: Autor, 2015)

No ponto 1 reina a velocidade  $V = 0$  (ponto em que é barrado o fluido). A este ponto corresponde uma pressão  $p = P_1$ .

No ponto 2 reina a velocidade  $V_2$ , que é aproximadamente igual à velocidade do líquido (ou ar) no espaço exterior. A esta velocidade corresponde a pressão  $p = P_2$ .

A equação (8.1) será, segundo Bernoulli:

$$P_1 = P_2 + (\rho g \text{ás}/2)V_2^2 \text{ ou } V_2 = \text{raiz}^2((2(P_1 - P_2)/\rho g \text{ás})) \quad (8.1)$$

A medida da velocidade pode, portanto, ser reduzida à medida de uma pressão. A diferença de pressão ( $P_1 - P_2$ ) é medida no dispositivo manométrico, por meio da diferença de altura  $H$  das colunas líquidas.

Designando-se por  $\rho_{\text{gás}}$  a densidade do gás em movimento e por  $\rho_{\text{líq}}$  a densidade do líquido manométrico, a equação final (8) será:

$$V_2 = \text{raiz}^2((2.g.H(\rho_{\text{líq}} / \rho_{\text{gás}}))) \quad (8)$$

### 2.7.3 Escoamento sob a influência de uma sobrepressão

Considerando o pistão hidráulico, representado na figura 7 abaixo, dele poderemos deduzir a equação (9):

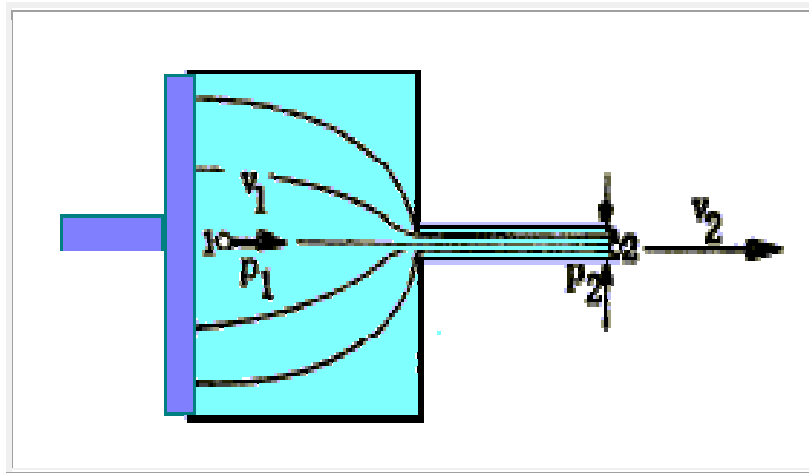


Figura 7 – Pistão hidráulico.

(Fonte: **Autor, 2015**)

$$P_1 + (\rho/2)V_1^2 = P_2 + (\rho/2)V_2^2 \quad (9)$$

Se a abertura do orifício for pequena, em relação à seção do conduto, então, deduzindo-se da equação da continuidade,  $V_1$  será pequena, de maneira que poderemos em primeira aproximação considerá-la nula.

Decorre, então, em (9.1) que a velocidade de saída será:

$$V_2 = \text{raiz}^2((2(P_1 - P_2))/\rho_{\text{líquido}}) \quad (9.1)$$

É intrínseco, neste resultado, que a velocidade  $V_2$  é diretamente proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão e inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade absoluta do líquido.

#### 2.7.4 Escoamento sob a influência da gravidade

Analisando a figura 8 abaixo e considerando que:

Para o ponto 1 vale:  $z = z_1$ ;  $v = v_1$ ;  $p = p_1 = p_0 =$  pressão barométrica.  
 Para o ponto 2 vale:  $z = z_2 = z_1 - h$ ;  $v = v_2$ ;  $p = p_2 = p_0 =$  pressão barométrica.

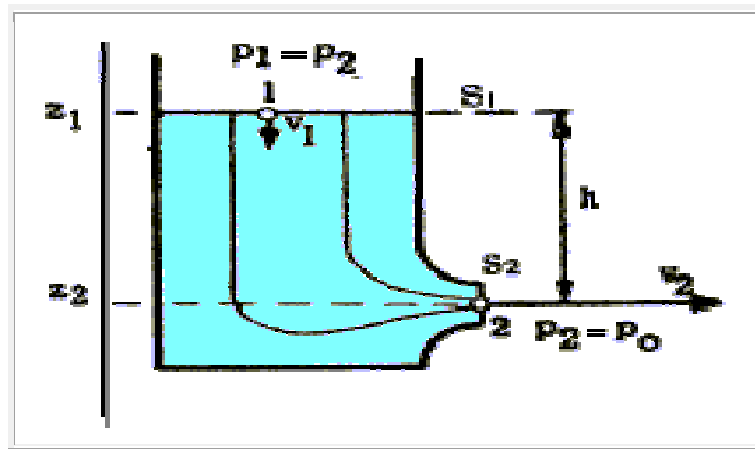


Figura 8 – Escoamento sob gravidade

(Fonte: **Autor, 2015**)

Segundo a equação da continuidade (2) será:  $V_1 / V_2 = S_2 / S_1$  (2)

Porém, se  $S_1$  é muito maior que  $S_2$ , podemos considerar nula  $V_1$ , sendo então  $P_1$  igual a  $P_2$ .

A equação de Bernoulli reduz-se agora a equação (10) :

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (Z_1 - Z_2)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (10)$$

O líquido terá neste escoamento, a mesma velocidade que atingiria em queda livre a partir da altura  $h$  (Princípio da Conservação da Energia).

### 2.7.5 Empuxo

Para o caso de velocidades muito pequenas, a equação de Bernoulli transforma-se na equação fundamental da hidrostática.

Conforme a Figura 9 abaixo, o empuxo **E** que sofre um corpo, mergulhado num fluido de densidade **r**, é determinado pela resultante de todas as forças (de pressão) elementares.

