CAPÍTULO III

BOCAIS OU TUBOS ADICIONAIS

3.1 – Generalidades

Bocais, tubos curtos ou tubos adicionais são os tubos de pequeno comprimento adaptados a orifícios em paredes finas, ou os orifícios em paredes espessas, que se comportam como aqueles.

As leis do escoamento são as mesmas dos orifícios, refletindo-se o efeito da forma, disposição e dimensões do bocal nos valores dos respectivos coeficientes e na perda de carga.

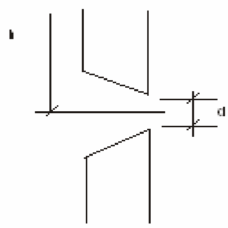
Os bocais são utilizados para dirigir o jato.

Comprimentos:
- Bocais: $1,5\ D \leq L < 3,0\ D$
- Tubos Curtos: $3,0 \leq L < 500\ D$
- Tubulações Curtas: $500D \leq L < 4000D$
- Tubulações Longas: $L > 4000D$

Classificação:
- Cilíndricos
  - Interiores ou reentrates
  - Exteriores
- Cônicos
  - Convergentes
  - Divergentes

3.2 – Bocal Ajustado

É um bocal cuja forma se adapta a do jato que sai de um orifício em parede delgada, sendo praticamente nula a contração que nele ocorre, $C_C \cong 1,0$.



$$0,96 \leq C_V = C_d \leq 0,98$$

A perda de carga é muito pequena, sendo por isso conveniente utilizar essa forma de bocal nas saídas de reservatórios.

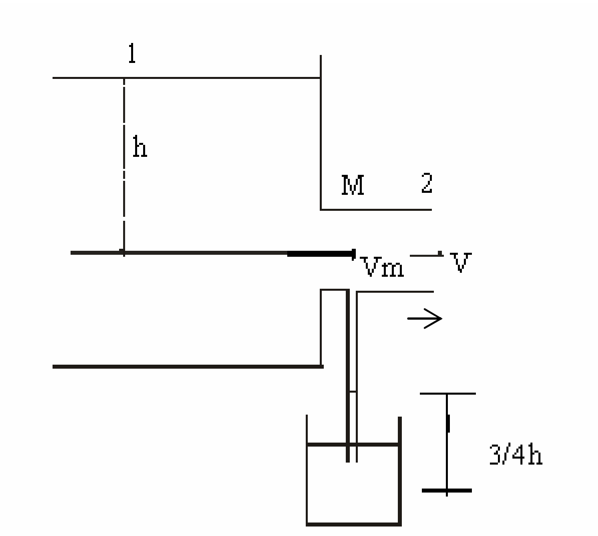
3.3 – Bocal Cilíndrico Externo

É um tubo cilíndrico que se projeta para fora da parede, ou um orifício numa parede espessa.

→ Bocal padrão é o bocal cujo comprimento iguala-se a 2,5 vezes o seu diâmetro.

Quando a altura d'água é grande em relação ao comprimento do bocal, o jato é idêntico ao do orifício; no bocal propriamente dito, porém, há contração da veia liquida como nos orifícios, seguindo-se uma expansão do jato que na seção de saída enche completamente o bocal.

O coeficiente de contração do bocal é igual a unidade, mas o coeficiente de velocidade é muito menor que o dos orifícios, devido a perda que ocorre na expansão da veia, onde há um grande turbilhonamento.



No bocal padrão os coeficientes são:

$C_C = 1{,}0$; $C_V = C_d = 0{,}82$

A descarga do bocal é bastante maior que a do orifício de igual diâmetro, sob a mesma carga.

$$\frac{Qbocal}{QOrif.} = \frac{C_d a \cancel{\sqrt{2gh}}}{\cancel{C_d a \sqrt{2gh}}} = \frac{0{,}82}{0{,}62} = 1{,}33$$

Sendo o coeficiente de velocidade igual ao de descarga pode ser determinado como este, medindo o volume d'água escoado num determinado tempo e comparando com o valor teórico.

