

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF

SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE

ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)

PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Estacas de Projeto	Estacas de Cálculo	Distância Parcial (m)	Distância Acumulada (m)	Q (L/s)	Vazão de Contribuição (L/s)	Diâmetro Econômico (mm)	Diâmetro Interno (mm)	ε (mm)	K	Número de Reynolds	f	V (m/s)	j (m)	hf (m)	TN (m)	GIT (m)	Piezométrica (m)	Pressão Disponível (m)	Material	Observação
0+000	0+000	0,00	0,00	11,50		107,24	173,00	0,2600	15,45	83.758,89	0,0242	0,49	0,000	0,189	399,275	398,275	429,27	31,00	FoFo k9	EEAT 01
0+000	0+000	0,00	0,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,000	0,001	399,275	398,275	429,08	30,80	PVC DEFoFo	
0+020	0+020	20,00	20,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	399,391	398,109	429,04	30,93	PVC DEFoFo	
0+040	0+040	20,00	40,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	399,770	398,437	428,99	30,55	PVC DEFoFo	
0+060	0+060	20,00	60,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	399,817	398,764	428,95	30,18	PVC DEFoFo	
0+080	0+080	20,00	80,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	399,966	398,884	428,90	30,02	PVC DEFoFo	
0+100	0+100	20,00	100,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	400,144	399,019	428,86	29,84	PVC DEFoFo	
0+120	0+120	20,00	120,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	400,298	399,222	428,82	29,59	PVC DEFoFo	
0+140	0+140	20,00	140,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	400,579	399,426	428,77	29,35	PVC DEFoFo	
0+160	0+160	20,00	160,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	401,148	400,039	428,73	28,69	PVC DEFoFo	
0+180	0+180	20,00	180,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	401,830	400,652	428,68	28,03	PVC DEFoFo	
0+200	0+200	20,00	200,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	402,326	401,144	428,64	27,50	PVC DEFoFo	
0+220	0+220	20,00	220,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	402,721	401,637	428,60	26,96	PVC DEFoFo	
0+240	0+240	20,00	240,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	403,336	402,184	428,55	26,37	PVC DEFoFo	
0+260	0+260	20,00	260,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	404,221	402,998	428,51	25,51	PVC DEFoFo	
0+280	0+280	20,00	280,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	404,890	403,812	428,46	24,65	PVC DEFoFo	
0+300	0+300	20,00	300,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	405,607	404,400	428,42	24,02	PVC DEFoFo	
0+320	0+320	20,00	320,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	406,075	404,988	428,38	23,39	PVC DEFoFo	
0+340	0+340	20,00	340,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	406,649	405,105	428,33	23,23	PVC DEFoFo	
0+360	0+360	20,00	360,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	407,517	406,118	428,29	22,17	PVC DEFoFo	
0+380	0+380	20,00	380,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	408,259	407,131	428,24	21,11	PVC DEFoFo	
0+400	0+400	20,00	400,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	408,671	407,394	428,20	20,81	PVC DEFoFo	
0+420	0+420	20,00	420,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	408,719	407,657	428,16	20,50	PVC DEFoFo	
0+440	0+440	20,00	440,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	408,805	407,737	428,11	20,38	PVC DEFoFo	
0+460	0+460	20,00	460,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	408,948	407,816	428,07	20,25	PVC DEFoFo	
0+480	0+480	20,00	480,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	408,970	407,881	428,02	20,14	PVC DEFoFo	
0+500	0+500	20,00	500,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	409,194	407,945	427,98	20,04	PVC DEFoFo	
0+520	0+520	20,00	520,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	409,323	408,223	427,94	19,71	PVC DEFoFo	
0+540	0+540	20,00	540,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	409,662	408,502	427,89	19,39	PVC DEFoFo	
0+560	0+560	20,00	560,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	409,934	408,800	427,85	19,05	PVC DEFoFo	
0+580	0+580	20,00	580,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	410,386	409,098	427,80	18,71	PVC DEFoFo	
0+600	0+600	20,00	600,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	410,575	409,368	427,76	18,39	PVC DEFoFo	
0+620	0+620	20,00	620,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	410,749	409,638	427,72	18,08	PVC DEFoFo	
0+640	0+640	20,00	640,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	410,894	409,791	427,67	17,88	PVC DEFoFo	
0+660	0+660	20,00	660,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	411,099	409,944	427,63	17,68	PVC DEFoFo	
0+680	0+680	20,00	680,00	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,043	0,001	411,130	410,031	427,58	17,55	PVC DEFoFo	
0+690	0+690	9,80	689,80	11,50		107,24	156,40	0,0015	0,08	92.648,90	0,0182	0,60	0,021	0,001	411,074	410,074	427,56	17,49	PVC DEFoFo	VCV (Q = 0.50 L/s)
0+690	0+690	0,00	689,80	11,50		107,24	173,00	0,2600	121,86	83.758,89	0,0242	0,49	0,000	1,488	411,07	426,07	426,07	0,00	FoFo k9	REL 01 (100 m³) São Miguel