Achando-se então, para o empuxo a expressão inicial (11) :

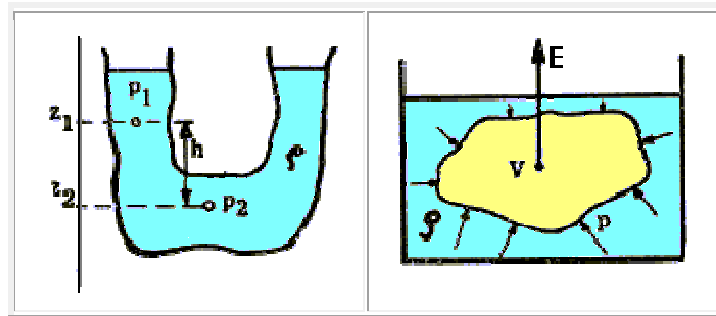


Figura 9 – Empuxo

(Fonte: **Autor, 2015**)

$$P_2 - P_1 = r \cdot g \cdot (Z_1 - Z_2) = r \cdot g \cdot h \quad (11)$$

Conclue-se, que o empuxo **E** que sofre um corpo, mergulhado num fluido de densidade **r**, é obtido como a resultante de todas as forças (de pressão) elementares. Acha-se, pois, para o empuxo a expressão (12) :

$$E = r \cdot g \cdot \text{volume líquido deslocado} \quad (12)$$

Onde, o volume líquido deslocado representa o volume do fluido deslocado pelo corpo. O ponto de aplicação do empuxo é o centro de gravidade do volume anteriormente ocupado pelo fluido deslocado, e não o centro de gravidade do corpo mergulhado.

Somente para corpos homogêneos coincidem esses dois pontos.

O empuxo **E** pode ser utilizado para a avaliação cômoda da densidade **r** de gases, líquidos e sólidos.

## 2.8 VISCOSIDADE:

A viscosidade é a medida da resistência que um fluido apresenta ao escoamento. É fácil verificar que o mel, por exemplo, ao ser derramado de um recipiente flui de forma muito mais lenta que a água nas mesmas condições. Fonte: (**SOUZA, 2015**)

A força causada pela viscosidade é obtida pela fórmula (13):

$$F = nA(dv/dx) \quad (13)$$

Onde: **n** = Coeficiente de viscosidade dinâmica.

**A** = Área da seção de escoamento.

**v** = Direção perpendicular a A

**x** = Direção perpendicular a v

No SI a unidade de viscosidade ( $\mu$ ) é dada em Pascal por segundo Pa/s .

Apesar de normatizada, essa unidade é pouco utilizada, sendo, na maioria dos casos substituída pelo Poise (p) termo criado em homenagem ao fisiologista francês Jean Louis Poiseuille (1799 ~1869) .

Dez (10) poise equivalem a 01 Pa/s

## 2.9 NÚMERO DE REYNOLDS:

O escoamento de um fluido em camadas ou veias planas numa tubulação, sem mistura de partículas entre as camadas ou veias fluidas e em velocidade constante, denomina-se escoamento laminar.

Se o escoamento ocorre de forma que as partículas se desloquem de forma desordenada, passando de uma camada para outra, com oscilações de pressão e velocidades temos o chamado escoamento turbulento.

A passagem de um escoamento, do regime laminar para o regime turbulento ocorre a uma velocidade chamada de crítica e era um dos problemas mais sérios no estudo da Mecânica dos fluidos.

Em 1883 Osborne Reynolds (1842~1912) concluiu que, se para determinada velocidade de escoamento, e determinada forma geométrica de um corpo que se move em um fluido viscoso, a relação entre as forças de inércia e de viscosidade é pequena ter-se-á um escoamento laminar, entretanto, se a relação entre as forças sobe a determinados valores o escoamento passa a ser turbulento.

Na transição entre esses extremos existe uma zona chamada de transição com alternância entre os regimes laminar e turbulento.

Essa unidade é chamada de número crítico de Reynolds e é expressa pela fórmula (14):

$$\mathbf{RDu} = \rho \mathbf{v}'' \mathbf{L} / \mu \quad (14)$$

Onde:

**RDu** = Número de Reynolds.

**$\rho$**  = Densidade do fluido (SI)

**$\mathbf{v}''$**  = Velocidade relativa entre o corpo e o fluido.

**L** = Dimensão linear do corpo.

**$\mu$**  = Coeficiente de viscosidade dinâmica.

Para valor de **RDu** até 2000 o regime de escoamento é laminar

Para **RDu** no intervalo entre 2000 e 4000 considera-se regime de transição.

Para **RDu** acima de 4000 o regime de escoamento é turbulento.

Devido o coeficiente de viscosidade cinemática  $\nu'' = \mu / \rho$  a fórmula sofre alteração passando a ser usado como em (14.1):

$$\mathbf{RDu} = \mu \mathbf{L} / \nu \quad (14.1)$$

Para condutos circulares fechados, a fórmula para cálculo do número de Reynolds passa a ser (14.2):

$$\mathbf{RDu} = (\mathbf{vD}) / \mathbf{v}'' \quad (14.2)$$

Onde: **V** = Velocidade do Fluido (m/s)

**D** = Diâmetro do conduto (m)

**$\mathbf{v}''$**  = Viscosidade Cinemática (m<sup>2</sup>/s)

## 2.10 PERDA DE CARGA:

### 2.10.1 PERDA DE CARGA CONTINUA:

O interior de uma tubulação, examinada a olho nu, pode apresentar-se lisa e uniforme, entretanto, uma vista a nível molecular, revela uma superfície rugosa, cheia de irregularidades e asperezas. A interação entre esta característica com o índice de viscosidade do fluido, a velocidade do escoamento, a área da seção transversal e o número de singularidades instalada nesta tubulação, origina um fenômeno físico chamado de perda de carga ou  $\Delta p$ .

Ou seja, o atrito entre o fluido e a superfície interna da tubulação transforma parte da energia cinética usada na transferência em energia térmica.

A perda de energia cinética limitada pelos fatores citados, é denominada de perda de carga continua ou seja é a perda energética constante e inerente ao trecho de tubulação considerado.

Um bom projeto deve, por questões energéticas e, conseqüentemente de custos financeiros e ambientais, levar em conta os fatores anteriormente citados, tentando obter a menor perda de carga continua no dimensionamento de um sistema de escoamento.

