

Celeridade

Capítulo 18-Celeridade

19.1 Introdução

A celeridade de propagação da onda de pressão através da tubulação é representada normalmente pela letra “a” conforme Tullis, 1989. A equação da celeridade da ABNT NB 591/91 é a mesma de Tullis.

$$a = (K/\rho)^{0,5} / (1 + K.D.\Psi / E.e)^{0,5}$$

Sendo:

a= celeridade da propagação da onda de pressão (m/s)

ρ = massa específica da água doce a 20°C (kg/m³)=998,2 kg/m³=9789 N/m³

D= diâmetro interno do tubo (mm)

e= espessura da parede do tubo (mm)

K= módulo de elasticidade volumétrica da água (GPa)= 2,20 GPa a 20°C (Streeter. 1982)

$$K = 2,20 \text{ GPa} = 2,20 \times 10^9 \text{ Pa}$$

E= módulo de elasticidade linear do material de que é feito o tubo (GPa) conforme Tabela (18.1)

Ψ = fator relativo à fixação do conduto

μ = coeficiente de Poisson do material de que é feito o tubo (adimensional) conforme Tabela (18.1)

O fator relativo a fixação do conduto pode ter três casos conforme Tullis, 1989:

Caso 1: O tubo é ancorado somente no final

$$\Psi = 1 - 0,5 \mu$$

Caso 2: O tubo é ancorado contra qualquer movimento longitudinal em toda a sua extensão (conduto enterrado)

$$\Psi = 1 - \mu^2$$

Caso 3: Cada tubo é ancorado com juntas de dilatação ou em todo o trecho.

$$\Psi = 1$$

Tullis, 1989 salienta que a diferença entre a celeridade da onda devido a fixação do conduto não passa de 10%. As incertezas que entram nos valores das propriedades do tubo e da água geralmente nos mostram que podemos usar sempre o Caso 3 com $\Psi=1$.

Para água a 20°C:

$$(K/\rho)^{0,5} = (2,20 \times 10^9 / 998,2)^{0,5} = 1485$$

O valor da velocidade da onda quando E= infinito é a=1485m/s

$$a = (K/\rho)^{0,5} / (1 + K.D.\Psi / E.e)^{0,5}$$

Adotando: $\Psi=1$

$$a = 1485 / (1 + K.D / E.e)^{0,5}$$

Exemplo 18.1- baseado em Tullis, 1989

Tubo de concreto carrega água a 20°C e $\mu=0,3$

D= 610mm

e= 76mm (espessura)

E= 27,6 GPa (concreto)

K=2,20 GPa (água a 20°C)

$$a = (K/\rho)^{0,5} / (1 + K.D.\Psi / E.e)^{0,5}$$

$$a = 1483 / (1 + K.D.\Psi / E.e)^{0,5}$$

$$K.D / E.e = 2,24 \times 610 / 27,6 \times 76 = 0,65$$

$$a = 1483 / (1 + 0,65.\Psi)^{0,5}$$

Caso 1:

$$\Psi = 1 - 0,5 \mu = 1 - 0,5 \times 0,3 = 0,85$$

$$a = 1483 / (1 + 0,65 \times 0,85)^{0,5}$$

$$a = 1193 \text{ m/s}$$

Caso 2:

$$\Psi = 1 - \mu^2 = 1 - 0,3^2 = 0,91$$

$$a = 1483 / (1 + 0,65 \times 0,91)^{0,5}$$

$$a = 1179 \text{ m/s}$$

Caso 3:

$$\Psi = 1$$

$$a = 1483 / (1 + 0,65 \times 1,0)^{0,5}$$

$$a = 1158 \text{ m/s}$$

Como se pode concluir do presente exemplo fornecido por Tullis, 1989 as variações da velocidade de propagação são muito pequenas quando se utilizam um dos três casos de fixação do conduto e devido a isto é que na prática se considera como $\Psi=1$.

