



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CLÁUDIO HENRIQUE MILFONT DE MAGALHÃES

**TUBOS E DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA UTILIZADOS PARA MINIMIZAR OS  
EFEITOS DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM ADUTORAS**

Recife

2018

CLÁUDIO HENRIQUE MILFONT DE MAGALHÃES

**TUBOS E DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA UTILIZADOS PARA MINIMIZAR OS  
EFEITOS DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM ADUTORAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Recife

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

M189t Magalhães, Cláudio Henrique Milfont de.  
Tubos e dispositivos de segurança utilizados para minimizar os efeitos dos transientes hidráulicos em adutoras. / Cláudio Henrique Milfont de Magalhães - 2018.  
224folhas, Il.; Tab.; Abr.; Sigl. e Simb.

Orientador (a): Profº. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Transientes hidráulicos. 3. Golpe de aríete.  
4. Método das características. 5. Allievi.6. Dispositivos de proteção. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2019-09

CLÁUDIO HENRIQUE MILFONT DE MAGALHÃES

**TUBOS E DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA UTILIZADOS PARA MINIMIZAR OS  
EFEITOS DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM ADUTORAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 14/ 08 / 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profº. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr. Antônio José Trigo Relvas (Examinador Externo)

Engeconsult

Abel e Socorro.

Karla.

Ian, Iasmin e Lucas.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, aos meus pais, a minha família e ao meu orientador e amigo Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

A Deus por me presentear com saúde, inteligência e força de vontade.

A meus pais por me proporcionarem a melhor educação, por moldarem meu caráter e por me ensinar que sem esforço, sem determinação e sem educação não conseguimos nada. Primeiro a obrigação e depois a diversão.

A minha família pela paciência, companheirismo, incentivo e amor. Por entender que as vezes a ausência se fez necessário.

Ao meu orientador e amigo por acreditar em mim, pelo incentivo, críticas e sugestões. Principalmente por aceitar o desafio de estudarmos juntos. A todos eu sou grato.

## RESUMO

Muitos engenheiros civis, hidráulicos e sanitaristas se deparam com um fenômeno hidráulico chamado de Golpe de Aríete, gerado por transientes hidráulicos. Este é iniciado quando há alteração no regime de escoamento do fluido, ou seja, alteração da velocidade e/ou vazão. Esta mudança de regime provoca uma transformação de energia no interior da tubulação. A energia cinética é transformada em energia sonora e energia potencial elástica, com isto surge um barulho característico denominado Golpe de Aríete e deformação além do regime elástico do material da adutora o que pode provocar a ruptura do tubo. Em Limoeiro/PE existia uma adutora de água tratada que saía da Estação de Tratamento de Água em direção aos três Reservatórios Apoiados que abastecem a cidade. A tubulação era toda feita em cimento amianto com diâmetro nominal de 225mm, com extensão de aproximadamente 520m. Em 2011 foi projetada uma adutora em Ferro Fundido Dúctil (FOFO) K7 DN 250 com extensão aproximada de 515m com duas ventosas de alto desempenho e com desnível geométrico de 65m. No projeto houve somente dimensionamento do diâmetro, da escolha do material e visita *in loco* para escolha do melhor local para colocação das ventosas. O tubo FOFO está presente no saneamento e na hidráulica aqui no Brasil desde 1910. Os tubos de PVC vêm sendo utilizados no Brasil desde 1975 e os tubos em Policloreto de Vinila Orientado (PVC-O) estão disponíveis no mercado brasileiro desde de 2014. As simulações computacionais, realizadas no Software livre Allievi, compararam o comportamento mecânico e hidráulico do tubo em FOFO frente ao tubo em PVC-O. As variáveis estudadas foram a subpressão e a sobrepressão que são as mais importantes quando um fluido está em regime transitório. Os resultados mostraram que o tubo polimérico poderia ser utilizado na adutora junto com uma ventosa de alto desempenho em vez de ser usado o tubo metálico com duas ventosas.

**Palavras-chave:** Transientes Hidráulicos. Golpe de Aríete. Método das características. Allievi. Dispositivos de Proteção.