A perda de carga é quase que exclusivamente a causada pela expansão do jato no interior do bocal.

Bernoulli entre ① e ②

$$z_1 + \frac{P_1}{\wp} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\wp} + \frac{V_2^2}{2g} + hp \qquad \text{mas } hp = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} + \frac{1}{9}\frac{V^2}{2g}$$

$$h = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{(Vm - V_2)^2}{2g} + \frac{1}{9}\frac{V_2^2}{2g} \qquad z_1 = h;\ P_1 = P_2 = P_{ATM}$$

$$h = \frac{V^2}{2g} + \frac{(Vm - V)^2}{2g} + \frac{1}{9}\frac{V^2}{2g} \therefore h = \frac{10}{9}\frac{V^2}{2g} + \frac{(Vm - V)^2}{2g}$$

$$h = \frac{10}{9}\frac{V^2}{2g} + \frac{(V_m - V)^2}{2g}$$

① → superfíce livre ② → saída do jato

$$mas \quad : Q = aV = a_m V_m$$

$$\frac{V_m}{V} = \frac{a}{a_m}$$

$$a_m = C_C\, a \therefore a_m = 0,62\ a$$

$$\frac{V_m}{V} = \frac{a}{0,62\ a} \therefore V_m = \frac{V}{0,62} = 1,6129\ V$$

$$h = \frac{10}{9}\frac{V^2}{2g} + \frac{(1,6129\ V)^2 - 3,2258\ V^2 + V^2}{2g}$$

$$h = \frac{1,1111\ V^2 + 2,6015\ V^2 - 3,2258\ V^2 + V^2}{2g}$$

$$2gh = 1,4868\ V^2$$

$$V^2 = \frac{1}{1,4868} 2gh = 0,6726\ (2gh)$$

$$V = 0,8201 \sqrt{2gh}$$

O motivo pelo qual a descarga do tubo padrão é maior que a do orifício, apesar das maiores perdas, é que a pressão na seção de entrada é menor que a pressão atmosférica.

$$h + \frac{Pa}{\wp} + 0 = 0 + \frac{Pm}{\wp} + \frac{Vm^2}{2g}$$ ⟶ Bernoulli entre 1 e M

$$Q = a_m v_m = av$$
$$a_m = 0{,}62\, a$$
$$0{,}62\, aV_m = a(0{,}8201\sqrt{2gh}$$
$$h + \frac{Pa}{\wp} = \frac{Pm}{\wp} + \frac{1{,}7495\ (2gh)}{2g}$$
$$V_m = 1{,}3227\sqrt{2gh}$$
$$h + \frac{Pa}{\wp} = \frac{P_m}{\wp} + 0{,}7495 \quad \therefore \quad \frac{P_m}{\wp} = \frac{Pa}{\wp} - 0{,}7495\, h$$

Venturi observou que a pressão em m é menor que a atmosférica em 3/4h

Pa ⟶ Pressão atmosférica

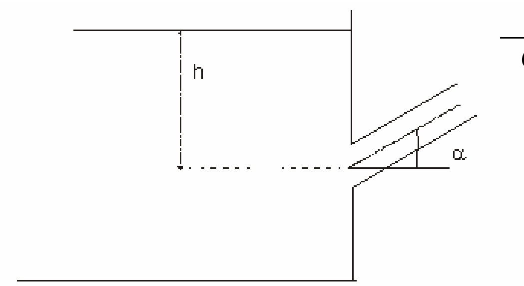
O coeficiente de descarga dos bocais externos depende da relação entre comprimento e o diâmetro, sendo máximo para 2d < L < 3d. Segundo o Prof. LÜCIO DOS SANTOS, são os seguintes os valores do coeficiente de descarga:

l =	<d	d	2d	3d	12d	24d	36d	48d	60d	100d
c =	0,62	0,62	0,82	0,82	0,76	0,73	0,68	0,63	0,60	0,50