### 2.10.2 SINGULARIDADES:

Uma tubulação em um sistema hidráulico, apresenta medidas lineares e contínuas denominadas de trechos retos.

Compreende-se como trecho reto aquele trecho contínuo, limitado entre dois acidentes na tubulação (entre válvulas, entre curvas, entre válvula e curva etc.).

Os acidentes (válvulas, reduções, curvas, joelhos etc.) causam significativa perda de carga durante um escoamento e, são denominados coletivamente de singularidades.

Dados experimentais possibilitaram a criação de tabelas que mostram a perda de carga em metros equivalente a cada singularidade. Ao projetar-se um sistema hidráulico, deve-se enumerar as singularidades instaladas, calcular sua equivalência em metros de trecho reto que somados aos trechos retos reais da tubulação dará o comprimento equivalente da tubulação permitindo assim, o cálculo da perda de carga total no sistema.

A perda de carga total em uma tubulação pode ser calculada aplicando-se a equação de Darcy (15) onde:

$$\Delta p = f.(L/D).(V^2/2g) \quad (15)$$

Sendo  $\Delta p$  = Perda de pressão (m)

$L$  = Comprimento equivalente da tubulação (m). = (trechos retos + comprimentos equivalentes às singularidades)

$D$  = Diâmetro interno da tubulação (m).













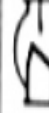



$V$  = Velocidade do fluido (m).

$G$  = Aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$f$  = Fator de fricção (adimensional)

**2.10.3** Tabela de comprimento equivalente de válvulas e conexões para tubos de aço. Fonte: (Azevedo Netto,1998)

(TUBULAÇÕES DE FERRO FUNDIDO E DE AÇO)  
Comprimentos equivalentes em metros lineares de tubulação

DIÂMETRO NOMINAL		JOELHO 90°	JOELHO 45°	CURVA 90°	CURVA 45°	TÊ 90° PASSAGEM DIRETA	TÊ 90° SAÍDA DE LADO	TÊ 90° SAÍDA BILATERAL	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	SAÍDA DE CANALIZ	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	VALV. RETENÇÃO		REGISTRO GLOBO ABERTO	REGISTRO GAVETA ABERTO	REGISTRO ÂNGULO ABERTO
DN	(Ref)																
mm	(-)																
15	(1/2)	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	6,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20	(3/4)	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25	(1)	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
32	(1 1/4)	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,6	0,6	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40	(1 1/2)	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50	(2)	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60	(2 1/2)	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75	(3)	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
100	(4)	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125	(5)	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
150	(6)	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9





## **CAPITULO 3 - CONCLUSÃO**

### **3 A MEDIÇÃO DE VAZÃO COM PLACA DE ORIFÍCIO**

#### **3.1 CONCEITOS:**

Como já afirmado em 2.10.1 as paredes internas de um conduto fechado, se analisadas com ampliação da visão mostram-se irregulares, com saliências e reentrâncias microscópicas que são em conjunto, definidas como rugosidade do conduto e que oferecem resistência adicional ao escoamento devido às forças de cisalhamento.

Em consequência, perde-se energia no transporte, convertida em calor pelo atrito.

A energia dissipada não é mais recuperada transformando-se em perda de carga permanente do sistema.

Para o cálculo de placas de orifício, devem ser tomadas precauções de forma a garantir que, na região da placa, os fatores antes relacionados sejam conhecidos e, através dos cálculos, tenham seus valores controlados de maneira a causarem a menor perda de carga permanente possível no sistema.

##### **3.1.1 TRECHO RETO:**

Como regra geral, os acidentes ou singularidades devem ser instalados em distâncias adequadas da placa de orifício de forma que as perturbações por eles impostas ao fluido, não alterem os perfis de pressão e velocidade antes e depois da placa.

Usualmente adotam-se trechos retos de 5 a 10 diâmetros a montante e até 5 diâmetros a jusante da placa.

##### **3.1.2 DETALHES CONSTRUTIVOS:**

As placas de orifício clássicas são concêntricas, de parede fina e aresta viva, fabricadas a partir de chapas de aço inoxidável ou material compatível com o fluido medido.

Suas dimensões são padronizadas em normas nacionais e internacionais.

A norma brasileira é a NBR ISO 5167. As normas internacionais mais utilizadas são a ISO 5167 e a AGA 3.

As placas de orifício clássicas cobertas pelas normas ISO 5167 e a AGA 3 devem ser fabricadas e instaladas em acordo com determinadas especificações mínimas a saber:

- a) Face a montante (planicidade) : A face a montante deverá ser plana e será assim considerada quando o interstício entre uma régua de comprimento D (igual ao diâmetro interno da linha) aposta sobre a face montante desta placa e a referida face da placa for inferior a 0,005.
- b) Rugosidade da face a montante : A rugosidade da face a montante da placa de orifício deverá ser inferior a  $10^{-4}d$  (d= diâmetro do orifício) sendo delimitada em um círculo concêntrico ao orifício com diâmetro não inferior a D= diâmetro interno da linha.
- c) Identificação da face a montante : Deverá ser identificada a face a montante de forma a que seja possível identificação com a placa instalada na linha.
- d) A identificação será gravada na lingüeta da placa.
- e) Face a jusante: a face a jusante deverá ser paralela à face a montante Não se exige o mesmo acabamento de superfície como para a face a montante. A planicidade e o estado da superfície demandam uma simples inspeção visual.
- f) Espessura da parte cilíndrica: conforme explicado nas páginas 14 e 15 sobre a equação da continuidade, o orifício d terá a forma geométrica de um cilindro com comprimento (no caso a espessura) compreendido entre D/200 e D/50. Se, por questões necessárias de robustez da placa a sua espessura for maior que os limites mencionado, deverá receber um chanfro a 45°.
- g) Espessura da placa: a espessura da placa deve ser inferior a D/200 e igual ou superior a espessura ou comprimento da parte cilíndrica para tubos com diâmetros nominais superiores a 3 pol. Para tubulações de 2 pol. ou menores a espessura poderá ser de 3 mm.
- h) Ângulo do chanfro: Quando a espessura de placa for superior à espessura do orifício, a placa será chanfrada a jusante conforme já citado anteriormente. Cuidado especial deverá ser tomado na usinagem. O ângulo do chanfro deverá ser de 45° +/- 1,5°. A placa não poderá ser chanfrada se sua espessura for inferior a 0,02 D.