## ABSTRACT

Many civil, hydraulic and Sanitarians engineers are conjoined with a hydraulic phenomenon called a water ram, generated by hydraulic transients. This is initiated when there is a change in the flow system, i.e. change of speed and/or flow. This regime change causes an energy transformation inside the pipe. The kinetic energy is transformed into sound energy and elastic potential energy, with this arises a characteristic noise called battering ram and deformation beyond the elastic regime of the pipeline material which can cause the rupture of the tube. In Limoeiro/PE There was a pipeline of treated water that exits the water treatment plant towards the three supported reservoirs that supply the city. The pipe was all made of asbestos cement with nominal diameter of 225mm, with an extension of approximately 520m. In 2011 a pipeline (fluffy) K7 DN 250 was designed with an approximate extension of 515m with two high-performance suction cups and a geometric 65m. In the project there was only dimensioning of the diameter, of the choice of the material and visit in loco to choose the best place for the placement of the suction cups. The fluffy tube is present in sanitation and hydraulics here in Brazil since 1910. PVC tubes have been used in Brazil since 1975 and the tubes in vinyl-oriented polyvinyl chloride (PVC-O) are available in the Brazilian market since 2014. The computational simulations, performed in the free Software Allievi, compared the mechanical and hydraulic behavior of the tube in fluffy in front of the PVC-o tube. The variables studied were the underpressure and the overpressure that are the most important when a fluid is in transitional regime. The results showed that the polymeric tube could be used in the pipeline along with a high performance suction cup instead of using the metallic tube with two suction cups.

**Key words:** Hydraulic Transients. Water hammer. Method of Characteristics. Allievi. Protective devices.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Método gráfico criado por Schnyder-Bergeron	34
Figura 2 -	Origem dos transientes hidráulicos	36
Figura 3 -	Diagrama de distribuição da sobrepressão ao longo da tubulação, com fechamento rápido	38
Figura 4 -	Diagrama de distribuição da sobrepressão ao longo da tubulação, com fechamento lento	39
Figura 5 -	Efeitos do Golpe de Aríete	40
Figura 6 -	Trecho elementar de uma tubulação	43
Figura 7 -	Linhas características	50
Figura 8 -	Malha cálculo	52
Figura 9 -	Reservatório de nível constante a montante	54
Figura 10 -	Reservatório de nível constante a jusante	55
Figura 11 -	Extremidade fechada a jusante	58
Figura 12 -	Extremidade fechada a jusante	58
Figura 13 -	Extremidade fechada a jusante	60
Figura 14 -	Válvula na extremidade a jusante	62
Figura 15 -	Bomba centrífuga com válvula de retenção situada na extremidade a montante da tubulação	66
Figura 16 -	Componentes e subcomponentes de um sistema de abastecimento de água	72

Figura 17 -	Tempo (s) x Corrente (A) dos métodos de acionamento de CMB	73
Figura 18 -	Classificação das bombas	73
Figura 19 -	Ponto de operação de um sistema elevatório	74
Figura 20 -	Tubulação cortando a linha piezométrica	75
Figura 21 -	Onda de separação de pressão quando há quebra da coluna líquida	76
Figura 22 -	Separação da coluna líquida quando ocorre o desligamento de uma bomba	76
Figura 23 -	Separação de coluna líquida quando ocorre o fechamento de uma válvula	77
Figura 24 -	Separação da coluna líquida dentro de uma tubulação	77
Figura 25 -	Alguns dispositivos utilizados para proteção do CMB contra os efeitos dos transientes hidráulicos	78
Figura 26 -	Esquema de propagação de ondas de pressão quando há parada do CMB	78
Figura 27 -	Frente de onda refletida no reservatório a jusante logo após o desligamento do CMB.	79
Figura 28 -	Ondas de pressão após o desligamento de CMB com e sem volante de inércia	79
Figura 29 -	Elementos utilizados no Allievi	84
Figura 30 -	Tipos de reservatórios incluídos no Allievi	86
Figura 31 -	Estrutura de controle de vazão	93