Nota:

$$1 \text{ psi} = 6,89 \text{ kPa} = 0,704 \text{ mH}_2\text{O} = 0,0680 \text{ atm} = 2,31 \text{ ftH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$$

Tabela 18.1- Valores do coeficiente K em função do material da tubulação

Material	Módulo de elasticidade E (GPa)	K/E	Coeficiente de Poisson μ () NB591 / 91
Tubo de aço	207	0,0106	0,30 (0,27)
Ferro fundido	90	0,0243	0,25 (0,25)
Tubo de ferro fundido dúctil	172	0,0127	0,28 (0,25)
Tubos de concreto	20 a 30	0,1095 a 0,073	0,15 (0,13)
Concreto protendido	30 a 60	0,073 a 0,0365	0,25
Tubos de PVC	3,3	0,6636	0,45 (0,45)
Tubos de PE de alta densidade	0,80	2,7375	0,46 (0,45)
Tubos de PVC reforçado com fibra de vidro	50	0,0438	0,35 (0,35)
Rocha- granito	50	0,0438	0,28

Fonte: Koelle e Almeida, 1992

Exemplo 18.2

Calcular a velocidade de propagação “a” de uma tubulação de aço com D=1016mm e espessura 5/16” e=7,96mm, K/E=0,0106 conforme Tabela (18.1).

D/e= 1016mm/ 7,96mm=127,64

$$a = 1483 / (1 + K.D / E.e)^{0,5}$$

$$a = 1483 / (1 + 0,0106 \times D / e)^{0,5}$$

$$a = 1483 / (1 + 0,0106 \times 127,64)^{0,5}$$

$$a = 969 \text{ m/s}$$

18.2 Celeridade para diversos diâmetros e materiais.

Elaboramos para facilidade dos cálculos das Tabelas (18.2) a (18.5) com valores da celeridade de diversos tipos de materiais. Foram analisados os tubos de aço, ferro fundido dúctil, PVC e Defofo.

Tabela 18.2- Valores da celeridade de tubos de ao de 711mm a 2540mm

Diâmetro		Espessura e			D/e	(K/E)	Celeridade (m/s)
Polegadas	(mm)	Polegadas	polegadas	(mm)			
28	711	5/16	0,31250	7,94	90	0,0106	1062
30	762	5/16	0,31350	7,96	96	0,0106	1045
32	813	5/16	0,31350	7,96	102	0,0106	1028
36	914	5/16	0,31350	7,96	115	0,0106	996
40	1016	5/16	0,31350	7,96	128	0,0106	967
42	1067	7/16	0,43750	11,11	96	0,0106	1044
48	1219	7/16	0,43750	11,11	110	0,0106	1008
60	1524	7/16	0,43750	11,11	137	0,0106	947
72	1829	7/16	0,43750	11,11	165	0,0106	895
84	2134	1/2	0,50000	12,70	168	0,0106	889
100	2540	5/8	1,00000	15,88	160	0,0106	903

Tabela 18.3- Celeridade de tubos de ferro fundido dúctil de 80mm a 700mm

DN (mm)	Classe do tubo K	DN (mm)	D/e	e (mm)	(K/E)	Celeridade (m/s)
80	9	73,96	12	6,04	0,0127	1380
100	9	93,90	15	6,10	0,0127	1356
150	7	144,80	28	5,20	0,0127	1275
200	7	194,65	36	5,35	0,0127	1226
250	7	244,50	44	5,50	0,0127	1186
300	7	294,35	52	5,65	0,0127	1150
400	7	393,70	62	6,30	0,0127	1107
500	7	493,00	70	7,00	0,0127	1077
600	7	592,30	77	7,70	0,0127	1055
700	7	691,60	82	8,40	0,0127	1037

Tabela 18.4- Celeridade de tubos de PVC classe 6,3 de 80mm a 700mm

DN	PVC 6,3	Tubos de PVC		D/e	Valor K/E	Celeridade (m/s)
	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro interno (mm)			
50	60	4,3	55,7	13	0,6636	479
75	85	6,1	78,9	13	0,6636	479
100	110	7,8	102,2	13	0,6636	476