A perda de carga no bocal é:

$$h = \frac{v^2}{2g} + hp \quad \therefore \quad hp = h - \frac{v^2}{2g}$$
$$mas \quad \overline{\overline{v}} = C_v\sqrt{2gh}$$
$$h_p = h - \frac{C_V^2\, 2gh}{2g} \quad \therefore \quad hp = h\left(1 - C_V^2\right)$$
$$ou \quad \overline{\overline{v}}^2 = C_V^2\, 2gh \quad \therefore \quad h = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{C_V}$$
$$hp = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{C_V^2} - \frac{v^2}{2g}$$
$$hp = \frac{v^2}{2g}\left(\frac{1}{C_V^2} - 1\right)$$

Quando o bocal não é normal ao plano do orifício, e está dirigido para cima, os valores dos coeficientes de descarga são diferentes e estão tabelados, em função do angulo α . Segundo WEEISBACH:



α	10º	*20º*	30º	40º	50º	60º
C_d=	0,799	0,782	0,764	0,747	0,731	0,719

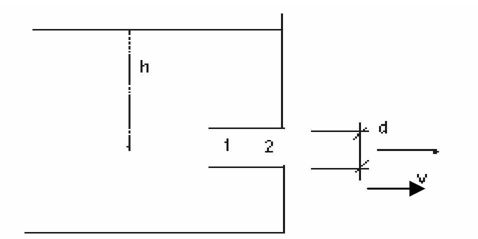
3.4 – <u>Bocal Cilíndrico Reentrante</u>

É um tubo cilíndrico que se projeta para o interior da parede.

Se o comprimento do bocal é de 0,5d a 1,0 d, o jato sofre contração na entrada do bocal, maior que a observada nos orifícios, e não toca nas paredes internas do mesmo. Os coeficientes tem a seguinte ordem de grandeza:

$$C_V = 0{,}98 \quad ; \quad C_C = 0{,}52 \quad ; \quad C_d = 0{,}50 \text{ a } 0{,}51$$

Seja um reservatório de grandes dimensões, velocidade de aproximação desprezível, dotado de um bocal cilíndrico reentrante $0{,}5d \leq L \leq 1{,}0d$. (*O coeficiente de velocidade é determinado como nos orifícios, $C_V = 0{,}98$).*



Aplicando o teorema da quantidade de movimento entre as seções obtém-se:

$$\mathbf{Ft = m\ v}$$

$$P_1 = \wp\, h$$

$$P = \frac{F}{a} \quad \therefore \quad F = Pa \quad \therefore \quad F = \wp\, ah$$

Massa específica $: \rho = \dfrac{M}{vol} \quad Kg^{*}s^{2}/m^{4}$

$$M = \rho .vol \qquad \text{mas} \qquad \wp = \rho g$$

$$M = \frac{\wp}{g} vol$$

$$\wp\, ah.t = \left(\frac{\wp}{g} vol \right) v$$

Considerando o tempo de um segundo:

$$\wp\, ah = \frac{\wp}{g} Qv$$

$$mas \quad Q = C_C av \quad e \quad v = C_V \sqrt{2\, gh}$$

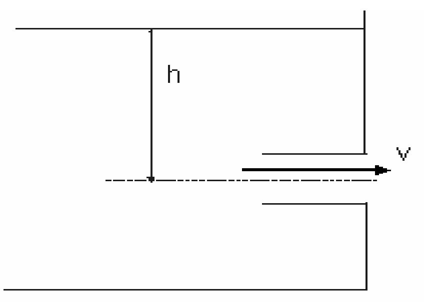
$$\wp\, ah = \frac{\wp}{g} C_C av.v \;\therefore\; \wp\, ah = \frac{\wp}{g} C_C av^{2}$$

$$\cancel{\wp}\, \cancel{ah} = \frac{\wp}{\cancel{g}} C_V^{2} C_C \cancel{g} 2\, g\cancel{h} \;\therefore\; 1 = 2 C_C C_V^{2}$$