Figura 32 -	Estruturas de proteção	100
Figura 33 -	Esquema da classificação dos materiais	106
Figura 34 -	Tubos metálicos	109
Figura 35 -	Tubos não-metálicos	110
Figura 36 -	Matriz ferrítica: ferro fundido nodular	112
Figura 37 -	Fabricação de tubo de ferro fundido dúctil no início do século XIX	117
Figura 38 -	Processo de fabricação de tubo de ferro fundido dúctil atualmente	118
Figura 39 -	Processo de fabricação atual	119
Figura 40 -	Processo de fabricação atual cimentação	119
Figura 41 -	Diagrama deformação x tensão de materiais dúcteis	119
Figura 42 -	Processo de fabricação de tubo em aço-carbono com solda helicoidal	122
Figura 43 -	Tubos em aço carbono soldados	122
Figura 44 -	Relação DN x e	124
Figura 45 -	Ensaio Holiday detector em tubo de aço carbono	125
Figura 46 -	Desenho esquemático do equipamento Holiday Detector	125
Figura 47 -	Relação entre deformação e tempo	129
Figura 48 -	Tensão versus deformação para polímeros a) frágeis, b) plásticos e c) elastômeros	130
Figura 49 -	Comportamento elástico de um polímero	131

Figura 50 -	Comportamento plástico de um polímero – tensão máxima	131
Figura 51 -	Máquina para solda de topo em tubo PEAD	133
Figura 52 -	Equipamento utilizado para realizar solda de topo em tubos PEAD	133
Figura 53 -	Tubo PEAD DN 630, assentado, com solda de topo	134
Figura 54 -	Equipamento para realiar solda por eletrofusão de tubo PEAD	135
Figura 55 -	Junta mecânica para tubo PEAD	135
Figura 56 -	Processo de fabricação do composto de PVC	137
Figura 57 -	Representação esquemática de uma extrusora	139
Figura 58 -	Processo de extrusão de tubos de PVC	139
Figura 59 -	Pressão de ruptura real	144
Figura 60 -	Acomodação do anel na bolsa do tubo de ferro	145
Figura 61 -	Pressão de contato da junta elástica x Pressão do fluido	146
Figura 62 -	JTI (Junta Travada Interna)	147
Figura 63 -	Anel da JTI	147
Figura 64 -	Junta Travada Externa	148
Figura 65 -	Junta Travada Externa montada	148
Figura 66 -	Representação da deflexão em adutora	149
Figura 67 -	Tubo aço carbono ponta e bolsa com junta elástica	152
Figura 68 -	Tubo aço carbono ponta e bolsa com junta soldada	153

Figura 69 -	Acoplamento tipo K	155
Figura 70 -	Tubo de aço carbono sobre suportes	155
Figura 71 -	Tubo DEFOFO	157
Figura 72 -	Características dimensionais tubo DEFOFO	158
Figura 73 -	Resistência do material a 50 anos a 20°C	160
Figura 74 -	Localização das informações no tubo	160
Figura 75 -	Curva de regressão	162
Figura 76 -	Características dos tubos termoplásticos	163
Figura 77 -	Resistência a fadiga	164
Figura 78 -	Ventosa automática simples	170
Figura 79 -	Ventosa combinada	170
Figura 80 -	Ventosa cinética	171
Figura 81 -	Gráfico para escolha da ventosa	173
Figura 82 -	Tanque hidropneumático, 70m <sup>3</sup> cada	175
Figura 83 -	Fabricação do corpo do Tanque hidropneumático	177
Figura 84 -	Teste de estanqueidade da bexiga	177
Figura 85 -	Reservatório hidropneumático pronto para ser usado	178
Figura 86 -	Válvula antecipadora de onda	179
Figura 87 -	Instalação da Válvula Antecipadora de Onda	179
Figura 88 -	Diagrama de montagem da VAO	180

Figura 89 -	Válvula quebra vácuo VAG	184
Figura 90 -	Taxa de entrada de ar	187
Figura 91 -	Projeto da válvula quebra vácuo VAG	188
Figura 92 -	Mapa de Pernambuco	189
Figura 93 -	Posição relativa a Recife	190
Figura 94 -	Vista parcial da adutora, blocos de ancoragem e acesso	192
Figura 95 -	Perfil longitudinal do terreno	193
Figura 96 -	Nós e cotas	194
Figura 97 -	Reservatórios	194
Figura 98 -	Esquema geral da adutora simulada	195
Figura 99 -	Tubos de ferro fundido dúctil	195
Figura 100 -	Dados gerais de cálculo	196
Figura 101 -	Tubos em PVC-O	196
Figura 102 -	Válvulas gaveta	197
Figura 103 -	Envoltória do tubo FOFO K7 DN 250 sem proteção	199
Figura 104 -	Envoltória do tubo PVC-O classe 16 DN 250 sem proteção	201
Figura 105 -	Envoltória do tubo FOFO K7 DN 250 com proteção	203
Figura 106 -	Pressão nas ventosas V1 e V2	204
Figura 107 -	Volume de ar admitido pelas ventosas V1 e V2	205
Figura 108 -	Volume de ar expulso pelas ventosas V1 e V2	206