- i) Arestas: As arestas dos orifícios não deverão apresentar defeitos visíveis a vista desarmada. A aresta a montante do orifício deverá ser “viva”.
- j) Materiais de fabricação: A placa pode ser fabricada com qualquer material ou método de construção desde que obedecidos os parâmetros já citados. No geral, a placa será fabricada em metal com boas características de resistência química e mecânica. Os aços inox 304 e 316 são normalmente os mais empregados.

A figura 10 abaixo, representa um modelo básico de placa:

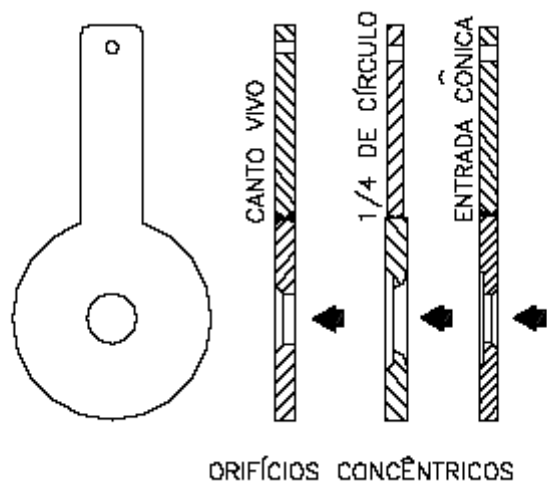


Figura 10 – Placa de orifício concêntrica

(Fonte: **BRINGER, 2015**)

### 3.1.3 RELAÇÃO BETA (d/D)

A experiência de longos anos de uso de medidores com placa de orifício associada com os chamados fatores experimentais possibilitaram a determinação de um parâmetro de grande importância para o dimensionamento da placa.

Segundo a norma ISO-5167 a relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno da linha deve situar-se entre 0,2 e 0,75.

Estes valores são limites e válidos, dentro dos quais se conseguem estabelecer parâmetros funcionais para a medição, entretanto, os cálculos,

considerando conhecido o diâmetro interno da linha (D), devem ser orientados para obtenção de valores de BETA o mais próximo possível de 0,75 o que minimiza a perda de carga inerente como resultante da obtenção de valores maiores de d (diâmetro do orifício) evidenciado na relação  $d = \text{BETA} \times D$ .

A medição de vazão com placa de orifício é baseada na redução intencional da seção transversal de um conduto fechado.

A figura 11 abaixo ilustra o conceito apresentado:

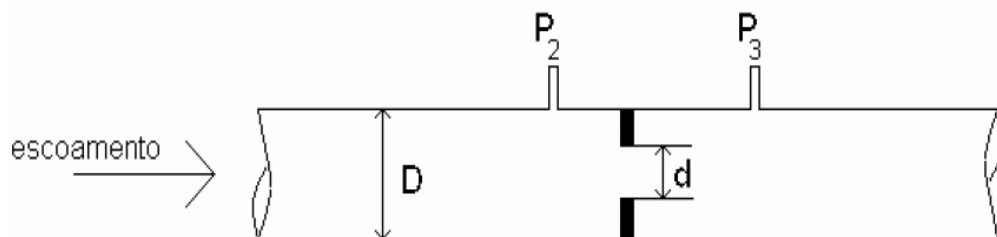


Figura 11 – Placa de orifício

(Fonte: **Autor, 2015**)

Onde :

D = Diâmetro interno do conduto.

P<sub>2</sub> = Pressão antes da placa de orifício.

d = Diâmetro do orifício (calculado)

P<sub>3</sub> = Pressão após a placa de orifício.

Pela equação da continuidade, podemos afirmar que a vazão (**Q**) ao longo de determinado trecho de tubulação fechada é a mesma variando-se a velocidade (**V**) em função das singularidades determinantes de variações da área da seção transversal (**S**) desta tubulação.

A equação de Bernoulli porém, estabelece relações entre a velocidade do fluido (**V**), a pressão do fluido (**P**), a massa específica do fluido (**p**), a gravidade (**g**), e a altura (**h**) entre dois pontos de um filete líquido onde o diâmetro varia. Fonte: (**BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007**)

Assim, a equação de Bernoulli (16) estabelece que:

$$(V_1/2g)(P_1/p) + h_1 = (V_2/2g)(P_2/p) + h_2 \quad (16)$$

Onde:

**V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>** = Velocidade do fluido ( m/s)

**g** = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

**P<sub>1</sub>** = Pressão da seção 1 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**P<sub>2</sub>** = Pressão da seção 2 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**ρ** = Massa específica do fluido (kgf/m<sup>3</sup>)

**h<sub>1</sub>** = Altura da seção 1 em relação ao trecho reto horizontal (m).

**h<sub>2</sub>** = Altura da seção 2 em relação ao trecho reto horizontal (m).

Considerando-se um trecho reto de tubulação os valores **h<sub>1</sub>** e **h<sub>2</sub>** se igualam o que dá uma nova dedução (16.1) para a equação (16) anterior :

$$((V_1/2g).(P_1/\rho)) = ((V_2/2g).(P_2/\rho)) \quad (16.1)$$

Onde:

**V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>** = Velocidade do fluido ( m/s)

**g** = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

**P<sub>1</sub>**= Pressão da seção 1 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**P<sub>2</sub>** = Pressão da seção 2 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**ρ** = Massa específica do fluido (kgf/m<sup>3</sup>)

De acordo a **Delmée, 2003**, para o cálculo de geradores de depressão, a equação (16.1) anterior, considera a igualdade das energias totais ao assumir a redução do escoamento a uma seção de filete infinitesimal, o que demanda sua adaptação levando em conta as condições reais em um escoamento.