Quando se considera a velocidade real do jato, isto é, $v = C_V\sqrt{2gh}$ sendo $C_V = 0{,}98$, temos:

$$\mathbf{C_C = 0{,}52}$$

⟶ Se o comprimento do bocal é mais que 2d o jato sofre contração e, logo após, expansão enchendo-o totalmente, na seção de saída $C_C = 1{,}0$



Aplicando quantidade de movimento

$$Ft = mv$$

$$\wp ah.t = \frac{\wp}{g} Qv \quad \text{mas} \quad Q = av$$

$$v = C_V \sqrt{2gh}$$

$$\wp ah.t = \frac{\wp}{g} av^{2}$$

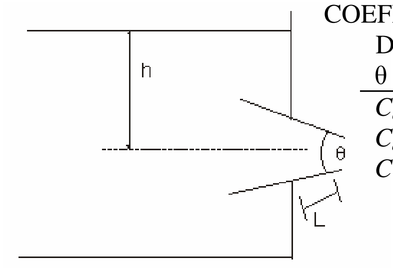
$$h = \frac{1}{g} Cv^{2} 2gh \;\therefore\; Cv^{2} = \frac{1}{2} \;\therefore Cv = 0{,}707$$

Logo: $C_v = C_d = 0{,}707$

3.5 – Bocal Cônico Convergente

Quando a entrada do bocal tem bordas agudas há pequena contração do jato, seguida de expansão; na saída, o jato sofre uma pequena contração, que pode ser reduzida adaptando-se a forma do bocal à jato do jato, para guiar os filetes líquidos.

Os coeficientes variam segundo o ângulo de convergência (θ) e o comprimento do bocal. São bastante próximos da unidade.



COEFICIENTES PARA BOCAIS CONVERGENTES, COM ENTRADA DE BORDOS AGUDOS.

θ = 0º	5º	10º	15º	20º	25º	30º	40º	50º
$C_c = 0,82$	0,911	0,947	0,965	0,971	0,972	0,976	0,981	0,984
$C_a = 1,00$	0,999	0,992	0,972	0,952	0,935	0,918	0,888	0,859
$C = 0,82$	0,91	0,939	0,938	0,924	0,911	0,896	0,871	0,845

Coef. F (θ ; L)

Denomina-se rendimento do jato (N) a relação entre a sua energia cinética e a energia teórica.

$$N = \frac{Ec}{Ep}$$

$$\text{Ec} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{\wp Q}{g} v^2 \quad ; \quad Ep = peso\ .h = \wp Qh$$

$$N = \frac{\frac{1}{2} \frac{\wp Q}{g} v^2}{\wp Qh} = \frac{\frac{v^2}{2g}}{h}$$

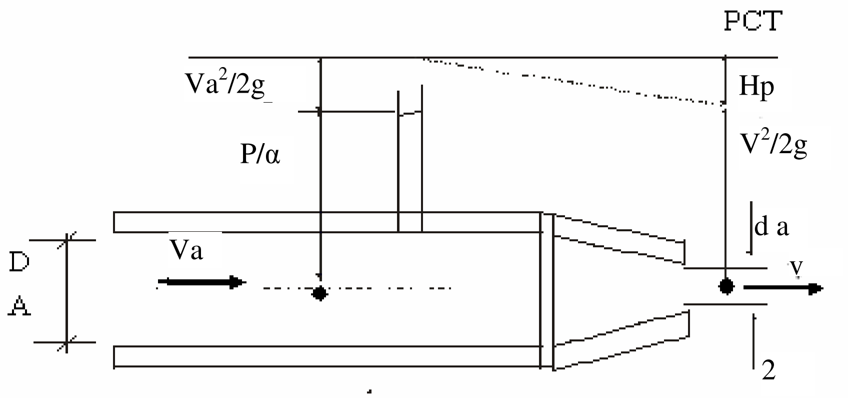
mas $\quad v = C_V \sqrt{2gh}$

$$N = \frac{\frac{C_V^2 \, 2gh}{2g}}{h} = \frac{Cv^2 \, 2gh}{2gh} = C_V^2$$

$$N = C_V^2$$

Os esguichos das mangueiras de incêndio e os bocais das turbinas Pelton são bocais cônicos convergentes, adaptados as extremidades de mangueiras ou tubulações.