Figura 109 - Envoltória do tubo PVC-O classe 16 DN 250 com proteção	208
Figura 110 - Pressão nas ventosas V1 e V2 PVC-O	209
Figura 111 - Volume de ar admitido pelas ventosas V1 e V2 PVC-O	210
Figura 112 - Volume de ar expulso pela ventosa V1	211

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Tipos de ferro fundido	113
Tabela 2 -	Propriedades de ferros fundidos nodulares de acordo com a Norma Técnica ABNT-6916/1981	116
Tabela 3 -	Densidade do polietileno	127
Tabela 4 -	Pressão mínima do teste hidrostático para tubo de ferro fundido dúctil	140
Tabela 5 -	Terminologia utilizada para pressão em tubos de ferro fundido dúctil	141
Tabela 6 -	Deflexão máxima por diâmetro	150
Tabela 7 -	Informações dimensionais para o tubo em aço carbono bolsa e ponta - junta elástica	153
Tabela 8 -	Informações dimensionais para o tubo em aço carbono bolsa e ponta - junta soldada	154
Tabela 9 -	Dimensional tubo DEFOFO	157
Tabela 10 -	Informações dimensionais do tubo PVC-O	160
Tabela 11 -	Minimum Required Strenght (MRS) para cada tipo de tubulação	165
Tabela 12 -	Relação DE / e	166
Tabela 13 -	Fator de redução de pressão em função da temperatura de operação	167
Tabela 14 -	Componentes para montagem da VAO	180

Tabela 15 - Dimensional válvula quebra vácuo VAG – PN 25	185
Tabela 16 - Dimensional válvula quebra vácuo VAG - PN 16	185
Tabela 17 - Dimensional válvula quebra vácuo VAG - PN 10	186
Tabela 18 - Descrição peças válvula quebra vácuo VAG	188

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
CMB	Conjunto Motor-Bomba
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
DEFOFO	Diâmetro Externo de Ferro Fundido
EE	Estação Elevatória
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno
FOFO	Ferro Fundido Dúctil
MOC	Método das Características – Method of Characteristics
MRS	Minimum Required Strength
NBR	Norma Brasileira
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEMD	Polietileno de Média Densidade
PRFC	Polímero Revestido com Fibra de Carbono
PRFV	Polímero Revestido com Fibra de Vidro
PU	Poliuretano
PVC-O	Policloreto de Vinila Orientado
PVC-U	Policloreto de Vinila não plastificado
SDR	Standard Dimension Ratio – Relação Padrão de Dimensão
TAB	Tanque Alimentador Bidirecional
TAU	Tanque Alimentador Unidirecional
VAO	Válvula Antecipadora de Onda
RAP	Reservatório Apoiado
ETA	Estação de tratamento de água

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção circular da tubulação	m <sup>2</sup>
c	Celeridade da onda	m/s
C <sub>s</sub>	Coeficiente de segurança	-
ε	Módulo de elasticidade de volume	-
ε <sub>R</sub>	Deformação de ruptura (deformação que, se atingida, provoca a ruptura do material)	MPa
F	Fator de atrito de Darcy-Weisbach	-
g	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
h <sub>a</sub>	Sobre pressão ou acréscimo de pressão	mca
h <sub>f</sub>	Termo de atrito	-
h <sub>fs</sub>	Termo de atrito associado ao regime permanente	-
h <sub>fu</sub>	Termo de atrito associado ao regime variável	-
I <sub>o</sub>	Momento de inércia das massas girantes relativamente ao eixo de rotação	N·m
L	Comprimento da tubulação	m
M <sub>m</sub>	Momento motor	N·m
I <sub>o</sub>	Momento atuante sobre as massas girantes da bomba	N·m
M <sub>r</sub>	Momento resistente	N·m
N <sub>i</sub>	Velocidade de rotação da bomba no instante i	m/s
N <sub>i+1</sub>	Velocidade de rotação da bomba no instante i+1	m/s
Q	Vazão através do tubo	m <sup>3</sup> /s
R <sub>m</sub>	Resistência mínima a tração do ferro dúctil	MPa
S	Área da seção do tubo	m <sup>2</sup>
t	Tempo de fechamento da válvula	s
V	Velocidade do fluido	m/s
V <sub>o</sub>	Velocidade inicial do fluxo	m/s
x	Distância ao longo do eixo do tubo a partir de uma origem arbitrária	m
z	Cota topográfica	m
α <sub>b</sub>	Aceleração angular das massas girantes da bomba	rad/s <sup>2</sup>
γ	Peso específico da água	N/m <sup>3</sup>

