

Capítulo 17- Golpe de aríete em adutoras

17.1 Introdução

Golpe de aríete é o fenômeno de escoamento de um líquido em conduto forçado, em regime variado conforme NB 591/91 referente a *Projeto de adutora de água para abastecimento público*.

A NB 591/91 diz que a análise do golpe de aríete deve ser efetuada em duas etapas: **diagnóstico e dimensionamento**.

No **diagnóstico** admite-se a adutora desprovida de dispositivos de proteção para as condições normais e excepcionais. Quando são atendidas as pressões máximas toleráveis da tubulação é dispensável o dimensionamento do golpe de aríete e instalação de dispositivos de proteção.

Na etapa do **dimensionamento** do golpe de aríete devem ser estudados os diversos dispositivos de proteção e controle selecionando aqueles que garantam as condições extremas de pressão e pelo menor custo de implantação e operação do sistema.

17.2 Tubos comumente usados

Ainda segundo a NB 591/91 as pressões máximas devidas ao golpe de aríete, ocorrentes em qualquer seção da adutora devem ser iguais ou inferiores às pressões admissíveis adotadas para as tubulações, conexões, acessórios e equipamentos previstos em toda a instalação em face dos planos de cargas piezométricas de regime permanente e estáticas.

Vamos recordar segundo Heller et al, 2006 as características de alguns tubos. Por exemplo, para tubos de PVC com ponta e bolsa e DEFOFO conforme Tabela (17.1). A pressão máxima de serviço PMS inclui os transientes hidráulicos. As classes 12, 15 e 20 são classes de pressão e JEI é junta elástica integrada.

O tubo de PVC classe 12 é para o máximo de 60m de pressão, e o classe 15 para 75m e o classe 20 para 100m de pressão.

Tabela 17.1- Pressão máxima de serviço (PMS) para tubos de PVC

Tubos	DN (mm)	PMS (MPa)		
		min		max
Tubo PVC classe 12, 15 e 20 JE PBA	50	0,6		1,0
Tubo PVC classe 12, 15 e 20 JEI PBA	50 a 180	0,6		1,0
Tubo de PVC JE DEFOFO	100 a 300		1,0	
Tubo de PVC JEI DEFOFO	100 a 500		1,0	

Fonte: Heller, et al, 2006

Para tubos de ferro fundido K-7 e K-9 temos a Tabela (17.2).

Tabela 17.2- Tubos de ferro fundido K-7 e K-9 e faixa de pressões máxima de serviço PMS

Tubos	DN (mm)	PMS (MPa) 1MPa=100mca	
		min	máx
Tubo de ferro fundido K-7 c/ junta elástica	150 a 1200	2,5	6,0
Tubo de ferro fundido K-7 c/ junta travada interna	150 a 300	1,2	1,9
Tubo de ferro fundido K-9 c/ junta elástica	80 a 2000	3,1	7,7
Tubo de ferro fundido K-9c/ junta travada interna	80 a 300	1,9	3,0
Tubo de ferro fundido K-9 c/ junta travada externa	300 a 1200	1,7	4,4
Tubo de ferro fundido K-9 junta Pamlock	1400 a 1800	1,9	3,0

Fonte: Heller, et al, 2006

Ainda segundo Heller et al, 2006 para tubos de PEAD (polietileno de alta densidade) e tubos de PP (polipropileno) temos a Tabela (17.3). Para 50anos de vida útil a temperatura de 20°C MRS é *minimum required strenght* requerida. Assim para um tubo de PEAD PE 63 o MRS=6,3MPa mas com o fator de segurança igual a 1,25 teremos 5MPa.

Tabela 17.3- PEAD e PP com suas normas e MRS

Material	Norma	Classificação	MRS (MPa)	Fator de segurança	Tensão no projeto de 50anos a 20°C (MPa)
PEAD	DIN 8.075	PE 63	6,3	1,25	5
PEAD	DIN8.075	PE 80	8	1,6	5
PEAD	ISSO CD 4.427	PE 63	6,3	1,25	5
PEAD	ISSO CD 4.427	PE 80	8	1,25	6,3
PEAD	ISSO CD 4.427	P3 100	10	1,25	8
PEAD	ISSO CD 4.427	PE 80	8	4	2
PP	DIN 8.077	Homopolímero	10	2	5
PP	DIN 8.077	Copolímero	8,5	1,7	5

Fonte: Heller, et al, 2006

Recordemos a **NB 591/91** que diz que em condições normais de operação, a pressão admissível é definida pela **classe de pressão de trabalho das tubulações**, válvulas, equipamentos e acessórios. Saliente a norma da ABNT que em **condições excepcionais**, a **pressão admissível é de 1,5 vez a pressão de trabalho**.

Para tubos **RPVC** (PVC reforçado com fibra de vidro) com junta elástica a pressão de serviço está entre 0,2 a 3,2 MPa conforme Heller et al, 2006.

17.3 Golpe de aríete em adutora

Na Figura (17.1) temos um esquema de um reservatório que alimenta uma tubulação e no final há uma válvula. Se o fechamento ou abertura da válvula for rápido haverá problemas de transientes hidráulicos podendo ser danificada a tubulação.

Vamos tratar neste capítulo de golpe de aríete em um tubo singular alimentado por um reservatório, esclarecendo que estamos nos baseando nos métodos apresentados por Victor L. Streeter em dois dos seus livros: *Mecânica dos Fluidos* e *Fluid Transients*.

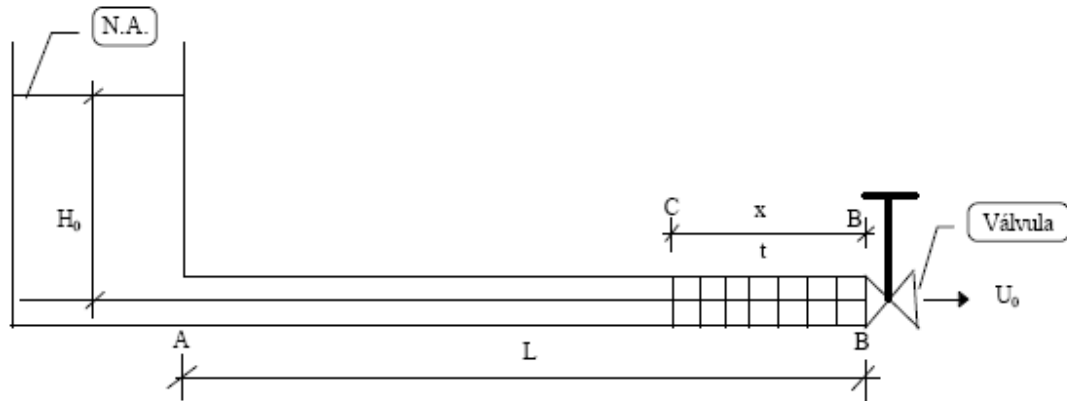


Figura 17.1- Golpe de aríete em adutora por gravidade com fechamento brusco da válvula no fim da adutora.

17.4 Fechamento e abertura de válvulas

O fechamento de uma válvula em uma tubulação singela de comprimento L e celeridade de propagação das ondas “ a ” pode ser:

- Lento
- Rápido

O fechamento é lento quando o tempo “ t_c ” que levamos para fechar uma válvula é maior que $2L/a$ e o fechamento é rápido quando o tempo é menor que $2L/a$:

Resumidamente fica:

Fechamento lento:

$$t_c > 2 \times L / a$$

Fechamento rápido

$$t_c < 2 \times L / a$$

Exemplo 17.1

Assim uma rede com $L=4800\text{m}$ e celeridade $a=1200\text{m/s}$ teremos:

$$2 \times L/a = 2 \times 4800 / 1200 = 8 \text{ s}$$

Se o fechamento for menor que 8s teremos fechamento rápido e caso seja maior que 8s o fechamento será lento.

17.5 Estimativa dos transientes hidráulicos em adutoras sem atrito

Uma maneira prática de se estimar os transientes hidráulicos numa adutora singela conforme Figura (17.2), é supor que o líquido é incompressível e não haja dilatação do tubo com as pressões e que sejam ignoradas as perdas de cargas distribuídas ao longo da linha.