As fórmulas a aplicar são as já indicadas, substituindo a altura h pelo valor de ($P/\wp + V^2/2g$) correspondentes à entrada do bocal; em geral pode-se considerar desprezível o efeito da velocidade V na tubulação ou mangueira, bastando considerar a altura $P/\wp$ da pressão na entrada.



$$z_1 + \frac{P_1}{\wp} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\wp} + \frac{V_2^2}{2g} + hp$$

$$hp = h\left(1 - C_V^2\right) = \frac{V^2}{2g}\left(\frac{1}{C_V^2} - 1\right)$$

$$0 + \frac{P_1}{\wp} + \frac{V_a^2}{2g} = 0 + 0 + \frac{V^2}{2g} + \left(\frac{1}{C_V^2} - 1\right)\frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{P_1}{\wp} + \frac{V_a^2}{2g} = \frac{1}{C_V^2} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$V^2 = 2gC_V^2\left(\frac{P_1}{\wp} + \frac{V_a^2}{2g}\right)$$

$$V = C_V\sqrt{2g\left(\frac{P_1}{\wp} + \frac{V_a^2}{2g}\right)}$$

mas $Q = AV_a = C_c aV$

$$V_a = C_c V \frac{a}{A}$$

$$V = C_v \sqrt{2g\left(\frac{P_1}{\wp} + Cc^2 v^2 \frac{a^2}{2gA^2}\right)}$$

$$V^2 = Cv^2 \left[2g\left(\frac{P_1}{\wp} + Cc^2 v^2 \frac{a^2}{2gA^2}\right)\right]$$

$$V^2 = 2gCv^2 \frac{P_1}{\wp} + C_v^2 v^2 \frac{a^2}{A^2}$$

$$V^2\left(1 - C_d^2 \frac{a^2}{A^2}\right) = 2gCv^2 \frac{P_1}{\wp}$$

$$V^2 = \frac{1}{\left(1 - C_d^2 \frac{a^2}{A^2}\right)} 2gCv^2 \frac{P_1}{\wp}$$

$$V = \frac{Cv}{\sqrt{1 - C_d^2 \frac{a^2}{A^2}}} \sqrt{2g\frac{P_1}{\wp}}$$

Nota-se que quando (d / D) ≤ ¼ podemos desprezar a velocidade de aproximação da água, por que:

$$\sqrt{1 - C_d^2 \frac{a^2}{A^2}} = \sqrt{1 - 0{,}82^2\left(\frac{\pi d^2/4}{\pi 16 d^2/4}\right)^2} = \sqrt{1\text{-}0{,}6724(0{,}0039)} = \sqrt{0{,}9974}$$

$$\therefore \sqrt{1 - C_d^2 \frac{a^2}{A^2}} = \sqrt{0{,}9974} \cong \sqrt{1}$$

$$Q = \frac{C_d a}{\sqrt{1 - C_d^2 \frac{a^2}{A^2}}} \sqrt{2g\frac{P_1}{\wp}} \rightarrow \mathrm{Q} = C_d a \sqrt{2g\frac{P_1}{\wp}}$$

Como nos serviços de bombeiros são muito usadas as unidades inglesas, indica-se a expressão correntemente usada:

$$Q = 29 \text{ ou } 30\, d^2 \sqrt{P}$$

Onde:

Q ⟶ galões / minuto

d ⟶ polegadas

P ⟶ libras / polegadas quadrada (1 lb / pol $^2 \equiv$ 0,07 Kg/cm^2)