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA TRATADA 01 (EEAT 01)

COEFICIENTES "K" DAS SINGULARIDADES

SUCÇÃO (K_s)			
Tipo	K	Quantidade	K_{PARCIAL}
Redução	0,15	1,00	0,15
Junta de desmontagem	0,40	1,00	0,40
Crivo	0,75	0,00	0,00
Válvula de gaveta aberta	0,20	0,00	0,00
Válvula de pé	1,75	0,00	0,00
Entrada normal em canalização	0,50	1,00	0,50
Outros	1,00	3,00	3,00
K_s			4,05
BARRILETE (K_B)			
Tipo	K	Quantidade	K_{PARCIAL}
Curva 90°	0,40	4,00	1,60
Curva 45°	0,20	0,00	0,00
Redução	0,15	0,00	0,00
Ampliação	0,30	1,00	0,30
Tê direto	0,60	1,00	0,60
Tê lateral	1,30	0,00	0,00
Tê bilateral	1,80	0,00	0,00
Válvula de gaveta aberta	0,20	3,00	0,60
Válvula de retenção	2,50	1,00	2,50
Junta desmontagem	0,40	2,00	0,80
Outros	5,00	1,00	5,00
K_B			11,40
K_{TOTAL}			15,45

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

AAT 01: EEAT 01 AO REL 01 (100 m³) NA COMUNIDADE SÃO MIGUEL
COEFICIENTES "K" DAS SINGULARIDADES

ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)			
Tipo	K	Quantidade	K_{PARCIAL}
Curva 90°	0,40	3,00	1,20
Curva 45°	0,20	0,00	0,00
Curva 22° 30'	0,10	0,00	0,00
Curva 11° 15'	0,10	0,00	0,00
Válvula de gaveta	0,20	0,00	0,00
Tê direto	0,60	1,00	0,60
Saída de canalização	1,00	1,00	1,00
K_A			2,80

Número de Estacas **36,00 unidades**
K_{MÉDIO} **0,08**

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

1. DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

1.1. CÁLCULO DO DIÂMETRO ECONÔMICO

Mesmo com o funcionamento do sistema em apenas algumas horas no decorrer do dia, para o dimensionamento hidráulico da tubulação da adutora foi utilizada a Fórmula de Bresse sendo, portanto, apresentada posteriormente.

$$D = k\sqrt{Q}$$

Sendo:

D: Diâmetro econômico segundo a Fórmula de Bresse (m);

k: Fator de correção que varia 0,9 a 1,4 (adimensional);

Q: Vazão na tubulação de recalque (m³/s).

1.2. CÁLCULO DA VELOCIDADE NOS TRECHOS

De acordo com a equação abaixo, calcula-se a velocidade do fluxo na tubulação:

$$V = \frac{Q}{\left(\frac{\pi \times D^2}{4}\right)}$$

Sendo:

V: Velocidade do fluxo na tubulação (m/s);

Q: Vazão na tubulação de recalque (m³/s);

D: Diâmetro da tubulação (m).

1.3. CÁLCULO DA PERDA DE CARGA AO LONGO DA ADUTORA

Conforme Norma Brasileira NB-591 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT. 1991), utiliza-se a Fórmula Universal para o cálculo da perda de carga linear ao longo da tubulação.

$$j = f \times \frac{L_{TUBULAÇÃO}}{D_{PROJETO}} \times \frac{V^2}{2g}$$

Sendo:

j: Perda de carga linear pela Fórmula Universal (m);

f: fator de atrito (adimensional);

L: Comprimento da tubulação de recalque (m);

D: Diâmetro da tubulação (m);

V: Velocidade do fluxo na tubulação (m/s);

g: Aceleração da Gravidade (m/s²).

No entanto, para o cálculo da perda de carga linear, torna-se necessário a determinação do fator de atrito (f) segundo a Fórmula de Swamee-Jain sendo, portanto, apresentada posteriormente:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{\epsilon}{3,70D} + \frac{5,74}{Re^{0,90}}\right)\right]^2}$$

Sendo:

f: Fator de atrito (adimensional);

ε: Rugosidade do material da tubulação (m)

D: Diâmetro do tubo (m)

Rey: Número de Reynolds (adimensional).

Consequentemente, o fator de atrito é determinado em função do número de Reynolds segundo a formulação abaixo:

$$Rey = \frac{V \times D_H}{\nu}$$

Sendo:

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Rey: Número de Reynolds (adimensional);

V: Velocidade do fluxo na tubulação (m/s);

D_H: Diâmetro hidráulico (m);

v: Viscosidade cinemática do fluido à uma temperatura de 20°C (1,007x10⁻⁶ m²/s)

Segundo metodologia sugerida por Porto, Rodrigo Melo - Hidráulica Básica, Editora EESC/USP (1988), o diâmetro hidráulico é numericamente igual ao diâmetro da tubulação, pois trata-se de um escoamento em seção plena, ou seja, toda a parede interna do conduto encontra-se em contato com o líquido escoado.