Neste caso, para avaliar a velocidade relativa ao trecho jusante do elemento deprimogênio, medem-se os valores **P<sub>1</sub>** e **P<sub>2</sub>** e , tendo-se a massa específica **ρ** do fluido e o valor de **g**, ambos de tabela, pode-se reduzir a equação de Bernoulli (16.1) aos termos da equação (17) abaixo:

$$((V_2^2-V_1^2)/2g) = ((P_1-P_2)/\rho) \quad (17)$$

Considerando-se pela equação da continuidade (2) que:

$$V_1S_1 = V_2S_2 \rightarrow V_2 = V_1(S_1/S_2) \quad (2)$$

Temos, substituindo em (2) que:

$$V_1^2 \left( \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right) = \left( \frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho} \right) \quad (2.1)$$

Sendo a relação  $\beta$  (BETA) determinada conforme a equação (18) abaixo:

$$\beta^2 = S_2/S_1 \quad (18)$$

E ainda convencionando-se por (17.1) que:

$$E = 1 / (\text{raiz}^2(1 - \beta^4)) \quad (17.1)$$

Deduz-se em (17.2) que :

$$V_1 = \left[ \frac{2g(P_1 - P_2)}{\left( \left( \frac{\rho}{\beta^4} \right) - 1 \right)^{1/2}} \right] \quad (17.2)$$

Ou ainda (17.3) :

$$V_1 = E \beta^2 (\text{raiz}^2 2g) \cdot (1 / (\text{raiz}^2 \rho)) \cdot (\text{raiz}^2 (P_1 - P_2)) \quad (17.3)$$

A equação (17.3) considera uma distribuição uniforme das velocidades ( $V_1 = V_2$ ) o que a afasta de um escoamento real, ensejando assim a inclusão de um coeficiente de correção chamado de  $C$  = Coeficiente de descarga instituído após anos de estudos experimentais de pesquisadores e estudiosos onde a vazão real foi definida como aquela necessária para ocupar determinado volume ou peso definido de um líquido, temos então a expressão enunciada em (18) :

$$C = \text{Vazão real} / \text{Vazão teórica} \quad (18)$$

Sendo:

$$C = \text{Coeficiente de descarga}$$

O que pode ser resumido em (18.1)

$$Q \text{ real} = C \cdot \text{Vazão teórica} \quad (18.1)$$

Ainda conforme **Delmée** 2003, para unidades de massa, a equa o (18.1) pode ser reescrita conforme a equa o (19):

$$Q = CE \beta^2 \cdot S_1 (\text{raiz}^2 (2 ((P_1 - P_2) / \rho))) \quad (19)$$

Onde:

**Q** = Vazão ( m<sup>3</sup>/s)

**C** = Coeficiente de descarga (m/s<sup>2</sup>)

**E** = 1/ raiz<sup>2</sup>(1-  $\beta^4$ )

**$\beta$**  = Rela o entre as se es 2 e 1 (m)

**S<sub>1</sub>** = área da se o transversal.

**P<sub>1</sub>** = Pressão da se o 1 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**P<sub>2</sub>** = Pressão da se o 2 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**$\rho$**  = Massa espec ica do fluido (kgf/m<sup>3</sup>)

Substituindo-se **S<sub>1</sub>** por  $\pi D^2/4$  na equa o (19) e fazendo  $\pi((\text{raiz}^2(2))/4) = 1,110720$  obtemos a equa o real final (20):

$$Q = ((1,1107 \cdot CE \beta^2) \cdot ((D^2(\text{raiz}^2 2)) \cdot ((P_1 - P_2) / \rho))) \quad (20)$$

### 3.2 DIMENSIONAMENTO DE PLACA DE ORIFÍCIO CONCÊNTRICA COM TOMADAS NOS FLANGES:

Uma das formas mais eficientes de calculo   o de determinar-se, primeiro um valor ótimo de  $\beta$  (BETA ) e por ele, determinar o diâmetro do orifício:

Dados de Processo:

**Fluido:**  leo mineral.

**Q<sub>m</sub>** = Vazão máxima ( 0,025 m<sup>3</sup>/s)

**$\Delta p$**  = Pressão diferencial (2500 Pa@ 15 C)

**Q<sub>n</sub>** = Vazão normal ( 0,0175 m<sup>3</sup>/s)

**D** = Diâmetro da linha (0,01023 m)

**T<sub>1</sub>** = Temperatura de opera o (288 K)

**T<sub>1</sub>** = Temperatura de projeto (328 K)

**$\rho_1$**  = Massa espec ica do fluido a T<sub>1</sub> (835 kgf/m<sup>3</sup>)



$\rho_2$  = Massa específica do fluido a T2 (817 kgf/m<sup>3</sup>)  
 $F_a$  = Fator de dilatação térmica (1,001)  
 $\mu_p$  = Viscosidade absoluta a T2 ( 3 cp)  
 $d$  = Diâmetro do orifício (mm) ?

1º passo ) Aplicar a equação (19) determinando-se o coeficiente de descarga:

$$CE \beta^2 = (0,025 \cdot 835) / (1,1107 \cdot 0,010465 \cdot 1,001 \cdot (\text{raiz}^2(25000 \cdot 817)))$$

$$CE \beta^2 = 0,39698$$

2º passo) Cálculo do número de Reynolds aplicando-se a equação (14.2):

$$RDu = (353.400 \cdot Q_n(\text{m}^3/\text{h}) \cdot \partial L) / (D(\text{mm}) \cdot \mu_p(\text{cp})) \quad (14.2)$$

$$\text{Sendo } \mu_p = \rho_1 / 999,08 \rightarrow \mu_p = 835/999,08 = 0,836$$

Logo:

$$RDu = (353400 \cdot 63 \cdot 0,836) / (102,3 \cdot 3) \rightarrow RDu = 60,6 \cdot 10^3$$

3º passo) Para  $D=102,3$  mm (+/- 4,026") os seguintes valores de  $CE \beta^2$  e  $A_f$  são encontrados em tabela (Delmée,2003):