$\Delta H$	Varição de altura devido à sobre pressão	m
$\Delta p$	Varição de pressão	mca
$\Delta U$	Varição instantânea da velocidade	m/s
$\lambda$	Coeficiente de resistência	-
$\rho$	Densidade do fluido	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_e$	Tensão de escoamento	MPa
$\sigma_R$	Tensão de ruptura (tensão que, se atingida, provoca ruptura do material)	MPa
$\sigma_u$	Tensão última (máxima tensão que se atinge)	MPa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
4.1	HISTÓRIA DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS .....	34
4.2	AVARIAS DEVIDO AOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS .....	36
4.3	MÉTODOS DE CÁLCULO .....	42
4.4	MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS .....	48
4.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E TRANSIENTES HIDRÁULICOS .	54
<b>4.5.1</b>	<b>Condições de contorno .....</b>	<b>55</b>
4.5.1.1	No reservatório de nível constante a montante .....	56
4.5.1.2	No reservatório de nível constante a jusante .....	57
4.5.1.3	Na bomba .....	58
4.5.1.4	Conduto fechado em uma extremidade a jusante .....	59
4.5.1.5	Conexão em série .....	60
4.5.1.6	Conexão ramificada .....	62
4.5.1.7	Válvula na extremidade a jusante do tubo .....	63
4.5.1.8	Bomba centrífuga com válvula de retenção na extremidade a montante da tubulação .....	67
<b>4.5.2</b>	<b>Convergência e estabilidade .....</b>	<b>72</b>
4.6	ESTAÇÃO ELEVATÓRIA .....	74
4.7	SEPARAÇÃO DA COLUNA LÍQUIDA .....	77
4.8	SOFT ALLIEVI .....	82
<b>4.8.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>82</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Fundamentos de cálculos .....</b>	<b>83</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Cálculo do regime permanente .....</b>	<b>85</b>
<b>4.8.4</b>	<b>Elementos do sistema a simular no Allievi .....</b>	<b>86</b>
4.8.4.1	Nó .....	87
4.8.4.2	Reservatórios .....	87
4.8.4.3	Tubulações .....	89
4.8.4.4	Válvulas de ar (Ventosas) em tubulações .....	90

<b>4.8.5</b>	<b>Ruptura de tubulação .....</b>	<b>91</b>
<b>4.8.6</b>	<b>Estações de bombeamento .....</b>	<b>91</b>
4.8.6.1	Bombas com curvas características universais .....	92
4.8.6.2	Bombas com curvas características por pontos .....	93
4.8.6.3	Válvulas de grupo: válvula de retenção .....	93
4.8.6.4	Válvula de grupo: válvula de regulação .....	94
<b>4.8.7</b>	<b>Estruturas de controle de vazão .....</b>	<b>95</b>
4.8.7.1	Válvulas de regulação .....	96
4.8.7.2	Válvulas de retenção .....	97
4.8.7.3	Válvulas de alívio .....	97
4.8.7.4	Válvulas de sobrevelocidade .....	98
4.8.7.5	Perda de carga localizada .....	98
4.8.7.6	Válvula composta (ECQ) .....	99
4.8.7.7	Válvulas automáticas .....	99
<b>4.8.8</b>	<b>Estruturas de proteção .....</b>	<b>101</b>
4.8.8.1	Chaminés de equilíbrio .....	101
4.8.8.2	Tanques Alimentadores Unidirecionais (TAUs) .....	102
4.8.8.3	Reservatórios Hidropneumáticos (RHOs) ou Calderins .....	102
<b>4.8.9</b>	<b>Lei de vazão ou de altura .....</b>	<b>104</b>
4.8.9.1	Lei de vazão .....	104
4.8.9.1.1	<i>Lei de vazão (lei de Q) .....</i>	<i>104</i>
4.8.9.1.2	<i>Lei de vazão por pressão .....</i>	<i>105</i>
4.8.9.2	Lei de altura .....	105
4.8.9.2.1	<i>Lei de altura sem reservatório associado .....</i>	<i>106</i>
<b>5</b>	<b>ENGENHARIA DE MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES NA DIMINUIÇÃO DOS EFEITOS DO GOLPE DE ARÍETE .....</b>	<b>107</b>
5.1	METAIS .....	108
5.2	CERÂMICAS .....	109
5.3	POLÍMEROS .....	109
5.4	COMPÓSITOS .....	110
5.5	MATERIAIS UTILIZADOS EM TUBULAÇÃO DE ÁGUA (ADUTORA) E EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA O GOLPE DE ARÍETE .....	111