1.4. CÁLCULO DA PERDA DE CARGA TOTAL

A perda de carga total na tubulação é obtida através da seguinte formulação:

$$H_T = j + h_f$$

Sendo:

H_T: Perda de carga total na tubulação (m);

j: Perda de carga linear ao longo da tubulação (m);

h_f: Perda de carga localizada ao longo da tubulação (m);

Trecho	Diâmetro Interno (mm)	Extensão (m)	Vazão (m³/s)	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	ε (m)	f	j	k	h _f	ΔH
1	173,00	0,00	0,0115	0,4890	84.008,94	0,0002600	0,02424	0,0000	15,4500	0,1883	0,1883
2	156,40	689,80	0,0115	0,5990	93.032,37	0,0000015	0,01819	1,4671	2,8000	0,0512	1,5183
3	173,00	0,00	0,0115	0,4890	84.008,94	0,0002600	0,02424	0,0000	121,8617	1,4852	1,4852
Total		689,80									3,1918

2. DIMENSIONAMENTO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

2.1. CÁLCULO DA ALTURA MANOMÉTRICA

2.1.1. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS

Cota inicial (Z_i) 398,28 m

Cota final (Z_f) 426,07 m

Desnível geométrico (Z_f - Z_i) 27,80 m

2.1.2. PERDA DE CARGA NA TUBULAÇÃO (ΔH)

Perda de carga na tubulação 3,19 m

2.1.2. ALTURA MANOMÉTRICA

$$H_M = H_G + \Delta H$$

H_M: Altura Manométrica (m); 30,99 m

H_G: Desnível Geométrico; 27,80 m

ΔH: Perda de carga ao longo da tubulação (m). 3,19 m

2.2. PONTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA (BOMBA DE REFERÊNCIA)

Ponto	Q _{TOTAL} (L/s)	Número de Bombas em Paralelo	Q _{BOMBA} (L/s)	H (m)
P-01	11,50	1,00	11,50	31,00

2.3. DEFINIÇÃO DO CONJUNTO ELEVATÓRIO MOTO-BOMBA

Vazão da Bomba

11,50 L/s

Altura Manométrica

31,00 m

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Bomba de Referência	KSB MEGANORM 50-250
Rotor	260,00 mm
Rotação	1.750 rpm
Eficiência	62,5 %
NPSH _R	1,50 m
Momento de Inércia (GD ²)	0,192 kg.m ²
Peso	72 Kg

2.4. POTÊNCIA DOS CONJUNTO ELEVATÓRIO MOTO-BOMBA

2.4.1. CÁLCULO DA POTÊNCIA TEÓRICA

$$P_T = \frac{W \times Q \times H_M}{N_B \times 75,00 \times E_B \times E_M}$$

Sendo:

P _T : Potência teórica em cada conjunto elevatório moto-bomba	— cv
W: Peso específico do líquido recalado	1.000,00 kg/m ³
Q: Vazão de bombeamento	0,0115 m ³ /s
H _M : Altura manométrica na estação elevatória	31,00 mca
N _B : Número de conjuntos elevatórios moto-bomba em caso de funcionamento simultâneo	1,00 conjunto(s)
E _{B-01} : Eficiência da bomba na estação elevatória	62,5 %
E _{M-01} : Eficiência do motor na estação elevatória	86,30 %
P _T : Potência teórica em cada conjunto elevatório moto-bomba	8,81 cv

2.4.2. CÁLCULO DA POTÊNCIA INSTALADA

$$P = P_T \times F_{AN} \times F_{ABNT}$$

Sendo:

P: Potência instalada em cada conjunto elevatório moto-bomba	— cv
PT: Potência teórica em cada conjunto elevatório moto-bomba	8,81 cv
F _{AN} : Fator de acréscimo na potência instalada recomendado por Azevedo Netto	1,20 adimensional
F _{ABNT} : Fator de acréscimo na potência instalada recomendado pela ABNT	1,00 adimensional
P: Potência instalada em cada conjunto elevatório moto-bomba	10,58 cv
P _{TOTAL} : Potência total instalada na estação elevatória	10,58 cv

2.4.3. DEFINIÇÃO DA POTÊNCIA COMERCIAL

Potência comercial de cada conjunto elevatório moto-bomba da estação elevatória	12,50 cv
Potência comercial total da estação elevatória	12,50 cv

2.4.4. CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

Modelo de Referência	WEG IP55
Potência	12,50 cv
Carcaça	132M
Rotação	1.750 rpm
Momento de Inércia (J)	0,0543 kg.m ²
Peso	69 Kg

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

2.5. AVALIAÇÃO DA ALTURA LIVRE POSITIVA DE SUCÇÃO (NPSH)

$$Z = h_{BOMBA} - h_{SUCÇÃO\ MÍNIMO}$$

$$NPSH_R = -Z + \frac{P_A - P_V}{\gamma} \times 10,00 - H_F$$

Sendo:

NPSH_R: "Net Positive Suction Head" ou Altura Livre Positiva de Sucção requerido

– m

H_{bomba}: Cota do eixo da bomba

398,28 m

H_{SUCÇÃO MÍNIMO}: Cota do nível mínimo de sucção

398,28 m

Z: Altura de sucção

0,00 m

P_A: Pressão atmosférica

0,95 kg/cm²

P_V: Pressão de vapor

0,02 kg/cm²

γ : Peso específico da água

1,00 kg/dm³

H_F: Perda de carga na sucção

0,049 m

NPSH_{req} = Net Positive Suction Head requerido

1,50 m

NPSH_{disp} = Net Positive Suction Head disponível

9,27 m

NPSH disponível > NPSH requerido » Funcionamento Adequado

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

3. Estudo de Transientes Hidráulicos

3.1. Introdução

O *Estudo dos Transientes Hidráulicos* desenvolvido ao longo do traçado da adutora do sistema de abastecimento de água foi elaborado conforme o dimensionamento apropriado para a tubulação assim como a determinação de cargas de pressão dinâmica necessárias ao projeto das ancoragens dos condutos.

Desta forma, os Estudos dos Transientes Hidráulicos foram realizados conforme metodologia apresentada abaixo:

- a) Primeiramente, procedeu-se a análise da linha adutora em **regime permanente** para os devidos ajustes dos parâmetros relativos ao tipo de bomba, rotação e rotor aplicável em cada caso;
- b) Em seguida, foram simulados os transientes hidráulicos sem as proteções anti-golpe para avaliação da compatibilidade e classe de pressão da tubulação adotada;
- c) Posteriormente, após criteriosa análise, simula-se o sistema adotando-se as proteções necessárias primando pelos fatores técnicos, econômicos e ambientais aliados à eficiência da proteção.

3.2. Metodologia

Os *Transientes Hidráulicos* são ocasionados devido à parada no bombeamento de água em uma instalação de recalque. No entanto, a parada dos conjuntos elevatórios moto-bomba são normalmente previstos de maneira controlada atenuando-se o efeito do **Golpe de Ariete**. Porém, considera-se como dimensionamento crítico a parada inesperada quando, por exemplo, a energia de alimentação dos conjuntos elevatórios é bruscamente interrompida devido à um *blackout* energético.

Devido à parada inesperada do funcionamento dos conjuntos elevatórios moto-bomba, conforme informações na literatura especializada, registra-se a situação crítica do sistema com oscilações de grande magnitude das sobrepressões e subpressões na linha adutora.

Como prevenção e proteção ao Golpe de Ariete, projetam-se equipamentos de proteção anti-golpe através de sucessivas simulações computacionais do funcionamento das instalações nas condições de regime hidráulico permanente e regime hidráulico transiente com a finalidade de alívio nas envoltórias de sobrepressão e subpressão.

Para análise dos Transientes Hidráulicos ao longo da tubulação nas linhas adutoras foi empregado o Programa UFC 06 desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O método matemático empregado pela maioria dos programas de análise computacional de transientes hidráulicos é o Método das Características sendo, portanto, apresentado por CHAUDHRY¹ na literatura internacional e SOUSA² na literatura nacional.

¹ Chaudhry, M. H., "Applied Hydraulic Transients", Van Nostrand Reinhold Co. Publ., New York, 1989.

² Souza, P. A.; Martins, J. R. S.; Fadiga Jr., F. M., "Métodos Computacionais Aplicados à Engenharia Hidráulica", Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, EPUSP, São Paulo, 1991.

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Portanto, as equações básicas utilizadas na análise de transientes hidráulicos são matematicamente expressas pela equação dinâmica do escoamento conforme 2ª Lei de Newton e pela Equação da Continuidade. O sistema apresentado pelas equações diferenciais é resolvido através do Método das Características, deste modo, torna-se possível a avaliação da vazão (Q) e da carga piezométrica (H) desenvolvida ao longo da tubulação fornecida pela abscissa x e o tempo t.

3.3. Equação do Movimento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2,00 \times D \times A} Q|Q| = 0$$

Portanto, de acordo com a equação do movimento apresentada anteriormente, o primeiro termo representa a variação da aceleração do movimento, o segundo termo representa a variação do gradiente de pressão e o terceiro termo representa os efeitos decorrentes da dissipação de energia.

3.4. Equação da Continuidade

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g \times A} \times \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

A equação da continuidade apresentada anteriormente é composta pelo primeiro termo que representa a variação do fluxo de massa, adicionalmente, o segundo termo representa a variação de massa. O parâmetro c trata-se da celeridade de propagação das ondas de pressão e velocidade durante o transitório hidráulico sendo, portanto, comumente identificada como celeridade da onda.

A adoção de aparelhos e equipamentos de proteção na modelagem matemática do transitório hidráulico ocorre através da aplicação de condições de contorno específicas para cada situação e tipo de equipamento.