$\beta$	$CE \beta^2$	$A_f$
0,74	0,392692	1368,22
0,75	0,407930	1437,53

4º passo) Interpolar  $\beta$  e  $A_f$  com  $CE \beta^2$  calculado-se valores iniciais:

$$\beta = (((0,3970 - 0,392692) / (0,407930 - 0,392692)) \cdot 0,01) + 0,74$$

$$\beta = 0,74283$$

$$\mathbf{Af = ((1437,53-1368,22).0,283) + 1368,22}$$

$$\mathbf{Af = 1387,83}$$

5º passo) Refinando o calculo de CE  $\beta^2$  para uma melhor precisão:

$$\mathbf{CE \beta^2 = CE \beta^2 / (1 + (Af / RDu) \rightarrow (0,3970 / (1 + (1387,83/(60,6.10^3))))}$$

$$\mathbf{CE \beta^2 = 0,3881}$$

6º passo) Interpolar entre  $\beta=0,73$  e  $\beta=0,73$  calculamos em (21) o valor final de  $\beta$ :

$$\mathbf{\beta = (((0,3881-0,378253)/(0,392692-0,378253)).0,01)+0,73} \quad (21)$$

$$\mathbf{\beta = 0,73682}$$

7º passo) Obtendo então na equação (22) o diâmetro do orifício :

$$\mathbf{d= D. \beta = 102,3 . 0,73682 = 75,38 \text{ mm}} \quad (22)$$

**3.2.1** Os dados de processo e os obtidos em cálculo deverão ser transcritos compondo uma folha de dados de instrumentação conforme o anexo 1, folhas 1 e 2 ao final da monografia.

### 3.3 - DIMENSIONAMENTO DE PLACA DE ORIFÍCIO CONCÊNTRICA COM TOMADAS NOS FLANGES UTILIZANDO-SE SOFTWARE DE ENGENHARIA:

**3.3.1** Dimensionar um elemento deprimogênio (Placa de orifício) para medição de vazão nas seguintes condições:

Fluido: Água de incêndio

Vazão: 550 m<sup>3</sup>/h

Diâmetro da linha: 8" pol. sch. 20 ( 206,375 mm diâmetro interno)

Pressão de operação: 11 kgf/cm<sup>2</sup>

Temperatura de operação: 30 °C.

Densidade do fluido: 1,0 kg/m<sup>3</sup>.

Viscosidade do fluido: 0,820 cP.

Pressão diferencial na placa: 10.000 mm H<sub>2</sub>O

Software utilizado: Flowcalc 32 CE da Emerson Process Management

Norma : **(ISO-5167)**

No primeiro passo o software é rodado com os dados de operação desejados levando a obtenção da memória de cálculo mostrada no Anexo 2 da monografia.

**3.3.2** Os dados de processo e os obtidos em cálculo deverão ser transcritos compondo uma folha de dados de instrumentação conforme o anexo 3, folhas 1 e 2 ao final da monografia.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi dar a partida de um processo para preenchimento de uma lacuna existente no campo de engenharia de instrumentação e controle. Afirmamos dar partida pois sei, que este trabalho não é finito e conclusivo, a idéia de produzi-lo deu-se na maior parte, pela identificação da inexistência de uma publicação desta natureza a qual não encontrei como estudante e nem no início de carreira como projetista em engenharia de instrumentação e controle.

Atualmente, via de regra, todos os trabalhos de dimensionamento de elementos deprimogênios para medição de vazão são executados através de softwares, onde o usuário introduz os dados de processo e o sistema efetua os cálculos e dimensionamento, mesmo assim, dúvidas surgem quando o software teima em não aceitar as condições impostas para cálculo e na maioria das vezes ficamos sem saber como proceder.

Tendo vivenciado diversas dificuldades ao longo de nossa carreira profissional, procuramos, nessa produção, elenca-las, entendendo porém que se trata de algo pioneiro ao que pedimos a compreensão do leitor para esta característica, pois não conseguimos com certeza, esgotar o assunto visto que apresenta a nossa única experiência.

Conjugando a finalidade e as limitações de uma monografia e o nosso entendimento do que tornar-se-ia produtivo em termos de informação a divulgar, conduzimos este trabalho de forma pontual, escolhida dentro de um universo de aplicações tecnológicas disponíveis para a medição de vazão pelo princípio estudado.

A intenção é que esta publicação, possa ser utilizada primeiro, para o fácil e correto entendimento da tecnologia abordada, e em segunda finalidade, sirva de base para o aprendizado de tecnologias similares.

As informações são apresentadas de forma progressiva, entendemos ter atingido o objetivo proposto ao fornecer a base para a compreensão de todos os outros sistemas similares e nortear a realização de pesquisas que melhorem esta publicação além de, como afirmado no início, dar partida para novas abordagens com outros tipos de elementos deprimogênios.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 5167- **Medição de vazão de fluídos por dispositivo de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular - Parte 1: Princípios e requisitos gerais**; Jan, 2008.

AMERICAN GAS ASSOCIATION – AGA – AGA REPORT nº 3; Part 2; **Orifice metering of natural gás and other related hidrocarbon fluids – Part 2: specification and instalation requirements** , 4 ed, Abril 2000.

AZEVEDO NETTO, J.M. de ; ALVAREZ, G.A. ; **Manual de hidráulica**, 7 ed, São Paulo, editora Edgard Blucher Ltda; 1998.

BALBINOT, A;BRUSAMARELLO; V.J; **Instrumentação e fundamentos de medidas**;v.2;Rio de Janeiro:LTC,2007.ISBN 978-85-216-1563-7

BRINGER, **Catálogo sobre hidrometria.pdf**; Disponível em < [http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/catálogos/hidrometria\\_Bringer.pdf](http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/catálogos/hidrometria_Bringer.pdf) > acesso em 25.08.2015.

CASSIOLATO, C: ALVES.E.O ; **Medição de vazão**. [S.1], p.1-13,2008. Disponível em < [http://www.profibus.org.br/files/artigos/Artigo\\_vazao\\_CI\\_2008.pdf](http://www.profibus.org.br/files/artigos/Artigo_vazao_CI_2008.pdf) > acesso em 25.09.2015.

DELMÉE, GÉRALD J. – **Manual de medição de vazão**; 3ª edição; 2003; Editora Edgard Blucher.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDZATION – ISO – ISO 5167-1: **Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1 : General principles and requirements**, Switzerland, 2003 40 p.