<b>5.5.1</b>	<b>Material metálico .....</b>	<b>112</b>
5.5.1.1	Tubo de Ferro Fundido Dúctil .....	113
5.5.1.2	Tubo de Aço Carbono .....	123
<b>5.5.2</b>	<b>Material polimérico .....</b>	<b>127</b>
5.5.2.1	Tubo PEAD .....	128
5.5.2.2	Tubo PVC (DEFOFO e Orientado) .....	138
5.6	PRINCIPAIS TIPOS DE TUBOS UTILIZADOS NA ADUÇÃO DE ÁGUA .....	141
<b>5.6.1</b>	<b>Ferro Fundido Dúctil – FOFO .....</b>	<b>142</b>
<b>5.6.2</b>	<b>Aço carbono – AC .....</b>	<b>153</b>
<b>5.6.3</b>	<b>Diâmetro Externo de Ferro Fundido – PVC DEFOFO .....</b>	<b>158</b>
<b>5.6.4</b>	<b>PVC ORIENTADO – PVC-O .....</b>	<b>160</b>
<b>5.6.5</b>	<b>Polietileno de Alta Densidade – PEAD .....</b>	<b>166</b>
5.7	PRINCIPAIS TIPOS DE DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA MINIMIZAR OS EFEITOS DO GOLPE DE ARÍETE .....	170
<b>5.7.1</b>	<b>Ventosa .....</b>	<b>171</b>
5.7.1.1	Seleção do tamanho de uma ventosa .....	175
<b>5.7.2</b>	<b>Tanque hidropneumático ou Reservatório de Ar Comprimido .....</b>	<b>176</b>
<b>5.7.3</b>	<b>Válvula antecipadora de onda .....</b>	<b>180</b>
<b>5.7.4</b>	<b>Válvula quebra vácuo .....</b>	<b>185</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>191</b>
6.1	DADOS DA LOCALIDADE .....	191
6.1.1	Mapas de situação .....	191
6.1.2	Aspectos fisiográficos – águas superficiais .....	192
6.2	ESTUDO DE CASO: ADUTORA DE LIMOEIRO/PE .....	192
6.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	194
6.4	MATERIAIS UTILIZADOS .....	199
6.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	199
<b>6.5.1</b>	<b>Tudo de Ferro Fundido Dúctil – K7 sem dispositivo de proteção .</b>	<b>200</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Tubo PVC-O sem dispositivo de proteção .....</b>	<b>202</b>
<b>6.5.3</b>	<b>Tubo de Ferro Fundido Dúctil – K7 com dispositivo de proteção .</b>	<b>204</b>
<b>6.5.4</b>	<b>Tubo PVC-O com dispositivo de proteção .....</b>	<b>209</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>214</b>

<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>217</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>219</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos engenheiros civis, hidráulicos e sanitaristas se deparam com um fenômeno hidráulico chamado de Golpe de Aríete, gerado por transientes hidráulicos. Este é iniciado quando há alteração no regime de escoamento do fluido, ou seja, alteração da velocidade e/ou vazão.

Esta mudança de regime provoca uma transformação de energia no interior da tubulação. A energia cinética é transformada em energia sonora e energia potencial elástica, com isto surge um barulho característico denominado Golpe de Aríete e deformação além do regime elástico do material da adutora o que pode provocar a ruptura do tubo.