3.5. Cálculo da Celeridade da Onda

A celeridade da onda é uma função diretamente relacionada com as características da tubulação como elasticidade, deformação, espessura da parede, diâmetro e grau de fixação, adicionalmente, registram-se as características do fluido como compressibilidade e presença de gases. Portanto, em seguida, apresentam-se as equações comumente empregada nos programas de cálculo para transientes hidráulicos (Equação 01 e Equação 02).

$$c = \frac{\sqrt{k/\rho}}{\sqrt{1 + k \times \psi/E}} \quad (\text{Eq. 01}) \quad \text{e} \quad \psi = \frac{D}{e} \times (1 - \nu^2) \quad (\text{Eq. 02})$$

Nas situações de tubulações com paredes finas sendo ancoradas contra movimentação longitudinal têm-se na maioria dos casos:

Sendo:

k: Compressibilidade do fluido, deste modo, para escoamento da água adota-se 2,19 GPa;

n: Coeficiente de Poisson (adimensional), assim, utiliza-se 0,25 para ferro fundido, 0,40 para PVC, e de 0,50 a 0,55 para PRFV;

E: Módulo de Elasticidade Circunferencial do material da tubulação sendo normalmente adotado 170 GPa para ferro fundido, 30 GPa para PVC e 1 MPa para PVC DeFoFo;

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

r: massa específica do fluído, deste modo, para água doce utiliza-se 1.000,00 Kg/m³;

D: Diâmetro da tubulação (m);

e: Espessura do tubo (m).

3.6. Cálculo do Momento de Inércia Total do Sistema

O momento de inércia total do sistema consiste no somatório dos momentos de inércia de todas as partes girantes do conjunto elevatório moto-bomba, desta forma, esta informação é imprescindível ao cálculo dos transientes hidráulicos e, normalmente, é fornecido na ficha técnica do produto pelo próprio fabricante, ou seja, são fornecidas informações tanto das bombas como dos motores. Em seguida, apresentam-se as formulações matemáticas no caso do não fornecimento de informações via catálogo técnico.

$$I = \sum_{i=0}^{i=n} m_i \times r_i^2 \quad (\text{Eq. 03}) \quad \text{e} \quad G \times D^2 = 4,00 \times J \quad (\text{Eq. 04})$$

Sendo:

J: Momento de inércia (kg.m²);

GD²: Momento de inércia (kg.m²);

G: Massa girante (kg);

D: Diâmetro de giração (m);

I: Momento de Inércia (kg.m²);

$$I = M \times R_G^2 \quad (\text{Eq. 05})$$

Sendo:

I: Momento de Inércia (kg.m²);

M: Massa do corpo (kg);

R_G: Raio de giração representa a distância ao eixo de rotação no qual toda a massa poderia ser concentrada sem variação no momento de inércia (m).

Portanto, para exatidão nos estudos dos trasientes hidráulicos, recomenda-se a adoção de catálogos técnicos para obtenção dos momentos de inércia das bombas e motores devido à características particulares de cada equipamento.

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

3.7. Conceituação Teórica dos Transientes Hidráulicos

As pressões transientes provenientes da interrupção do bombeamento devido à inexistência do fornecimento de energia ao conjunto elevatório moto-bomba são consideradas extremas, devido à parada do fluxo, quando compara-se à pressão normalmente atuante na linha de recalque.

No caso em que o perfil da tubulação, em função das cotas do terreno natural, encontra-se relativamente próximo da linha piezométrica, quando ocorre a súbita desaceleração da coluna de água, registra-se uma queda de pressão interna com valores inferiores à pressão atmosférica. Deste modo, de acordo com a explanação, a *pressão de vapor* representa a pressão mínima interna admissível em caso de decaimento.

A vaporização, comumente denominada como separação de coluna, ocorre nos pontos com cota mais elevada ao longo do perfil da linha de recalque. Deste modo, quando a onda de pressão retorna aos valores positivos, a coluna de água se reunirá novamente e, conseqüentemente, registram-se sobrepressões, como efeito do Golpe de Aríete, responsáveis pela instabilidade das tubulações e conexões. A seguir, listam-se os valores usuais da pressão de vapor nas condições de pressão atmosférica assim como outros parâmetros de necessários ao cálculo de transientes hidráulicos.

Temperatura (°C)	Viscosidade Cinemática $\nu = \mu / \rho$ (m ² .s)	Tensão de Vapor a 4°C (mca)	Módulo de Elasticidade E (N/m ²)
0	$1,78 \times 10^{-6}$	0,062	$19,52 \times 10^8$
4	$1,57 \times 10^{-6}$	0,083	-
10	$1,31 \times 10^{-6}$	0,125	$20,50 \times 10^8$
20	$1,01 \times 10^{-6}$	0,239	$21,39 \times 10^8$
30	$0,83 \times 10^{-6}$	0,433	$21,58 \times 10^8$
40	$0,66 \times 10^{-6}$	0,753	$21,68 \times 10^8$
50	$0,56 \times 10^{-6}$	1,258	$21,78 \times 10^8$
60	$0,47 \times 10^{-6}$	2,033	$21,88 \times 10^8$
80	$0,37 \times 10^{-6}$	4,831	-
100	$0,29 \times 10^{-6}$	10,333	-

Nas condições de subpressão durante transitório hidráulico, conforme quadro apresentado anteriormente, a pressão interna mínima das tubulações seria de 0,24 mca para a temperatura da água em torno de 20°C, deste modo, no dimensionamento do sistema de proteção das linhas de recalque, considera-se como meta a condição de estabilidade da coluna de água nos pontos mais críticos.