SOUZA, Líria Alves De. "**Líquidos**"; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/quimica/liquidos.htm>>. Acesso em 09 de outubro de 2015.

WEBCALC, **conversoes/vazao**; Disponível em <<http://www.webcalc.com.br/frame.asp?pag=http://www.webcalc.com.br/conversoes/vazao.html>> Acesso em 30.09.2015.

## IV – ANEXOS

## Anexo 1- Folha de dados cálculo manual (folha 1 de 2)

LOGO		FOLHA DE DADOS				Nº FD-SENAI-001			
		CLIENTE: SENAI-CIMATEC						FOLHA 1 de 2	
		PROGRAMA: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO							
		ÁREA: AUTOMAÇÃO				Nº DO ANQ. ELETRÔNICO: FD-SENAI-001.xls			
		TÍTULO: PLACA DE ORIFÍCIO							
EPC:			Nº VORAK: FD-SENAI-001			CONTRATO Nº: XXX			
PROJETISTA:			RESPONSÁVEL TÉCNICO: PAULO OLIVEIRA			CREA Nº: XXXXX			
ÍNDICE DE REVISÕES									
REV.	DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS								
0	EMISSÃO ORIGINAL - PARA COMPRA								
	REV. 0	REV. 1	REV. 2	REV. 3	REV. 4	REV. 5	REV. 6	REV. 7	REV. 8
DATA	09/06/14								
PROJETO	PRO								
EXECUÇÃO	PRO								
VERIFICAÇÃO	SNE								
APROVAÇÃO	SNE								
AS INFORMAÇÕES DESTE DOCUMENTO SÃO PROPRIEDADE DO AUTOR, SENDO PROIBIDA A UTILIZAÇÃO FORA DA SUA FINALIDADE.									

## Anexo 1- Folha de dados cálculo manual (folha 2 de 2)

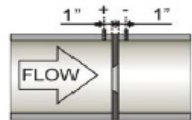

LOGO		FOLHA DE DADOS		Nº	FD-SENAI-001		REV.	0		
		PROGRAMA:				TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		FOLHA	2 de 2	
		TÍTULO:								
<b>PLACA DE ORIFICIO</b>										
GERAL	1	IDENTIFICAÇÃO		FE-001						
	2	SERVIÇO/		ÓLEO MINERAL						
	3	FLUXOGRAMA		03-PR-FE-011						
	4	LINHA / EQUIPAMENTO		4"-OM-A2CL150CSA-298						
	5	DIAMETRO INTERNO DA LINHA (D)		102,3 mm						
	6	SCHEDULE		40						
	7	NORMA DE DIMENSIONAMENTO		ASME MFC-3M (1989)/ISO-5167(1991)						
	8									
	9									
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	10	FLUIDO		ÓLEO MINERAL						
	11	ESTADO FISICO		LIQUIDO						
	12	VAZÃO MÁXIMA	VAZÃO MÍNIMA	0,025	0,0043					
	13	VAZÃO NORMAL		0,0175						
	14	PRESSÃO OPERAÇÃO		5000						
	15	TEMPERATURA OPERAÇÃO		288						
	16	DENSIDADE		835						
	17	VISCOSIDADE @ TEMP. OPERAÇÃO		3						
	18									
	19									
PLACA DE ORIFICIO	21	TIPO		CONCENTRICA						
	22	DELTA Δ DE CALCULO		2500						
	23	VAZÃO DE CALCULO		0,0175						
	24	RELAÇÃO d/D (BETA) @ 20°C		0,736						
	25	DIAMETRO DO ORIFICIO (BORE) (d)		75,38 mm						
	26	MATERIAL		AISI 316						
	27	ESPESSURA		1/8" de POL.						
	28	DRENO OU RESPIRO		NÃO						
	29	ANEL, SUPORTE		NÃO						
	30	FABRICANTE		-						
	31									
FLANGES	34	TIPO		RF						
	35	MATERIAL		ASTM A185 GrB						
	36	CLASSE DE PRESSÃO		150#						
	37	DIAMETRO DAS TOMADAS		1/2" NPTF						
	38	LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS		NO FLANGE						
	39	ACCESSÓRIOS		NA						
	40	PARAFUSOS E PORCAS		NA						
	41	JUNTAS		NA						
42										
43										
44										
45										
46										
47										
48										
49										
50										
51										
52										

NOTAS: PRESSÃO = Pa - TEMPERATURA = °K - VAZÃO = m³/s - VISCOSIDADE = cp - DENSIDADE = kg/m³

1. INSTALAR FE COM TRECHOS RETOS MÍNIMOS DE 10 D (MONTANTE) e 5 D (JUSANTE)
2. PARAFUSOS E PORCAS PELA TUBULAÇÃO.



## Anexo 2- Memória de cálculo informatizado

<b>Orifice plate with flange tapping</b>				
Calculated for liquid				
<b>Orifice data</b>				
Orifice material:	316ss			
Exp. coeff. orifice:	1,700E-5			
Bore diameter	mm	142,257		
Pipe diameter	mm	206,375	8	SHED. 20
Pipe material:	CarbSt			
Exp. coeff. pipe:	1,300E-5			
<b>Process data</b>				
Media:	AGUA INCÊNDIO			
Temperature.:	°C	30,00		
Inlet pressure:	kp/cm2(a)	12,000		
Flow:	m3/h	550,000		
Density:	kg/m3	1000,000		
Differential pressur	mmH2O	10000,000		
Viscosity:	cP	8,200E-1		
<b>Calculation result:</b>				
Reynolds number:	1,149E6			
Beta:	0,689			
Alfa:	0,686			
Accuracy better then:	0,69%			
Pressure loss	mmH2O	5082,527		
<b>Minimum straight length in mm</b>				
Additional uncerainty in %:	Inlet	Inlet	Outlet	Outlet
Object	0%	0.5%	0%	0.5%
Single 90 degrees bend or tee	5778,50	2889,25	1444,63	722,31
Two or more 90 degrees bends in the same plane	7429,50	3714,75	1444,63	722,31
Two 90 degrees bends in different planes	12795,25	6397,63	1444,63	722,31
Reducer 2:1	2889,25	1444,63	1444,63	722,31
Expander 1:2	6191,25	3095,63	1444,63	722,31
Globe valve fully open	6604,00	3302,00	1444,63	722,31
Gate valve fully open	4127,50	2063,75	1444,63	722,31
Thermometer pocket or well < :6,19 mm	1031,88	619,13		
Thermometer pocket or well < :26,80 mm	4127,50	2063,75		
Vessel	6191,25	3095,63		
Notes				
FlowCalc32 for Windows ver 4.02 No:10000		ISO 5167-1:1991		
		<b>TEMPLATE</b>		
		Created: PAULO OLIVEIRA	Calculated:12/12/2008	
		Print:91212/2008 11:30:56	Idnr: FE-54230001	