Consideramos um tubo horizontal onde um fechamento instantâneo da válvula no final da rede provoca uma redução de velocidade ΔV e teremos um acréscimo de pressão ΔH conforme Tullis, 1989 ficando assim:

$$\Delta H = a \Delta V / g (1 + V_0/a)$$

Mas como sempre o valor a é bem maior que o valor de V_0 , isto é, chega a atingir valores 100 vezes maior então podemos considerar $V_0/a = 0$ e ficará:

$$\Delta H = a \Delta V / g \quad (\text{equação de Allievi})$$

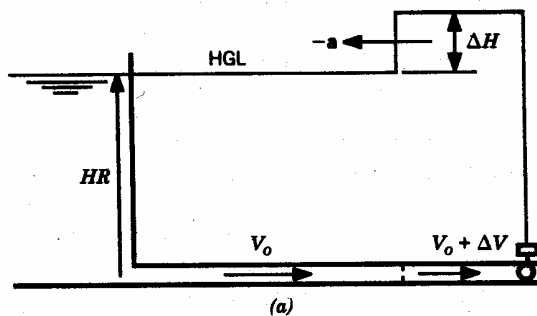


Figura 17.2 Fechamento de válvula no final da rede

Fonte: Tullis, 1989

Exemplo 17.2

Um reservatório alimenta uma adutora de aço com velocidade $V_0=2\text{m/s}$. Se a válvula for parcialmente fechada atingindo a velocidade de $1,5\text{m/s}$ com será a sobrepressão, sendo a celeridade $a=900\text{m/s}$.

$$\Delta H = a \Delta V / g$$

$$\Delta H = 900 \times (2,0 - 1,5) / 9,81 = 45,9\text{m}$$

Exemplo 17.3

Seja uma adutora singela com $D=2,0\text{m}$, $L=4800\text{m}$ $a=1200\text{m/s}$ $Q=2,71\text{m}^3/\text{s}$;

$$A = \text{PI} \times D^2/4 = 3,1416 \times 2^2/4 = 3,1416\text{m}^2$$

$$Q = A \times V_0$$

$$V_0 = Q/A = 2,71 / 3,1416 = 0,86\text{m/s}$$

$$H_{\text{max}} = a \Delta V / g$$

$$H_{\text{max}} = 1200 \times 0,86 / 9,81 = 105,2\text{m}$$

Se a pressão na ponta da rede for de 100m então somando os $105,2\text{m}$ teremos $205,2\text{m}$ pois não estamos considerando a perdas de cargas;

Nota: o cálculo exato usando o método das características levaria pressão máxima de $147,31\text{m}$ com válvula borboleta.

17.6 Equação de Michauld

A equação de Michauld só pode ser aplicada se a manobra for lenta, isto é, quando o tempo de fechamento t_c for maior que $2L/a$.

$$H_{\text{max}} = (a \times V_0 \times \mu) / (g \times t)$$

Sendo:

H_{max} = sobrepressão (m)

a = celeridade da onda (m/s)

V_0 = velocidade da água na tubulação (m/s)

$$\mu = 2 \times L / a$$

g = aceleração da gravidade = $9,81\text{m/s}^2$

t_c = tempo de fechamento da válvula (s)

Exemplo 17.4

Seja uma adutora singela com $D=2,0\text{m}$, $L=4800\text{m}$ $a=1200\text{m/s}$ $Q=2,71\text{m}^3/\text{s}$;

$$A = \text{PI} \times D^2/4 = 3,1416 \times 2^2/4 = 3,1416\text{m}^2$$

$$Q = A \times V_0$$

$$V_0 = Q/A = 2,71 / 3,1416 = 0,86\text{m/s}$$

$$\mu = 2 \times L / a = 2 \times 4800 / 1200 = 8\text{s}$$

Supomos $t_c = 30\text{s}$

$$H_{\text{max}} = (a \times V_0 \times \mu) / (g \times t)$$

$$H_{\text{max}} = (1200 \times 0,86 \times 8) / (9,81 \times 30) = 28\text{m}$$

Se a pressão na ponta da rede for de 100m então somando os 28m teremos 128m para fechamento lento com $t_c=30\text{s}$ e não estamos em levando em conta as perdas de cargas.

17.7 Curvas das válvulas

Existem vários tipos de válvulas: gaveta, esfera, globo, borboleta e outras conforme Figura (17.3) a (17.7). O fechamento das válvulas pode ser manual ou mecânico.

Conforme Pires et al,2005 a curva de fechamento da válvula, isto é, a forma como o coeficiente de descarga varia com a abertura, determina o modo como a vazão varia com a fração da abertura.

As válvulas do tipo gaveta produzem uma variação grande na vazão somente nos últimos instantes do fechamento conforme Pires et al,2005. Por outro lado, válvulas tipo esfera ou borboleta produzem uma variação mais gradual da vazão durante o curso de fechamento.

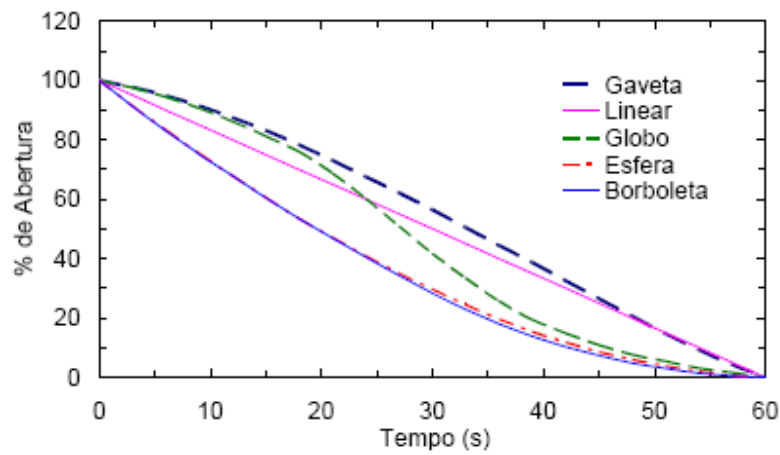


Figura 17.3- Fechamento de varias válvulas como gaveta, globo, esfera e borboleta para tempo de fechamento de 60s.

Fonte: <http://www.simdut.com.br/Trabalhos/13005.pdf>

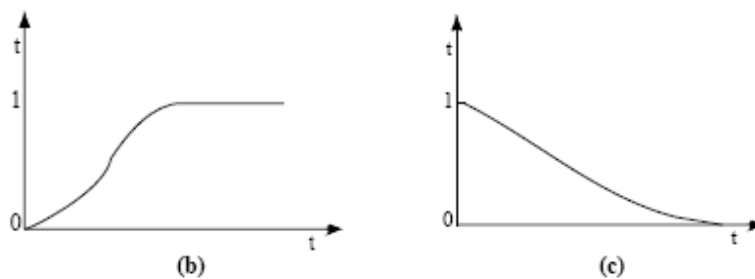


Figura 17.4- Abertura de válvula (b) e fechamento de válvula (c)

Fonte: Acunha, 2005

Para as condições iniciais:
 $Q_0 = (C_d \times A_g)_0 (2.g.H_0)^{0,5}$
Para qualquer condição:

$$Q = (C_d \times A_g) (2.g.H)^{0.5}$$
$$\tau = (C_d \times A_g) / (C_d \times A_g)_0$$

$(C_d \times A_g)_0$ = valor quando a válvula está totalmente aberta e não há transientes hidráulicos. É o início do fechamento da válvula.

C_d = coeficiente de descarga da válvula

A_g = área da secção transversal na válvula. Não iremos fazer o cálculo, pois usaremos somente a relação τ .

$(C_d \times A_g)$ = valor durante o fechamento

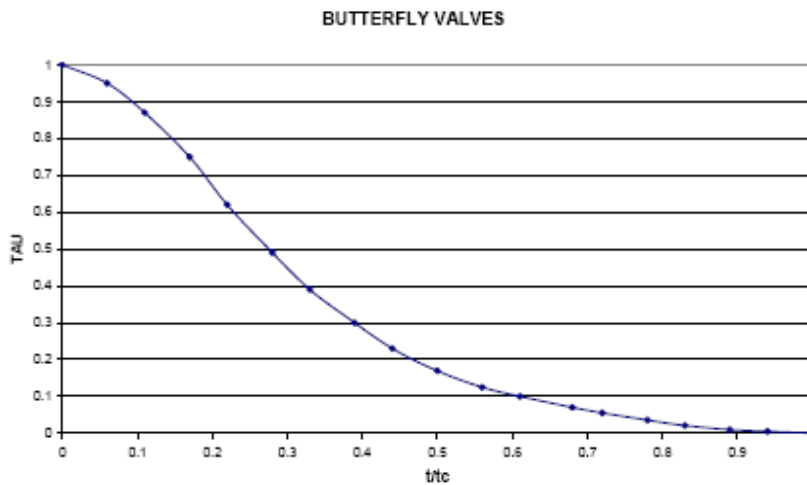


Figura 17.5- Válvula borboleta.
Fonte: Acunha, 2005.