O alcance do jato pode ser calculado pelas fórmulas usuais da mecânica (resistência do ar e espalhamento do jato) ou pela fórmula da Escola Politécnica de São Paulo:

$$h = 2P - \frac{P^2}{100} \qquad h \rightarrow \text{em pés}$$

$$P \rightarrow \text{lb / pol}^2$$

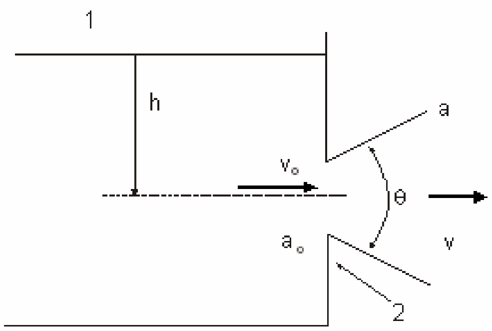
A seguinte tabela dá o alcance efetivo dos jatos, para ângulo de inclinação de 32º para o alcance horizontal, e 60º para o vertical, aos quais correspondem os máximos alcances em condições normais:

Pressão		Alcance horizontal (metros)				Alcance vertical (metros)			
Kg/cm^3	Ib/pol^3	Diâmetro do requinte				Diâmetro do requinte			
		1” 25mm	1 1/8” 29mm	1 ¼” 32mm	1 ½” 38mm	1” 25mm	1 1/8” 29mm	1 ¼” 32mm	1 ½” 38mm
1,4	20	11	12	12	13	11	11	11	11
2,1	30	14	15	16	17	15	16	16	17
2,8	40	17	18	19	20	19	20	20	21
3,5	50	18	20	21	23	22	23	23	24
4,2	60	20	22	23	24	24	25	25	26
4,9	70	22	23	24	26	26	27	27	28
5,6	80	23	25	26	27	27	28	29	29
6,3	90	24	26	27	28	28	29	30	30

**Pressão medida pelo tubo de Pilot na saída do jato*

Para reduzir o efeito da contração do jato, procura-se diminuí-la adaptando-se a forma da agulheta à do jato, ou acrescentando-lhe uma peça de extremidade chamada REQUINTE, para dar forma ao jato.

3.6 – <u>Bocal Cônico Divergente</u>



Se a entrada tem bordas agudas, há uma pequena contração do jato, que logo depois se expande, enchendo completamente o bocal que, na saída, funciona a plena seção.

Os coeficientes de velocidade e vazão variam com o ângulo e o comprimento do bocal.

Para $\theta = 5^{\circ}\,5'$ e $L = 9d$ os coeficientes de velocidade e vazão são máximos, e a descarga é cerca de 1,4 vezes a do orifício em parede delgada, com diâmetro igual ao da entrada do bocal. Se este tem bordas arredondadas, o coeficiente pode chegar a 2,0.

A maior descarga do bocal é causada pela sucção que se dá na entrada, em virtude da depressão que aí existe ($P_o < P_{atm}$), e ocorre quando a pressão $P_o/\wp$ atinge o zero absoluto.

$$Q = C_d a\sqrt{2gh}$$

Bernoulli entre 1 e 2

$$h + \frac{P_a}{\wp} + 0 = 0 + \frac{P_0}{\wp} + \frac{V_0^2}{2g}$$

$$Q = av = a_0 V_0$$

$$V_0 = \frac{a}{a_o} v$$

$$h + \frac{P_a}{\wp} = \frac{P_0}{\wp} + \frac{a^2}{a_0^2}\frac{V^2}{2g}$$

Máxima seção de saída: (vazão máxima $\Rightarrow P_0/\wp = 0$)

$$h + \frac{P_a}{\wp} = 0 + 0 + \frac{a^2}{a_0^2}\frac{V^2}{2g}$$

$$V = \sqrt{2gh}$$

$$V^2 = 2gh$$

$$h + \frac{P_a}{\wp} = \frac{a^2}{a_0^2}\frac{2gh}{2g}$$

$$a^2 = \left(h + \frac{P_a}{\wp}\right)\frac{a^2{}_0}{h} \qquad a_{máx} = a_0\sqrt{1 + \frac{P_a/\wp}{h}}$$