Para prevenção do Golpe de Aríete, adotam-se equipamentos de proteção com a finalidade da diminuição da subpressão ao longo da tubulação devido à interrupção no funcionamento do conjunto elevatório moto-bomba, acerca da sobrepressão, consegue-se uma redução ou mesmo eliminação da mesma.

Portanto, limita-se a subpressão através da alimentação da linha de recalque com água imediatamente após o registro da diminuição da pressão interna. Deste modo, conforme menção, adota-se o emprego de uma série de equipamentos de proteção explanados posteriormente.

3.8. Equipamentos alternativos de proteção contra transientes hidráulicos

a) Ventosas e Registros de Descarga

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

As *ventosas* são equipamentos convecionais de uso obrigatório para proteção das linhas adutoras e recomenda-se a instalação nos pontos altos das canalizações. Adicionalmente, os *registros de descarga* são equipamentos convecionais de uso obrigatório para proteção das linhas adutoras e recomenda-se a instalação nos pontos baixos das curvas verticais ao longo das canalizações, neste caso, são considerados como equipamentos de utilidade operacional para limpeza e deságue da tubulação.

Dependendo do tipo adotado, as *ventosas* são utilizadas para as seguintes finalidades: expulsão do ar durante o preenchimento da tubulação pelo fluído; durante funcionamento do sistema, em alguns casos, para prevenção da formação de bolhas de ar nas operações corriqueiras; dependendo da conformação topográfica do terreno, permite-se a entrada de ar na tubulação para controle das pressões negativas que podem ocorrer durante os transitórios hidráulicos.

Para fins de segurança durante a operação do sistema, alguns autores recomendam a instalação obrigatória de ventosas como dispositivos de proteção sendo, portanto, projetadas conforme a topografia do terreno e das condições de fluxo na canalização, no entanto, as ventosas são ignoradas para efeito de cálculo na análise dos transientes hidráulicos.

Deste modo, prevê-se a instalação de ventosas como componentes ativos do sistema de proteção das linhas adutoras devido à recomendação de consultores com experiência no projeto e análise de transientes hidráulicos, ou seja, verifica-se a ocorrência de pressões negativas responsáveis pelo funcionamento inadequado das ventosas devido à ausência de manutenções adequadas às linhas de recalque dentro da vida útil do equipamento.

Entretanto, apesar da recomendação contrária de diversos autores creditados para não se considerar a utilização das ventosas como componente ativo dos sistemas de proteção, verifica-se na prática que esta recomendação *encarece* demasiadamente os sistemas de proteção contra transientes hidráulicos, tornando inviáveis economicamente os sistemas de proteção de uma forma desnecessária.

As ventosas que atuam como proteções contra o golpe de aríete devem ser **instaladas aos pares na linha de recalque**, podendo ser em série ou em paralelo. Esta providência minimiza os riscos de colapso do sistema por mau funcionamento de uma das unidades componentes do par de ventosas.

A adoção desta sistemática de se empregar as ventosas como equipamento ativo de proteção contra o golpe de aríete, ressalvados os cuidados acima, tem viabilizado a construção de muitos sistemas de recalque de pequeno porte os quais, sem essa consideração, ficariam de sobremaneira caros e inviabilizados de serem construídos.

No caso de sistemas de esgotos sanitários existe um tipo especial de ventosa para trabalhar com este tipo de líquido.

b) Válvulas de Alívio

As *válvulas de alívio* são dispositivos de proteção destinados a reduzir os efeitos das sobrepressões indesejáveis nas instalações de recalque, sendo normalmente colocadas imediatamente a jusante dos equipamentos da estação elevatória, de preferência imediatamente a jusante da Válvula de Retenção (VR). Seu funcionamento compreende a abertura da válvula durante os períodos de sobrepressão, liberando a água para manter as sobrepressões dentro de valores tolerados pelas canalizações.

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Uma restrição que se faz é que a válvula deve abrir totalmente antes que a onda de pressão negativa retorne à bomba como onda de pressão positiva num segundo momento.

Nos casos em que não se admitem sobrepressões superiores àquelas da carga de pressão do regime permanente (carga operacional), a válvula deve ser dimensionada para descarregar todo o fluxo para uma carga igual à do regime operacional.

Quando é necessária uma precisão acurada contra o golpe de aríete, ou quando o golpe é provavelmente um problema durante desligamento parcial das bombas em importantes sistemas de recalque, recomenda-se a instalação de duas ou mais válvulas de alívio em paralelo, podendo ser as mesmas ajustadas para atuar a diferentes cargas de pressão.

c) Chaminés de Equilíbrio

As chaminés de equilíbrio são reservatórios em contacto com a superfície livre atmosférica, que são intercalados ao longo das linhas adutoras, destinados a reduzir a intensidade do golpe de aríete nas canalizações a partir da divisão do comprimento da adutora em dois trechos, cujos comportamentos hidráulicos serão diferenciados no momento da ocorrência do transitório.