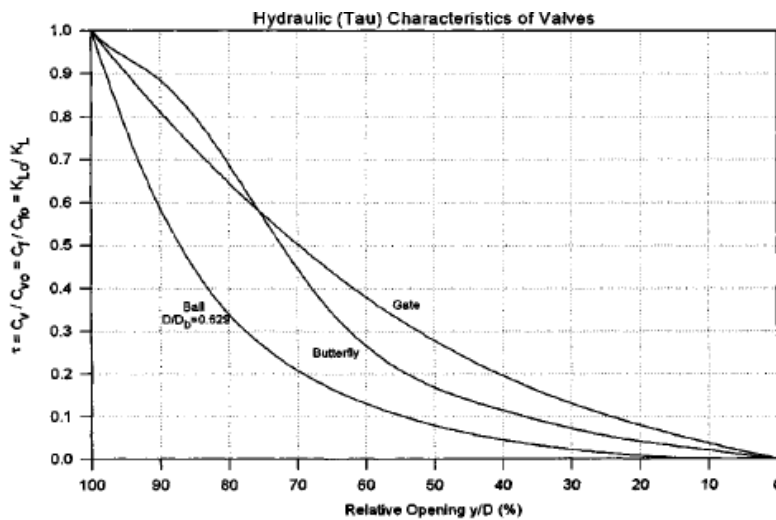


Figura 17.6- Gráfico de τ (Tau) para diversas válvulas: gaveta, borboleta

Fonte:

[http://www.rh.edu/~nifo5300/EP/References/Fundamentals%20of%20Waterhammer%20and%20Surge%20\(Hydraulic%20Design%20Handbook\).pdf](http://www.rh.edu/~nifo5300/EP/References/Fundamentals%20of%20Waterhammer%20and%20Surge%20(Hydraulic%20Design%20Handbook).pdf)

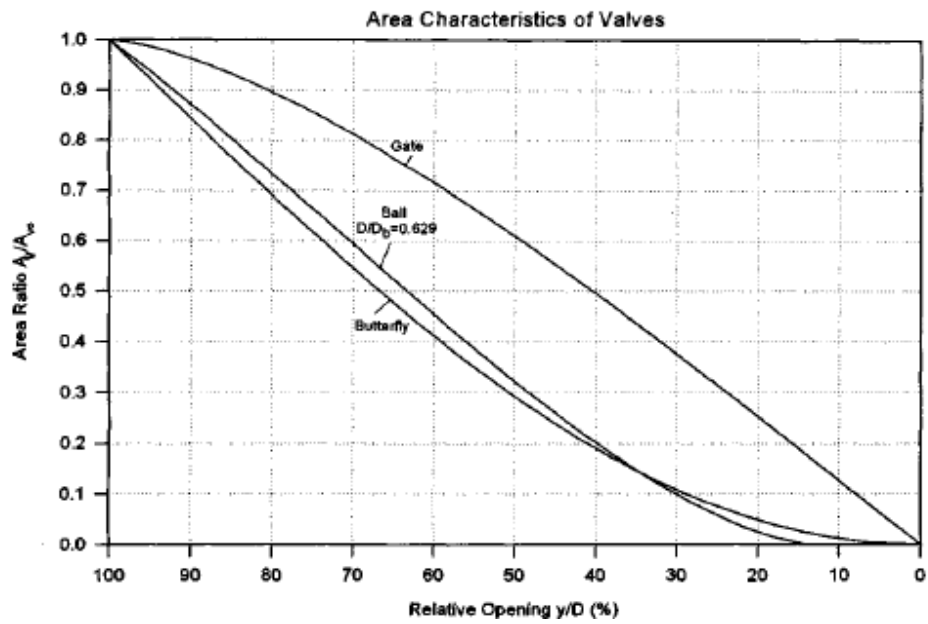


Figura 17.7- Gráfico da relação de áreas de diversas válvulas: gaveta, borboleta

Fonte:

[http://www.rh.edu/~nifo5300/EP/References/Fundamentals%20of%20Waterhammer%20and%20Surge%20\(Hydraulic%20Design%20Handbook\).pdf](http://www.rh.edu/~nifo5300/EP/References/Fundamentals%20of%20Waterhammer%20and%20Surge%20(Hydraulic%20Design%20Handbook).pdf)

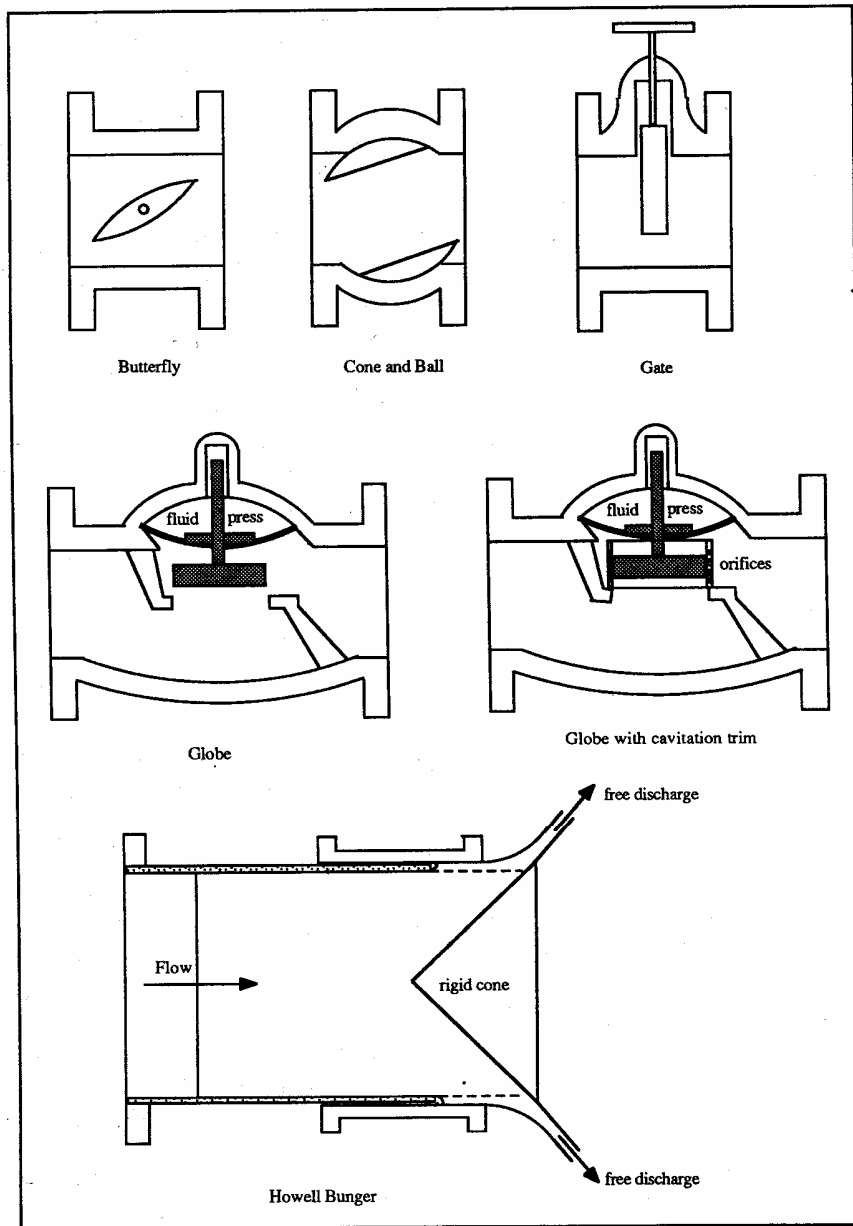


Fig. 4.1. Typical control valves

Figura 17.8- Varias válvulas de controle. Fonte: Tullis, 1989.

Exemplo 17.5

Da Figura (17.5) de Acunha, 2005 temos os valores de τ em função de t/t_c e colocamos na Tabela (17.4).