Tabela 18.5- Celeridade de tubos de PVC classe 12 de 100mm a 400mm

	PVC 12 Defofo					Celeridade
DN	Diâmetro externo	Espessura (mm)	Diâmetro interno (mm)	D/e	Valor K/E	(m/s)
100	118	4,8	113,2	24	0,6636	363
150	170	6,8	163,2	24	0,6636	360
200	222	8,9	213,1	24	0,6636	361
250	274	11,0	263,0	24	0,6636	361
300	326	13,1	312,9	24	0,6636	361
400	429	17,2	411,8	24	0,6636	361

18.3 Bibliografia

- 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 et al. *Abastecimento de água para consumo humano*. Editora UFMG, 2006, 859 páginas.
- INTERNET Prof. Carlos Fernandes acessado em 20 de março de 2007
[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.
- INTERNETET <http://www.saneamento10.hpg.ig.com.br/>
- KOELLE, EDMUND e ALMEIDA, A. BETÂMIO. *Fluid transients in pipe networks*. Computational Mechanics Publications, 1992, 564 páginas.
- 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 enginners*. 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, 266 páginas.
- 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.

RPVC

T (°C)	Classe de Pressão (Kg/cm ²)									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18*	20*
40	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
60	-	-	4	6	8	9	10	12	13	-
80	-	-	-	4	6	7	8	10	11	-

* Valores para pressões elevadas.

As classes de pressão são definidas nas seguintes classes de pressão:

2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 20. As classes de pressão são definidas nas classes 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 20 de 10 kg/cm², mediante consulta prévia à norma técnica de referência.

DADOS TÉCNICOS

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS TUBOS RPVC

Características	Valores aproximados		Unidade
	RPVCUE	RPVCUR	
Densidade	1,40 - 1,50	1,51 - 1,64	g/cm ³
Módulo de tração axial	40.000 - 60.000	57.000 - 100.000	g/cm ²
Módulo de flexão circunferencial	80.000 - 100.000	88.000 - 180.000	kg/cm ²
Módulo de flexão axial	28.000 - 50.000	51.000 - 90.000	kg/cm ²
Módulo de flexão circunferencial	54.000 - 102.000	88.000 - 162.000	kg/cm ²
Resistência à tração axial	700 - 1.000	1.000 - 1.800	kg/cm ²
Resistência à tração circunferencial	1.000 - 3.200	1.600 - 3.200	kg/cm ²
Resistência à flexão axial	600 - 800	800 - 1.400	kg/cm ²
Resistência à flexão circunferencial	800 - 2.000	1.400 - 2.000	kg/cm ²
Fator de escoamento (Coeficiente de Hazen & Williams)	150	150	-
Condutividade térmica	0,18 - 0,44	0,18 - 0,44	kcal/h.m.°C
Coeficiente de dilatação térmica linear	35 x 10 ⁻⁶	54 x 10 ⁻⁶	m/m°C
Alongamento à ruptura	2,0	2,0	%

TUBO RPVCUE



Fig. 10 - RPVC / UE/PE

DN	DIMENSÕES						
	Referência interna mm	e	di mm	DE mm	B mm	L mm	Massa-Aprox. CL 10 kg
60	2		47,6	48	66	6.000	40
75	3		72,1	72	70	6.000	70
100	4		98,0	118	70	6.000	16,0
150	6		145,0	179	80	6.000	35,0
200	8		195,0	229	100	6.000	68,0
250	10		244,0	278	100	6.000	100,0
300	12		295,0	328	100	6.000	140,0
350	14		342,0	378	100	6.000	200,0
400	16		391,0	428	100	6.000	270,0
450	18		441,0	478	100	6.000	350,0
500	20		490,0	528	100	6.000	450,0
600	24		592,0	628	100	6.000	680,0
700	28		690,0	728	100	6.000	1000,0