## Anexo 3- Folha de dados cálculo automatizado (folha 1 de 2)

		<b>FOLHA DE DADOS</b>			Nº <b>FD-XXXX.XX-XXXX-XXX-XXX-XXX</b>				
		CLIENTE: <b>XX-XXXX/XXX-XX</b>				FOLHA: <b>1</b> de <b>2</b>			
		PROGRAMA: AMPLIAÇÃO DA INJEÇÃO DE ÁGUA NO CAMPO DE PRODUÇÃO							
		ÁREA: <b>ESTAÇÃO COLETORA I</b>							
<b>XX-XXXX / XXXX/XXXX</b>		TÍTULO: <b>PLACA DE ORIFÍCIO - COMBATE A INCÊNDIO</b>							
<b>PROESP</b> Projetos Ltda.		ARQUIVO ELETRÔNICO: FD-XXXX.XX-XXXX-XXX-XXX-XXX=#1.doc			RESP. TÉCNICO: THIAGO MADEIROS				
		Nº DO CONTRATO:			Nº DO CREA: 49345-Ba		RÚBRICA:		
<b>ÍNDICE DE REVISÕES</b>									
<b>REV.</b>	<b>DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS</b>								
#1	PARA COMENTÁRIOS.								
	REV. #1	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H
DATA	10/12/08								
PROJETO	APJ								
EXECUÇÃO	PAULO								
VERIFICAÇÃO	VINICIUS								
APROVAÇÃO	THIAGO								

## Anexo 3- Folha de dados cálculo automatizado (folha 2 de 2)

		FOLHA DE DADOS		Nº:	FD-XXX.XX-XXXX-XXX-XXX-XXX	REV.	#1
		ESTAÇÃO COLETORA I				FOLHA:	2 de 2
		TÍTULO: PLACA DE ORIFÍCIO - COMBATE A INCÊNDIO					
1	IDENTIFICAÇÃO	FE-54230001					
2	SERVIÇO	RECIRCULAÇÃO LINHA TESTE					
GERAL	3	FLUXOGRAMA	XX-XXX.XX-XXXX-XXX-XXX-XXX				
	4	LINHA No	8"-SFW-A4-607				
	5	DIÂMETRO INTERNO DA LINHA	206,375 mm				
	6	SCHEDULE	20				
	7	NORMA DE DIMENSIONAMENTO	ISO-5167				
	8						
	9	TIPO	CONCÊNTRICA				
	10	DIFER. PRESSÃO DE CÁLCULO	10000 mmH2O				
PLACA	11	VAZÃO DE CÁLCULO	550				
	12	RELAÇÃO d / D ( BETA ) A 20°C	0,689				
	13	RAIO DO QUADRANTE	-				
	14	DIÂMETRO DO ORIFÍCIO	142,257 mm				
	15	CRITÉRIO DE CÁLCULO	ROUNDED BORE				
	16	MATERIAL	AISI 316L				
	17	ESPESSURA DA PLACA	1/4"				
	18	DRENO OU RESPIRO	NÃO				
	19	ANEL , SUPORTE - MATERIAL	NÃO				
	20						
FLANGES	21	TIPO	PESCOÇO				
	22	MATERIAL	ASTM A 105				
	23	CLASSE DE PRESSÃO E FACES	300# RF				
	24	DIÂMETRO DAS TOMADAS	1/2" NPTF				
	25	LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS	NOS FLANGES				
	26	ACESSÓRIOS	-				
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	27	FLUIDO	ÁGUA INCÊNDIO				
	28	ESTADO FÍSICO	LÍQUIDO				
	29	VAZÃO MÁXIMA	MINIMA	534	50		
	30	VAZÃO OPERAÇÃO	170				
	31	PRESSÃO OPER.	PRESSÃO PROJ.	11	14		
	32	TEMP. OPERAÇÃO	TEMP. PROJETO	30	50		
	33	DENSIDADE TEMP OPER.	1,0				
	34	MASSA ESPEC. TEMP/PRESS. OPER.	-				
	35	VISCOSIDADE COND. OPERAÇÃO	0,82				
	36	PESO MOLECULAR	-				
	37	% QUALID. VAPOR	-	-	-		
	38	FATOR DE COMPRESSIBILIDADE	1,0				
	39	FATOR K= Cp / Cv	-				
40	ΔP MÁXIMO ADMISSÍVEL	-					
41	NOTAS APLICÁVEIS	1 a 6					
42	UNIDADES	PRESSÃO = kgf/cm <sup>2</sup> - TEMPERATURA = °C - VAZÃO = m <sup>3</sup> /h - VISCOSIDADE = cP					
43	NOTAS	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. DEVERÃO VIR GRAVADAS NA ORELHA DA PLACA AS INFORMAÇÕES BÁSICAS COMO TAG, BETA, DIÂMETRO DO ORIFÍCIO, ETC.</li> <li>2. ACABAMENTO DE FACE DOS FLANGES RANHURADO CONCÊNTRICO OU EXCÊNTRICO CONFORME MSS SP-6.</li> <li>3. FLANGE, PARAFUSOS, PORCAS E JUNTAS SERÁ PELA TUBULAÇÃO, CONFORME SPEC DA LINHA.</li> <li>4. O FABRICANTE DEVERÁ CONFIRMAR OS CÁLCULOS.</li> <li>5. FORNECER CERTIFICADO DE INSPEÇÃO EM CONFORMIDADE COM AGA 03 2000.</li> </ol>					