O valor de $(CdxAg)_0$ inicial pode ser calculado pela vazão Q_0 e a pressão no fim da linha H_0 . Nota: quando a válvula está aberta passa a vazão Q_0 e temos a pressão H_0 na válvula.

$$(CdxAg)_0 = Q_0 / (2 \times g \times H_0)^{0,5}$$

Assim se $Q_0=2,71\text{m}^3/\text{s}$ $g=9,81\text{m}/\text{s}^2$ e $H_0=98\text{m}$ teremos:

$$(CdxAg)_0 = Q_0 / (2 \times g \times H_0)^{0,5}$$

$$(CdxAg)_0 = 2,71 (2 \times 9,81 \times 98)^{0,5} = 0,0618$$

Supondo tempo de fechamento da válvula em 30s e como calculamos $(CV)_0 = 0,061764$ podemos calcular os outros valores, pois,

$$\tau = (Cd \times Ag) / (Cd \times Ag)_0$$

$$(Cd \times Ag) = (Cd \times Ag)_0 \times \tau$$

Tabela 17.4- Valores de $Cd \times Ag$ em função do tempo de fechamento de 30s para um válvula borboleta

τ	t/tc	Tempo de fechamento tc=30s	$(Cd \times Ag) = (Cd \times Ag)_0 \times \tau$
1,0	0,00	0,0	0,0618
0,9	0,10	3,0	0,0555
0,8	0,15	4,5	0,0494
0,7	0,18	5,4	0,0432
0,6	0,23	6,9	0,0370
0,5	0,28	8,4	0,0309
0,4	0,32	9,6	0,0247
0,3	0,38	11,4	0,0185
0,2	0,47	14,1	0,0123
0,1	0,60	18,0	0,0062
0,0	1,00	30,0	0,0000

Obtemos assim os valores de $(CdxAg)$ que podem ser colocados no programa em Fortran do Streeter para abertura ou fechamento de válvula no fim da linha.

Streeter chama os valores de CVA que são no total 11 e no exemplo temos:

Nota importante: considerando o espaçamento de 5s tiramos da Tabela (17.4) e fazemos a Tabela (17.5)

Tabela 17.5- Tempo de 5 em 5s que será usado. Precisamos de 10 CVA.

Tempo de fechamento tc=30s	$(Cd \times Ag) = (Cd \times Ag)_0 \times \tau$ CVA
0	0,0618
5	0,0450
10	0,0200
15	0,0100
20	0,0062
25	0,0000
30	0,0000
35	0,0000
40	0,0000

45	0,0000
50	0,0000

Exemplo 17.1

Dado uma adutora por gravidade com reservatório a Hres=100m de altura e tubulação com D=2,00m de diâmetro e comprimento de 4800m. O coeficiente f de Darcy-Weisbach $f=0,022$. A pressão na válvula que está aberta é de 98m. Trata-se de válvula borboleta com CVA
Nota: CVA são 11 dados.

CVA= 0,0618; 0,045; 0,020; 0,01; 0,0062; 0,000; 0,000; 0,000; 0000 0,000 0.00.

Entrando no programa em Fortran do Streeter achamos que a pressão máxima será 147,31m.

O intervalo entre os dados de fechamento da válvula é de 5s.

O tempo de fechamento $trc=30s$ (não entra nos cálculos, pois faz parte dos CVA).

O tempo de processamento é de 40s

A aceleração da gravidade $g=9,81m/s^2$

A adutora está dividida em $N=4$ trechos.

Queremos saber como se dá o fechamento da válvula em 30s.

Usando o programa em Fortran do Streeter achamos a **máxima pressão de 147,31m**.

Usando o programa em Fortran abaixo:

```
C PROGRAMA BASICO DE GOLPE DE ARIETE COM RESERVATORIO A MONTANTE
C E FECHAMENTO DE VALVULA A JUSANTE. FORMULA DE DARCY WEISBACH.
C DADOS VALOR DE F, A=VELOCIDADE DA ONDA, CVA=PRODUTO DO COEFICIENTE
C DE DESCARGA DA VALVULA ABERTA COM VALORES DADOS NO INTERVALO DCV
C FORTRAN 77 GNU2005 www.kkourakis.tripod.com
C PLINIO TOMAZ 22 DE dezembro DE 2007
C Compila assim: g77 streeter2.f -o streeter2.exe
C FONTE STREETER MECANICA DOS FLUIDOS
  DIMENSION Q(6), QP(6), H(6), HP(6), CVA(11)
  INTEGER I, J, N
  REAL F, XL, A, D, HRES, G, JPR, DCV, TMAX, CVA, T
  DATA F/0.022/, XL/4800.0/, A/1200.0/, N/4/, D/2.0/, HRES/100.0/,
  $ G/9.81/, JPR /1/ ,DCV /5.0/ , TMAX/40/
  DATA CVA(1)/0.0618/, CVA(2)/0.045/, CVA(3)/0.02/,
  $ CVA(4)/0.01/,
  $ CVA(5)/0.0062/, CVA(6) /0.0/, CVA(7) /0.0/,
  $ CVA(8)/0.0/,
  $ CVA(9)/0.00/, CVA(10) /0.0000/, CVA(11)/0.00/

10 AR=0.7854*D*D
  B=A/(G*AR)
  NS=N+1
  DT=XL/(A*N)
  CV=CVA(1)
  HP(1)=HRES
  J=0
  T=0.0
  QO=SQRT(HRES/(F*XL/(2.0*G*D*AR*AR)+1.0/(2.0*G*CV*CV)))
  HO=(QO/CV)**2/(2.0*G)
  R=(HRES-HO)/(QO**2*N)
  DO 11 I=1, NS
  Q(I)=QO
11 H(I)=HRES-(I-1)*R*QO**2
```

```

WRITE(6,FMT=1)
WRITE(6,FMT=2)
1  FORMAT ("1  PRESSAO PIEZOMETRICA E VAZAO AO LONGO DO TUBO")
2  FORMAT ("0  TEMPO      CV      X/L      0,0      0,25      0,50      0,75
$  1,0")
13 WRITE(6,FMT=3) T, CV, (H(I), I=1, NS), (Q(I), I=1, NS)
3  FORMAT("O", F7.3, 1X, F7.5, 5H  H=0,5F8.2/19X, "Q=", 5F8.2)
14 T=T+DT
    J=J+1
    IF (T .GT. TMAX) GO TO 99
    K=T/DCV +1
    CV=CVA(K)+(T-(K-1)*DCV)*(CVA(K+1)-CVA(K))/DCV
C  CONDICAOES DE CONTORNO A JUSANTE
    CP=H(N)+Q(N)*(B-R*ABS(Q(N)))
    QP(NS)=-G*B*CV*CV+SQRT((G*B*CV*CV)**2+2.0*G*CV*CV*CP)
    HP(NS)=CP-B*QP(NS)
C  CONDICAOES DE CONTORNO A MONTANTE
    QP(1)=Q(2)+(HRES-H(2)-R*Q(2)*ABS(Q(2)))/B
C  PONTOS NO INTERIOR
    DO 15 I=2, N
        CP=H(I-1)+Q(I-1)*(B-R*ABS(Q(I-1)))
        CM=H(I+1)-Q(I+1)*(B-R*ABS(Q(I+1)))
        HP(I)=0.5*(CP+CM)
15  QP(I)=(HP(I)-CM)/B
    DO 16 I=1, NS
        H(I)=HP(I)
16  Q(I)=QP(I)
    IF (J/JPR*JPR .EQ. J) GO TO 13
    GOTO 14
99  STOP
    END
    
```

Achamos os seguintes resultados, mostrando que a pressão é 147,31m.

```

1  PRESSAO PIEZOMETRICA E VAZAO AO LONGO DO TUBO
0  TEMPO      CV      X/L      0,0      0,25      0,50      0,75      1,0
O  0.000 0.06180 H=0 100.00 99.50 99.00 98.50 98.00
      Q= 2.71 2.71 2.71 2.71 2.71
O  1.000 0.05844 H=0 100.00 99.50 99.00 98.50 101.81
      Q= 2.71 2.71 2.71 2.71 2.71
O  2.000 0.05508 H=0 100.00 99.50 99.00 102.29 105.80
      Q= 2.71 2.71 2.71 2.61 2.51
O  3.000 0.05172 H=0 100.00 99.50 102.78 106.26 109.99
      Q= 2.71 2.71 2.61 2.51 2.40
O  4.000 0.04836 H=0 100.00 103.26 106.73 110.44 114.38
      Q= 2.71 2.61 2.51 2.40 2.29
O  5.000 0.04500 H=0 100.00 107.19 110.89 114.81 118.99
      Q= 2.52 2.51 2.41 2.29 2.17
O  6.000 0.04000 H=0 100.00 107.61 115.24 119.40 126.22
      Q= 2.32 2.31 2.29 2.18 1.99
O  7.000 0.03500 H=0 100.00 108.04 116.10 126.60 133.96
      Q= 2.11 2.10 2.08 1.99 1.79
O  8.000 0.03000 H=0 100.00 108.49 119.39 130.63 142.24
      Q= 1.89 1.88 1.80 1.70 1.58
O  9.000 0.02500 H=0 100.00 111.34 122.99 135.01 144.85
      Q= 1.66 1.59 1.50 1.39 1.33
O 10.000 0.02000 H=0 100.00 114.48 126.93 137.19 147.31
    
```