No caso de linhas adutoras de estações elevatórias, o trecho de jusante em relação à chaminé de equilíbrio, ou trecho protegido da adutora, sofre um processo de *oscilação de massa* durante o transitório hidráulico, enquanto que o trecho de montante, ou trecho desprotegido, sofre um processo normal de golpe de aríete por ação da *propagação da onda elástica* quando da interrupção do bombeamento.

A principal vantagem da chaminé de equilíbrio, é a de proporcionar uma proteção adequada ao trecho de jusante da linha de recalque quer nas sobrepressões, quer nas subpressões, diminuindo substancialmente os efeitos do golpe de aríete na canalização.

Sua principal desvantagem reside no fato de requerer uma topografia favorável para sua instalação, o que nem sempre é disponível, principalmente em linhas adutoras de estações elevatórias. O uso mais comum de chaminés de equilíbrio se dá na proteção de tubulações de alimentação de turbinas em usinas hidrelétricas.

Uma variante muito útil da chaminé é o *stand pipe* ou tubo-em-pé que consiste numa tubulação colocando em linha na posição vertical e com altura adequada, ficando seu topo acima da linha piezométrica de regime permanente e da linha envoltória de sobrepressões máximas. O *stand pipe* desempenha o mesmo papel de uma chaminé de equilíbrio, porém com menor seção transversal e sem clapet na entrada, conectada diretamente com a linha a proteger.

d) Tanques de Alimentação Unidirecionais ou “One-Way”

Os tanques de alimentação unidirecionais (TAU) ou One-Ways, tem o objetivo de evitar a formação de subpressões indesejáveis na tubulação estando durante o funcionamento normal do sistema, ficando separados da tubulação de recalque por meio de uma válvula de retenção, abrindo-se esta quando ocorre uma depressão na canalização, evitando-se assim que a pressão interna diminua, devendo ser dimensionado para manter a pressão interna sempre superior à tensão de vapor da água à temperatura do bombeamento.

O tanque é alimentado por um “by-pass” servido de um flutuador ou registro automático de entrada. Normalmente são empregados em pontos elevados da linha de recalque, podendo ser únicos ou distribuídos em seqüência ao longo da tubulação.

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF
SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE
ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

A vantagem do sistema de one-ways em relação à chaminé de equilíbrio, é a de poderem ser instalados em condições topográficas mais desfavoráveis, não requerendo grandes alturas construtivas. Sua principal desvantagem é o custo de construção da estrutura (reservatório), peças especiais de controle operacional, e, a formação indesejável de lodo no fundo do reservatório devido à sedimentação dos sólidos em suspensão quando se trata de água bruta, mas que pode ser solucionada pela construção de um sistema de drenagem do lodo. No caso de adutoras de água tratada, minimiza-se essa desvantagem.

e) Reservatório Hidropneumático

O reservatório hidropneumático, é de utilização quase que obrigatória quando o transitório hidráulico pode causar subpressões inaceitáveis ao longo das canalizações que não podem ser solucionadas por sistemas de reservatórios do tipo “one-way”, ou chaminés de equilíbrio, em virtude das cotas topográficas disponíveis.

A restrição maior ao seu uso está associada às exigências rigorosas de operação e manutenção do dispositivo, que às vezes pode não ser implementada durante toda a vida útil da instalação, principalmente quando se trata de instalações de pouca importância que não disponham de um serviço contínuo de manutenção e operação permanentes.

A instalação de um reservatório hidropneumático requer a presença permanente de um sistema compressor de ar destinado a manter uma pressão interna adequada de ar dentro do vaso hidropneumático. Esta condição pressupõe também a instalação de um grupo gerador de forma a manter o sistema em condições operacionais permanentes, mesmo quando da interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Esta restrição pode inviabilizar economicamente seu emprego, requerendo também a presença constante de profissional habilitado para sua operação e manutenção. Uma falha de operação pode causar acidentes indesejáveis caso não haja outros mecanismos de segurança para proteção do sistema.

Na verdade, a proteção mais adequada quase nunca é conseguida com o emprego de um único equipamento numa instalação de recalque de grande importância, mas sim com uma combinação otimizada de equipamentos dimensionada e projetada para cada caso específico.

3.9. Avaliação dos Transientes na Linha de Recalque

Os resultados das simulações sem proteção contra transientes hidráulicos e com equipamentos de proteção contra transientes hidráulicos para a linha de recalque são apresentados posteriormente.