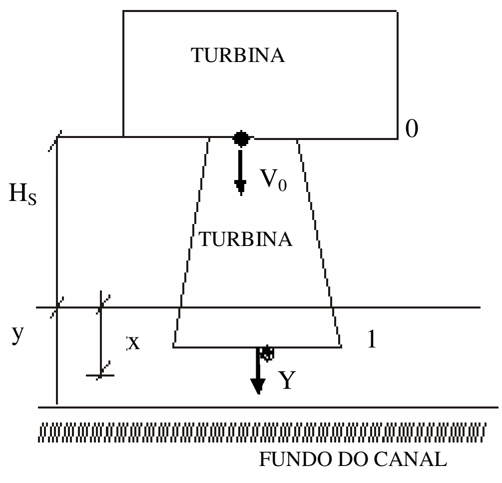
Máxima descarga

$$Q = a_{máx}\sqrt{2gh} \quad \therefore \quad Q = a_0\sqrt{1 + \frac{P_a/\wp}{h}} \; x \; \sqrt{2gh}$$

$$Q = a_0\sqrt{2g\left(h + \frac{P_a}{\wp}\right)}$$

Uma das mais importantes aplicações dos bocais divergentes se encontra no tubo de sucção ou difusor das turbinas Francis ou Kaplan.

Bernoulli entre 0 e 1 com PR no fundo



$$(y + h_S) + \frac{P_0}{\wp} + \frac{V_0^2}{2g} = (y - x) + \frac{P_1}{\wp} + \frac{V^2}{2g} + h_P$$

$$P_1/\wp = x$$

$$\frac{P_0}{\wp} = y - x + x - y - hs + \frac{V^2}{2g} - \frac{V_0^2}{2g} + h_P$$

$$\frac{P_0}{\wp} = \frac{V^2 - V_0^2}{2g} + h_P - h_S$$

3.7 – Bocais Submersos

Existem poucos dados experimentais sobre os tubos submersos, mas parece que a submergência não altera muito os coeficientes.

Os coeficientes da tabela que segue servem para tubos de seção quadrada, mas podem ser aplicados àqueles cuja seção não se afasta muito dessa forma (*L* comprimento do tubo; *p* perímetro da sua seção).

L / P	Entrada c. bordos agudos	Contração suprimida no fundo	Contração suprimida no fundo e em um lado	Contração suprimida no fundo e nos dois lados	contração completamente suprimida
0,02	061	0,63	0,68	0,77	0,95
0,10	066	0,67	0,69	0,73	0,93
0,20	074	0,73	0,74	0,73	0,92
0,30	079	0,77	0,79	0,83	0,91
0,40	080	0,79	0,80	0,84	0,90
0,60	"	0,80	0,81	0,84	0,90
0,80	"	0,80	0,81	0,85	0,90
1,00	"	0,81	0,82	0,85	0,90

3.8 – Bueiros

A perda de carga num bueiro é igual à soma das perdas da entrada e saída, mais a perda devida ao seu comprimento.

Podem ser calculados como bocais, e os bueiros submersos como tubos afogados, incluindo o efeito das perdas no coeficiente de descarga C_d.

Para os bueiros de concreto podem ser usados os seguintes coeficientes de descarga:

	L / D	0,30	0,45	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80
Entrada com bordos chanfrados	3	0,86	0,89	0,91	0,92	0,93	0,94	0,94
	6	0,79	0,84	0,87	0,80	0,91	0,92	0,93
	9	0,73	0,80	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91
	12	0,68	0,76	0,80	0,85	0,88	0,89	0,90
	15	0,65	0,73	0,77	0,83	0,86	0,88	0,89
Entrada com bordos agudos	3	0,80	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,75
	6	0,74	0,77	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74
	9	0,69	0,73	0,75	0,76	0,75	0,74	0,74
	12	0,65	0,70	0,73	0,74	0,74	0,74	0,73
	15	0,62	0,68	0,71	0,73	0,73	0,73	0,72