		Q=	1.29	1.28	1.18	1.13	1.08
○ 11.000	0.01800	H=0	100.00	115.59	128.67	139.23	143.98
		Q=	0.90	0.89	0.91	0.87	0.96
○ 12.000	0.01600	H=0	100.00	114.19	127.88	135.46	140.21
		Q=	0.49	0.54	0.57	0.74	0.84
○ 13.000	0.01400	H=0	100.00	112.30	120.99	128.87	135.94
		Q=	0.17	0.17	0.36	0.55	0.72
○ 14.000	0.01200	H=0	100.00	106.80	113.30	121.48	126.83
		Q=	-0.14	0.00	0.15	0.35	0.60
○ 15.000	0.01000	H=0	100.00	101.00	107.30	111.27	116.51
		Q=	-0.18	-0.17	-0.01	0.20	0.48
○ 16.000	0.00924	H=0	100.00	100.50	98.98	102.34	102.83
		Q=	-0.20	-0.19	-0.12	0.11	0.42
○ 17.000	0.00848	H=0	100.00	97.98	95.54	90.54	92.68
		Q=	-0.20	-0.14	-0.06	0.10	0.36
○ 18.000	0.00772	H=0	100.00	95.04	89.54	85.89	82.33
		Q=	-0.09	-0.07	0.07	0.19	0.31
○ 19.000	0.00696	H=0	100.00	91.57	85.39	81.33	82.28
		Q=	0.05	0.13	0.17	0.28	0.28
○ 20.000	0.00620	H=0	100.00	90.35	83.35	81.78	82.67
		Q=	0.34	0.30	0.34	0.27	0.25
○ 21.000	0.00496	H=0	100.00	91.79	86.74	84.70	84.31
		Q=	0.55	0.55	0.39	0.30	0.20
○ 22.000	0.00372	H=0	100.00	96.39	93.12	89.26	90.34
		Q=	0.76	0.64	0.52	0.33	0.16
○ 23.000	0.00248	H=0	100.00	101.33	98.90	98.76	97.83
		Q=	0.73	0.73	0.58	0.37	0.11
○ 24.000	0.00124	H=0	100.00	102.51	106.94	107.46	111.01
		Q=	0.69	0.67	0.58	0.36	0.06
○ 25.000	0.00000	H=0	100.00	105.61	111.05	119.18	121.30
		Q=	0.60	0.55	0.45	0.27	0.00
○ 26.000	0.00000	H=0	100.00	108.54	117.84	124.89	129.61
		Q=	0.40	0.38	0.23	0.09	0.00
○ 27.000	0.00000	H=0	100.00	112.23	122.37	128.27	128.48
		Q=	0.16	0.09	0.03	-0.03	0.00
○ 28.000	0.00000	H=0	100.00	113.83	122.65	125.96	126.93
		Q=	-0.23	-0.19	-0.18	-0.06	0.00
○ 29.000	0.00000	H=0	100.00	110.42	117.42	121.31	123.45
		Q=	-0.55	-0.49	-0.28	-0.14	0.00
○ 30.000	0.00000	H=0	100.00	103.60	109.09	114.91	115.70
		Q=	-0.76	-0.64	-0.46	-0.22	0.00
○ 31.000	0.00000	H=0	100.00	98.68	101.10	103.48	106.37
		Q=	-0.73	-0.73	-0.57	-0.31	0.00
○ 32.000	0.00000	H=0	100.00	97.51	93.09	92.57	91.28
		Q=	-0.69	-0.67	-0.58	-0.35	0.00
○ 33.000	0.00000	H=0	100.00	94.41	88.99	80.89	78.78
		Q=	-0.60	-0.55	-0.45	-0.27	0.00
○ 34.000	0.00000	H=0	100.00	91.49	82.23	75.21	70.51
		Q=	-0.40	-0.38	-0.23	-0.09	0.00
○ 35.000	0.00000	H=0	100.00	87.82	77.71	71.85	71.64
		Q=	-0.16	-0.09	-0.03	0.03	0.00
○ 36.000	0.00000	H=0	100.00	86.22	77.44	74.14	73.18
		Q=	0.22	0.19	0.18	0.06	0.00
○ 37.000	0.00000	H=0	100.00	89.62	82.65	78.77	76.64
		Q=	0.54	0.49	0.28	0.14	0.00
○ 38.000	0.00000	H=0	100.00	96.42	90.95	85.15	84.36
		Q=	0.76	0.64	0.46	0.22	0.00

○ 39.000	0.00000	H=0	100.00	101.31	98.91	96.53	93.65
		Q=	0.73	0.72	0.57	0.31	0.00
○ 40.000	0.00000	H=0	100.00	102.48	106.88	107.40	108.69
		Q=	0.69	0.66	0.58	0.35	0.00

A vazão que passa por uma válvula é dada pela equação do orifício conforme Figura (17.9):

$$Q = (C_d \times A_g) \times (2 \times g \times HRES)^{0,5}$$

Sendo:

Q= vazão que passa pelo orifício (m³/s)

C_d= coeficiente que varia com a abertura da válvula conforme Figura (17.8).

A_g= área da secção do da válvula (m²)

g= 9,81m/s²

HRES= pressão (m)

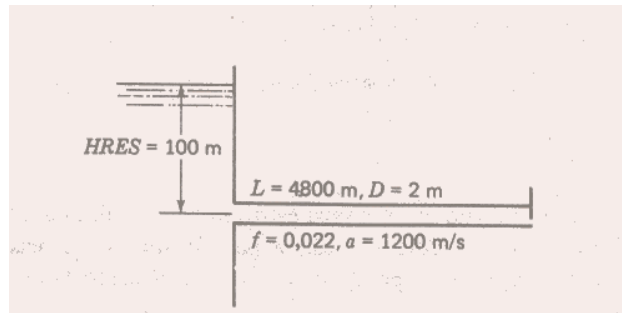


Figura 17.9- Esquema de reservatório e linha singular com Ho=98m
 Fonte: Streeter, 1982

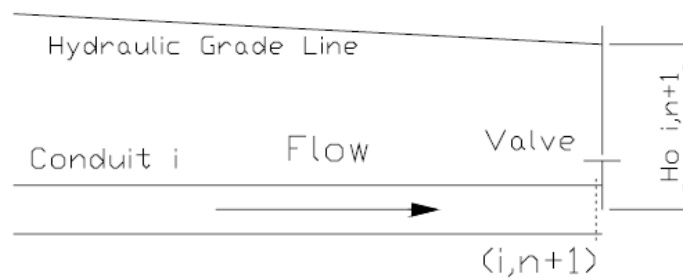


Figura 17.10 Esquema de reservatório e linha singular com Ho=98m

Streeter, 1982 chama os valores C_d x A de CVA,

$$Q = (C_d \times A) \times (2 \times g \times HRES)^{0,5}$$

$$Q = CVA \times (2 \times g \times HRES)^{0,5}$$

$$QP(NS) = CV \times (2 \times g \times HP(NS))^{0,5}$$

Os valores de CVA obtidos por interpolação linear são chamados de CV por Streeter, 1984.

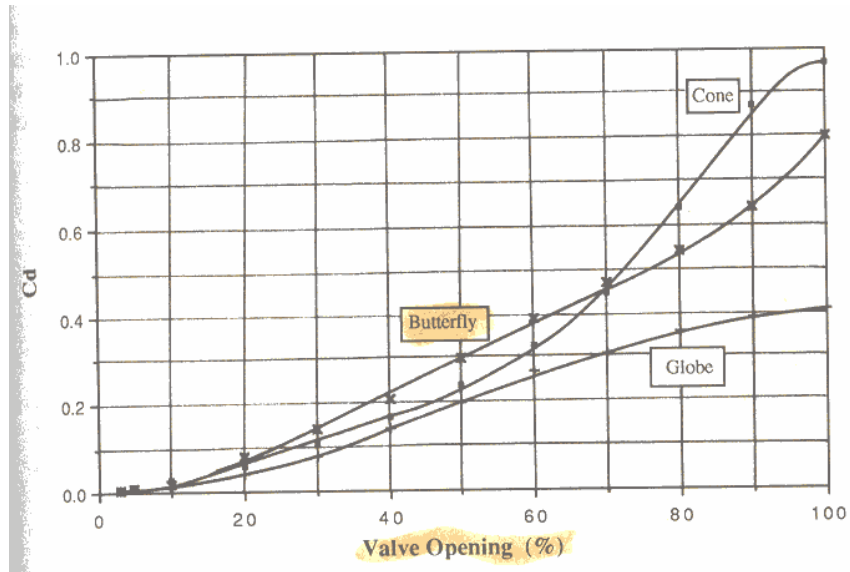


Figura 17.11 Abertura de válvulas (%)