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DAS COMUNIDADES DIRETAMENTE AFETADAS PELO PISF

SISTEMA SÃO MIGUEL - EIXO NORTE

ADUTORA DE ÁGUA TRATADA 01 (AAT 01)

QUADRO DE DIMENSIONAMENTO DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Distância Acumulada (m)	Cota Tubulação (m)	Cargas (m)					Pressões (m)				Material	Observação
		Regime Permanente	Regime Transiente sem proteção		Regime Transiente com proteção		Sistema sem proteção		Sistema com proteção			
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima		
0,00	398,28	429,08	451,61	403,54			53,34	5,27	-398,28	-398,28	FoFo k9	EEAT 01
20,00	398,11	429,04	450,73	404,03			52,62	5,92	-398,11	-398,11	PVC DEFoFo	
40,00	398,44	428,99	449,75	404,35			51,31	5,91	-398,44	-398,44	PVC DEFoFo	
60,00	398,76	428,95	448,86	404,69			50,10	5,93	-398,76	-398,76	PVC DEFoFo	
80,00	398,88	428,90	448,41	405,10			49,53	6,22	-398,88	-398,88	PVC DEFoFo	
100,00	399,02	428,86	447,99	405,52			48,97	6,50	-399,02	-399,02	PVC DEFoFo	
120,00	399,22	428,82	447,61	405,95			48,39	6,73	-399,22	-399,22	PVC DEFoFo	
140,00	399,43	428,77	446,87	406,34			47,44	6,91	-399,43	-399,43	PVC DEFoFo	
160,00	400,04	428,73	446,14	406,74			46,10	6,70	-400,04	-400,04	PVC DEFoFo	
180,00	400,65	428,68	445,44	407,16			44,79	6,51	-400,65	-400,65	PVC DEFoFo	
200,00	401,14	428,64	444,83	407,60			43,69	6,46	-401,14	-401,14	PVC DEFoFo	
220,00	401,64	428,60	444,25	408,00			42,61	6,36	-401,64	-401,64	PVC DEFoFo	
240,00	402,18	428,55	443,87	408,42			41,69	6,24	-402,18	-402,18	PVC DEFoFo	
260,00	403,00	428,51	443,99	408,86			40,99	5,86	-403,00	-403,00	PVC DEFoFo	
280,00	403,81	428,46	443,58	409,32			39,77	5,51	-403,81	-403,81	PVC DEFoFo	
300,00	404,40	428,42	443,05	409,80			38,65	5,40	-404,40	-404,40	PVC DEFoFo	
320,00	404,99	428,38	442,58	410,30			37,59	5,31	-404,99	-404,99	PVC DEFoFo	
340,00	405,11	428,33	442,45	410,83			37,35	5,72	-405,11	-405,11	PVC DEFoFo	
360,00	406,12	428,29	442,20	411,37			36,08	5,25	-406,12	-406,12	PVC DEFoFo	
380,00	407,13	428,24	442,04	411,94			34,91	4,81	-407,13	-407,13	PVC DEFoFo	
400,00	407,39	428,20	441,86	412,54			34,47	5,15	-407,39	-407,39	PVC DEFoFo	
420,00	407,66	428,16	441,37	413,17			33,71	5,51	-407,66	-407,66	PVC DEFoFo	
440,00	407,74	428,11	440,84	413,84			33,10	6,10	-407,74	-407,74	PVC DEFoFo	
460,00	407,82	428,07	440,14	414,53			32,32	6,71	-407,82	-407,82	PVC DEFoFo	
480,00	407,88	428,02	439,37	415,33			31,49	7,45	-407,88	-407,88	PVC DEFoFo	
500,00	407,95	427,98	439,08	416,18			31,14	8,24	-407,95	-407,95	PVC DEFoFo	
520,00	408,22	427,94	438,77	417,01			30,55	8,79	-408,22	-408,22	PVC DEFoFo	
540,00	408,50	427,89	438,06	417,62			29,56	9,12	-408,50	-408,50	PVC DEFoFo	
560,00	408,80	427,85	437,18	418,59			28,38	9,79	-408,80	-408,80	PVC DEFoFo	
580,00	409,10	427,80	436,03	419,73			26,93	10,63	-409,10	-409,10	PVC DEFoFo	
600,00	409,37	427,76	435,00	420,67			25,63	11,30	-409,37	-409,37	PVC DEFoFo	
620,00	409,64	427,72	434,33	421,47			24,69	11,83	-409,64	-409,64	PVC DEFoFo	
640,00	409,79	427,67	432,77	423,03			22,98	13,24	-409,79	-409,79	PVC DEFoFo	
660,00	409,94	427,63	430,86	424,92			20,92	14,98	-409,94	-409,94	PVC DEFoFo	
680,00	410,03	427,58	428,86	426,89			18,83	16,86	-410,03	-410,03	PVC DEFoFo	
689,80	410,07	427,56	427,87	427,87			17,80	17,80	-410,07	-410,07	PVC DEFoFo	VCV (Q = 11,50 L/s)
689,80	426,07	426,07	427,87	427,87			1,80	1,80	-426,07	-426,07	FoFo k9	REL 01 (100 m³)

Regimes Hidráulicos: Perfil Longitudinal da Adutora de Água Tratada 01 (AAT 01)