Fonte: Tullis, 1989

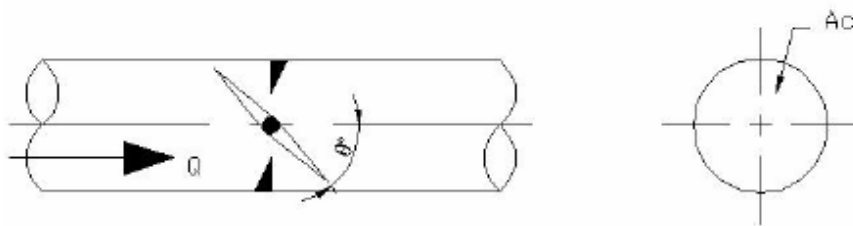


Figura 17.12- Válvula borboleta

Fonte: Acuna, 2005

17.8 Uma outra maneira de se tratar do fechamento de uma válvula

Streeter, 1978 página 38 in *Fluid Transients* cita a seguinte equação para fechamento de válvula:

$$\tau = (1 - t / t_c)^{Em}$$

Sendo:

$$\tau = (Cd \times Ag) / (Cd \times Ag)_0$$

$(Cd \times Ag)_0$ = valor quando a válvula está totalmente aberta e não há transientes hidráulicos. É o início do fechamento da válvula.

Cd = coeficiente de descarga da válvula

Ag = área da seção transversal na válvula. Não iremos fazer o cálculo, pois usaremos somente a relação τ .

$(Cd \times Ag)$ = valor durante o fechamento

E_m = potência da relação. Quando $E_m=1$ temos um fechamento linear. Streeter, 1978 usa como exemplo $E_m=1,25$.

t_c = tempo de fechamento em segundos. Exemplo $t_c=20s$

O CDA inicial da bomba

$$CDA = [(Q_0^2 / (2 g x H_0))]^{0,5}$$

A vazão $QP = - B x CV + [(B x CV)^2 + 2 x CV x CP]^{0,5}$

Sendo:

QP = vazão no ponto P em m^3/s

$$CV = (Q_0 x \tau)^2 / (2 x H_0)$$

Q_0 = vazão inicial em m^3/s

H_0 = pressão inicial no fim da adutora onde está a válvula (m)

$B = a / (g x A)$

a = celeridade em m/s

g = aceleração da gravidade = $9,81 m/s^2$

A = área da seção transversal da adutora em m^2

17.9 Método das Características

A NB 591/91 diz que os estudos de golpe de aríete devem ser feito pelo **método das características**.

Streeter, 1982 chegou em duas equações básica, uma denominada de **características positivas C^+** e outra de **características negativas C^-** conforme Figura (17.10).

$$C^+ \quad H_p = H_A - a/gxA (Q_p - Q_A) - \Delta x x f x Q_A x ABS(Q_A) / (2x g x D x A^2)$$

$$C^- \quad H_p = H_B + a/gxA (Q_p - Q_B) + \Delta x x f x Q_B x ABS(Q_B) / (2x g x D x A^2)$$

O ponto A é (I-1) e o ponto B é (I+1).

Considerando os coeficientes B e R.

$$B = a / (g x A)$$

Sendo:

a = celeridade de propagação das ondas (m/s)

g = aceleração da gravidade = $9,81 m/s^2$

A = área da seção transversal da tubulação (m^2)

D = diâmetro do tubo (m)

Q_A = vazão no ponto A (m^3/s)

Q_B = vazão no ponto B (m^3/s)

Q_P = vazão no ponto P (m^3/s)

H_A = pressão no ponto A (m)

H_B = pressão no ponto B (m)

H_P = pressão no ponto P (m)

f = coeficiente de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach (adimensional)

Δx = trecho da tubulação (m)

Exemplo 17.6

Calcular o coeficiente B para uma tubulação com velocidade de propagação da onda $a=1150\text{m/s}$ e tubo de diâmetro $D=0,25\text{m}$.

$$A = \pi \times D^2 / 4 = 3,1416 \times 0,25^2 / 4 = 0,0491\text{m}^2$$

$$B = a / (g \times A)$$

$$B = 1150 / (9,81 \times 0,0491) = 2388$$

Dica: quando na linha há diâmetros diferentes teremos valores de B diferentes. Assim teremos B_1, B_2, B_3 numa linha com trechos de diâmetros diferentes ou também de materiais diferentes.

$$R = (f \times \Delta x) / (2 \times g \times D \times A^2)$$

Sendo:

f = coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach (adimensional)

Δx = trecho da tubulação (m). Iremos usar sempre o comprimento da tubulação dividido por 3. Poderíamos também ter dividido por 4 ou 5 conforme nosso desejo.

$$\Delta x = L / 3$$

L = comprimento total da tubulação (m)

D = diâmetro do tubo (m)

A = área da seção transversal da tubulação (m^2)

Exemplo 17.7

Calcular o valor do coeficiente R numa adutora com 2300m que será dividido em 3 trechos. O valor de $f=0,0342$, $D=0,25\text{m}$, $A=0,0491\text{m}^2$.

$$\Delta x = 2300 / 3 = 766,67\text{m}$$

$$R = (f \times \Delta x) / (2 \times g \times D \times A^2)$$

$$R = (0,0342 \times 766,67) / (2 \times 9,81 \times 0,25 \times 0,0491^2) = 2219$$

Dica: se houver trechos com diferentes diâmetros e comprimentos teremos valores diferentes de R e assim teremos R_1, R_2, R_3, \dots

Podemos reescrever as duas equações C^+ e C^- considerando os coeficientes B e R.

$$C^+ \quad H_p = H_A - B \times (Q_p - Q_A) - R \times Q_A \times \text{ABS}(Q_A)$$

$$C^- \quad H_p = H_B + B \times (Q_p - Q_B) + R \times Q_B \times \text{ABS}(Q_B)$$

Nota: abs é o número absoluto, isto é, com sinal positivo. Observar que é um produto que sempre terá o sinal de Q_A ou Q_B .

Para uso em computador podemos usar:

$$CP = H_{(I-1)} + Q_{(I-1)} \times (B - R \times \text{ABS}(Q_{(I-1)}))$$

$$CM = H_{(I+1)} - Q_{(I+1)} \times (B - R \times \text{ABS}(Q_{(I+1)}))$$

Então teremos:

$$HP_{(I)} = CP - B \times QP_{(I)}$$

$$HP_{(I)} = CM + B \times QP_{(I)}$$

$$HP_{(I)} = 0,5 \times (CP + CM)$$

$$QP_{(I)} = (CP - HP_{(I)}) / B$$

Todas as secções internas podem ser calculadas deste modo. Somente para a parte interna (cuidado), pois nos contornos a jusante teremos a saída da válvula que estamos fechando e a montante temos o contorno devido ao reservatório.

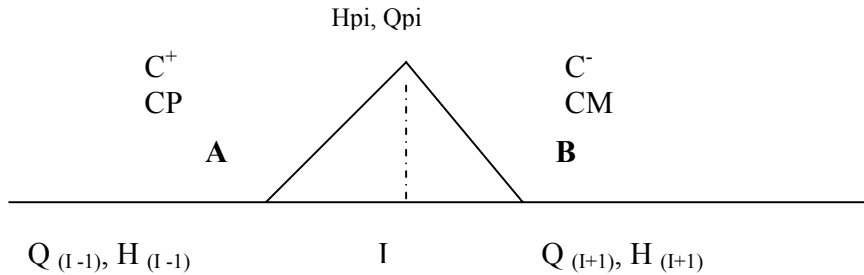


Figura 17.13- Esquema das equações C⁺ e C⁻

O esquema da Figura (17.13) onde mostram as equações C⁺ ou CP e C⁻ ou CM mostram a visualização do problema que é bom para entender as situações de contorno.

Condições de contorno

Se referem as condições das extremidades da tubulação. No caso temos um reservatório a montante e uma válvula a jusante.

Válvula na extremidade de jusante

Conforme Figura (17.14) usaremos a equação C⁺ ou CP. Usamos a equação $CP = H_{(I-1)} + Q_{(I-1)} \times (B-R \times ABS(Q_{(I-1)}))$. Precisamos das condições de contorno para as variáveis H_{pn+1} e Q_{pn+1} . No caso temos a equação da válvula que é um orifício que está sendo fechado.

$$Q_0 = (C_d A_v) \sqrt{2gH_0}^{0,5}$$

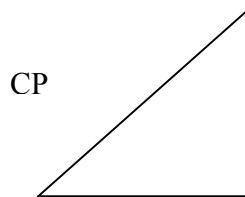


Figura 17.14- Extremidade de jusante onde está a válvula

A equação da válvula fornece a vazão Q_0 em regime permanente, H_0 a perda de carga na válvula e $(C_d \times A_v)$ a área da abertura. Não esquecer que temos o valor Q_0 e H_0 que é a pressão na válvula.

Para uma abertura genérica temos:

$$Q_p = C_d \times A_v \sqrt{2gH_p}^{0,5}$$

A solução das equações será:

$$Q_{pns} = -g B (C_d A_v)^2 + \{ [g B (C_d A_v)^2]^2 + (C_d A_v)^2 2g C_p \}^{0,5}$$

Condições de contorno no reservatório

Para a saída do reservatório usaremos somente a equação CM ou C e conforme Figura (17.15) $CM = H_{(I+1)} - Q_{(I+1)} \times (B - R \times ABS(Q_{(I+1)}))$. Precisamos de condições externas com duas incógnitas Q_p e H_p . Supondo o nível do reservatório constante temos uma condição de contorno já estabelecida $H_p = H_g$.

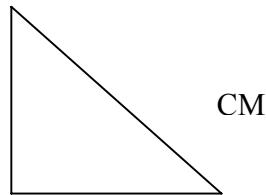


Figura 17.15 Extremidade de montante onde está o reservatório

O reservatório terá nível constante H_g .

No reservatório a cota de saída fica definida H_g e usamos a equação CM ou C.

Q_p = vazão em m^3/s

H_g = altura do reservatório em m

$B = a / (g \times A)$

a = celeridade em m/s

g = aceleração da gravidade = $9,81 m/s^2$

A = área da seção transversal da adutora em m^2

$$CM = H_{(I+1)} - Q_{(I+1)} \times (B - R \times ABS(Q_{(I+1)}))$$

$R = f \times \Delta x / (2 \times g \times D \times A^2)$

D = diâmetro da adutora em m

O valor de H_p é obtido desta maneira:

$$H_p = CM + B \times Q_p$$

Como $H_p = H_g$

$$H_g = CM + B \times Q_p$$

Tirando-se o valor de Q_p

$$Q_p = (H_g - CM) / B$$

17.10 Equivalência de tubulação

É importante salientar logo de começo que a equivalência de tubulações conforme Streeter, 1978 só é válida se os materiais forem mais ou menos iguais e tiverem mais ou menos as mesmas espessuras conforme Figura (17.16).

Vamos dar alguns conceitos úteis de equivalência em tubulações que são usados na prática.

Se tivermos uma tubulação em série L_1, L_2, L_3, \dots com celeridades a_1, a_2, a_3, \dots Podemos ter as seguintes relações:

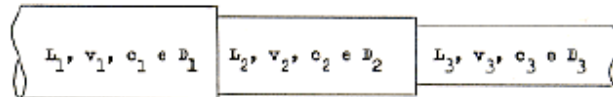


Figura 17.16- Tubos de materiais e diâmetros diferentes

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

Se a tubulação tem o mesmo diâmetro teremos:

$$L/a = L_1/a_1 = L_2/a_2 = L_3/a_3$$

$$a = L / \sum L_i/a_i$$

Se os diâmetros são diferentes:

$$L = L_1 + L_2 \times S_1/S_2 + L_3 \times S_1/S_3 + \dots$$

Celeridade equivalente

$$c_e = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{\frac{L_1}{c_1} + \frac{L_2}{c_2} + \frac{L_3}{c_3}}$$

Período equivalente

$$T_e = \frac{2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3)}{c_e}$$

Velocidade equivalente

$$v_e^2 = \frac{L_1 D_1^2 v_1^2 + L_2 D_2^2 v_2^2 + L_3 D_3^2 v_3^2}{L_1 D_1^2 + L_2 D_2^2 + L_3 D_3^2}$$

Exemplo 17.8

Seja um recalque de casas de bombas com os seguintes dados:

Vazão= $0,014\text{m}^3/\text{s}$

Comprimento $L_1=10\text{m}$ diâmetro $D_1=0,10\text{m}$

Comprimento $L_2=1200\text{m}$ $D_2=0,162\text{m}$

$L_3=90\text{m}$ $D_3=0,163$

$V_1=1,770\text{m/s}$

$V_2=0,674\text{m/s}$

$V_3=0,666\text{m/s}$

Velocidade equivalente= $(L_1 \times D_1^2 \times v_1^2 + L_2 \times D_2^2 \times v_2^2 + \dots) / (L_1 \times D_1^2 + L_2 \times D_2^2 + \dots)^{0,5} = 0,68\text{m/s}$

Celeridade $C_1= a_1=50\text{m/s}$

Celeridade $C_2= a_2=500\text{m/s}$

Celeridade $C_3= a_3=450\text{m/s}$

Tabela 17.7 Cálculos efetuados

Tubos	L(m)	a (m/s)
1	10	50
2	1200	500
3	90	450
Total	1300	464m/s
período equivalente		5,6s

Portanto a celeridade equivalente será 464m/s:

$$a = (L_1 + L_2 + L_3) / (L_1/a_1 + L_2/a_2 + L_3/a_3) = (10+1200+90)/(10/50+1200/500+90/450) = 464\text{m/s}$$

O período equivalente será de 5,6 segundos obtido:

$$T = 2 (L_1+L_2+L_3) / 464 = 1300/464 = 5,6\text{s}$$

A velocidade equivalente é de 0,68m/s

O tubo equivalente terá 1300m com diâmetro dado pela velocidade equivalente de

$V=0,68\text{m/s}$

$Q=A \times V = 0,014 = 0,68 \times A$

$A=0,02059\text{m}^2$

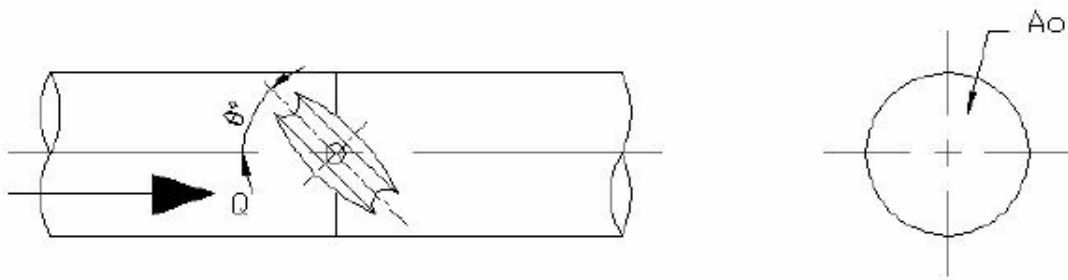
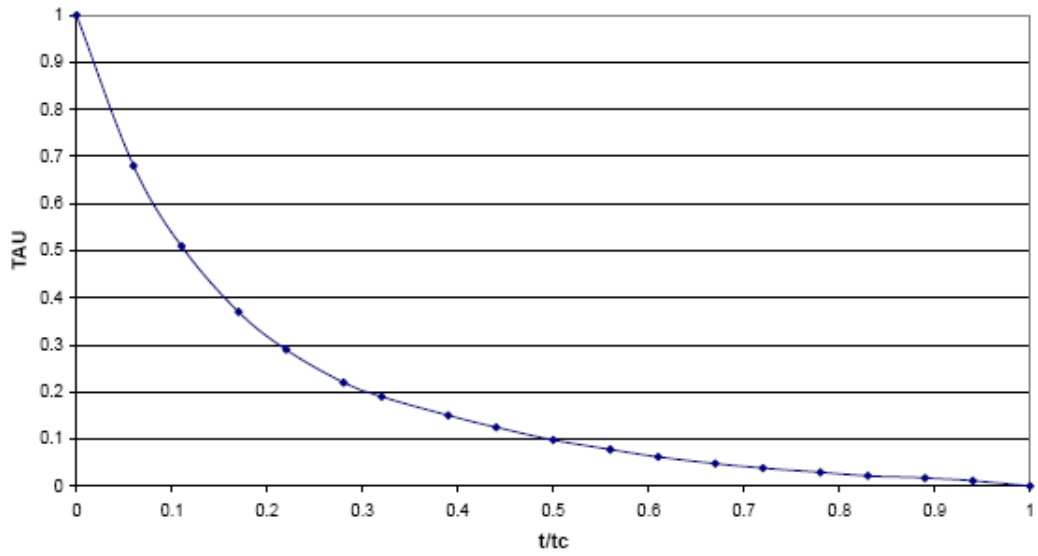
$D = (4 \times 0,02059 / 3,1416)^{0,5} = 0,162\text{m} = D$

17.11 Bibliografia e livros consultados

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-591/91. *Projetos de adutora de água para abastecimento público*. São Paulo, 8 páginas.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. PNB-591/77. *Elaboração de projetos de sistemas de adução de água para abastecimento público com 188 páginas*.
- ACUNA, JAIME SUAREZ. *Generalized water hammer algorithm for piping systems with unsteady friction*. University of Puerto Rico, 115páginas, 2005.
- CAMARGO LUIZ A. *Golpe de aríete em condutos. Análise pelo método das características*, Joinville 07 a 11 de outubro de 1997. Tubos e conexões Tigre.
- CAMARGO LUIZ A. *O golpe de aríete em tubulações de recalque. Análise simplificada*. Joinville 07 a 11 de outubro de 1989. Tubos e conexões Tigre.
- GOLPE DE ARIETE- Universidade de Algabe, Portugal, Faro, 2001.
http://w3.ualg.pt/~rlanca/sebenta-hid-aplicada/ha-07-golpe_de_ariete.pdf acessado em 20 de dezembro de 2007.
- HELLER, LÉO et al. *Abastecimento de água para consumo humano*. Editora UFMG, 2006, 859páginas.
- INTERNETET <http://www.saneamento10.hpg.ig.com.br/>
- INTERNET Prof. Carlos Fernandes acessado em 20 de março de 2007
- PARMAKIAN, JOHN. *Waterhammer analysis*. Dover publication, New York, 1963, 161páginas.
- PIRES, LUIZ FERNANDO GONÇALVES et al. *Análise de transientes devido a fechamento rápido de válvulas em dutos curtos*;
- POINT-A-MOUSSON – *Pipes and pipeline equipment*, 1978, 710 páginas. France
- SPIRA/SARCO. *Control valve characteristics*. Module 6.5, 2007.
- STEPHENSON, DAVI. *Pipeline design for water engineers*. 2a ed, 1981 Elsevier Scientific Publishing Company, Johannesburg, South Africa., ISBN 0-444-41669-2, 233 páginas.
- TULLIS, J. PAUL. *Hydraulics of pipelines*. John Wiley & Sons, 1989, 266páginas. ISBN 0-471-83285-5.
- WYLIE, E. BENJAMIN E STREETER, VICTOR L. *Fluid transients*, ISBN 0-07-072187-4, 1978, McGraw-Hill, United States of America, 384 páginas.
- WYLIE, E. BENJAMIN E STREETER, VICTOR L. *Mecânica dos Fluídos*, 1982, McGraw-Hill, United States of America.
[http://www.rh.edu/~nifo5300/EP/References/Fundamentals%20of%20Waterhammer%20and%20Surge%20\(Hydraulic%20Design%20Handbook\).pdf](http://www.rh.edu/~nifo5300/EP/References/Fundamentals%20of%20Waterhammer%20and%20Surge%20(Hydraulic%20Design%20Handbook).pdf). Acessado em 23 de dezembro de 2007.

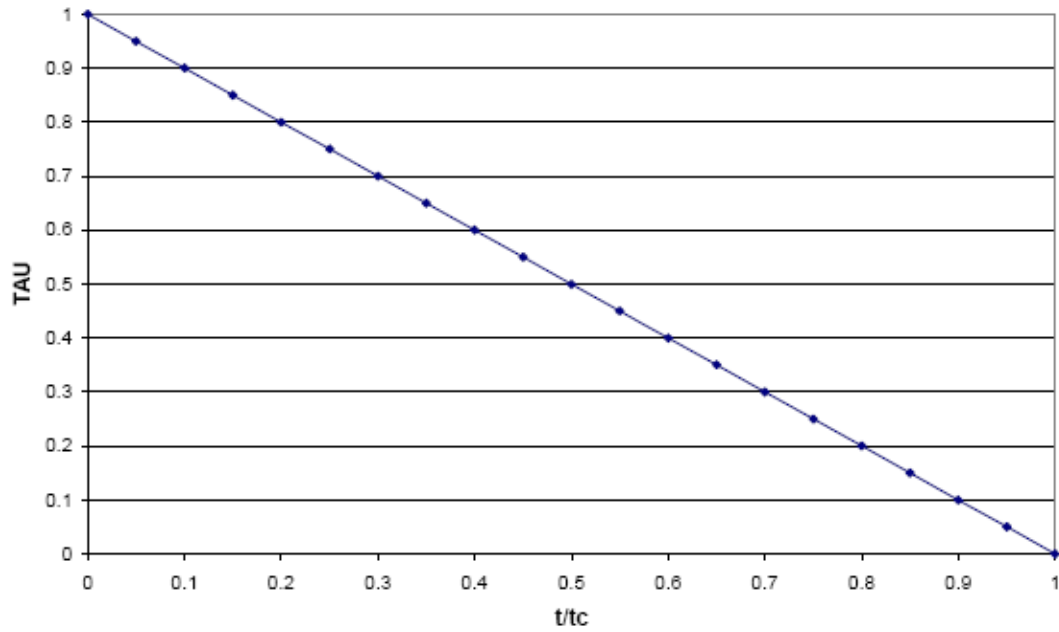
Apêndice com Figuras de Acunha, 2005

Biplane Valves

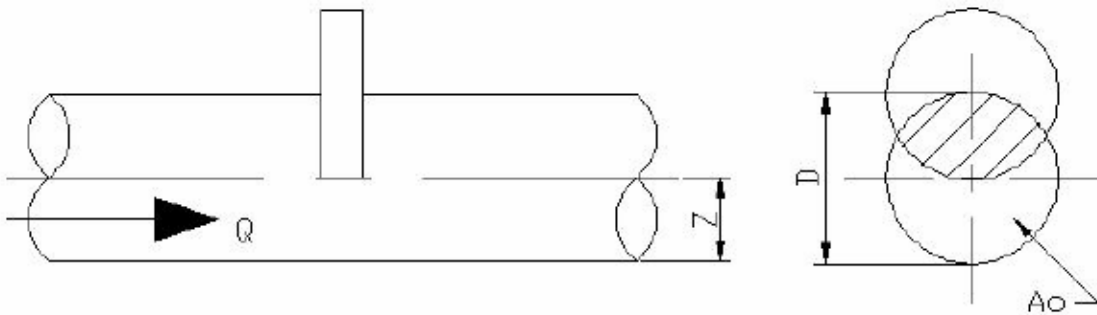


Apêndice com Figuras de Acunha, 2005

Circular Valves

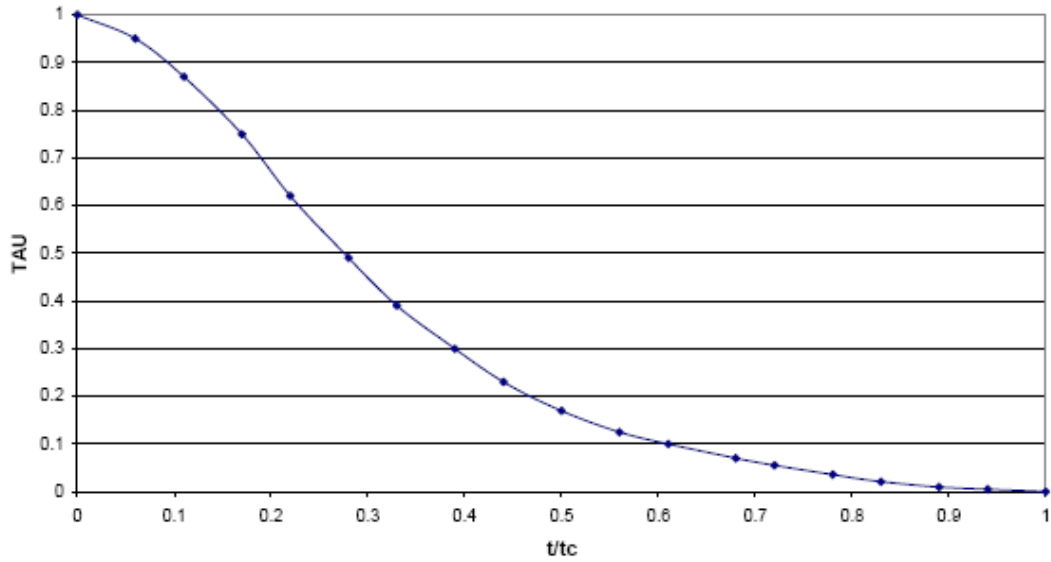


(a)



Apêndice com Figuras de Acunha, 2005

BUTTERFLY VALVES



(a)