Os tubos devem ser dimensionados para suportar esta deformação e que ela não seja inelástica e sim elástica. Caso não seja possível, devido a amplitude da deformação, o tubo suportar tamanho esforço, são necessários o dimensionamento e a instalação de dispositivos de proteção ao longo da adutora e em locais onde eles atinjam sua capacidade máxima de proteção.

É importante conhecer as propriedades mecânicas e hidráulicas dos tubos, dos materiais que os constituem e dos dispositivos de proteção, para assim dimensionar a solução mais econômica e que tenha melhor comportamento para aliviar as pressões que são submetidos quando na ocorrência do Golpe de Aríete.

Alguns softwares realizam a simulação hidráulica, com isto é possível avaliar qual o melhor local para instalação dos dispositivos de proteção, qual o melhor material a ser utilizado na tubulação e qual o melhor dispositivo de proteção.

Neste texto será apresentado e detalhado o método matemático recomendado pela Norma NBR12215/2017 (ABNT, 2017), os materiais mais utilizados nos tubos de adutoras e os dispositivos de proteção com melhor resultado na atenuação do transientes hidráulico. Finalizando com um estudo de caso, que foi simulado utilizando

o software livre Allievi, de uma adutora em Ferro Fundido Dúctil (FOFO) comparado com o tubo de PVC-O.

O objetivo geral é analisar os resultados das diversas simulações da adutora ETA-RAP de Limoeiro/PE em função do uso de tubos e dispositivos de proteção tradicionais e dos novos existentes atualmente no mercado.

Os objetivos específicos são:

- i) analisar as simulações do material do tubo utilizado na adutora sem nenhum dispositivo de proteção;
- ii) comparar o comportamento hidráulico da adutora frente ao Golpe de Aríete utilizando um material diferente ao empregado e
- iii) analisar as simulações dos dispositivos de proteção utilizados na adutora.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A análise do transientes hidráulico consta em representar as variáveis dependentes pressão e velocidade, que ocorrem no sistema hidráulico durante os eventos de escoamento transitório, em função das variáveis independentes tempo e posição. Assim, surge a necessidade de utilizar uma matemática mais complexa do que aquela utilizada para regime permanente em virtude do acréscimo da variável independente tempo (STREETER e WYLIE, 1978).

A respeito dos métodos computacionais, diversos autores (STREETER e WYLIE, 1978; CHAUDHRY, 2014) descrevem diferentes metodologias para tratamento matemático do transientes hidráulico, dentre os quais se destacam métodos de diferenças finitas, métodos de elementos finitos e o Método das Características, o qual se baseia em um esquema explícito de diferenças finitas e, segundo todos os autores citados, corresponde ao melhor método devido à sua simplicidade (facilidade de programação) e seus bons resultados.

Para aplicações onde se necessita uma discretização mais detalhada do que aquela proporcionada pelo método das características, que permite apenas uma análise unidimensional do problema, é possível utilizar modelos acoplados, onde uma bomba, por exemplo, pode ser simulada através de um esquema numérico bi ou tridimensional e, após a bomba, o conduto segue modelado por um esquema unidimensional, como o Método das Características. Dessa forma, há um grande ganho computacional ao comparar tal solução com aquela onde o conduto é modelado considerando-se duas ou três dimensões, da mesma forma que a bomba.

Como exemplo, tem-se o trabalho de Wu *et al.* (2015), no qual os autores apresentam a aplicação de um modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics* – fluidodinâmica computacional) acoplado a um modelo baseado no Método das Características para estudar os efeitos do golpe de aríete em uma bomba devido ao rápido fechamento de uma válvula. Dessa forma, o modelo CFD proporcionou o pretendido detalhamento à dinâmica do fluido através da bomba, havendo uma maior aproximação da realidade em relação aos valores de velocidades e pressões dentro da bomba, enquanto que

os condutos e a válvula foram modeladas através do Método das Características, proporcionando as condições de contorno necessárias à simulação da bomba.

A análise do transientes hidráulico é feita, portanto, com o objetivo de conhecer o comportamento do fluido nesses eventos transitórios de forma que as estruturas possam ser dimensionadas considerando pressões e velocidades extremas, fazendo com que a ocorrência desses eventos não traga prejuízos às estruturas. Para tanto, podem ser dimensionadas estruturas com adequada robustez ou podem ser previstos dispositivos que atenuem os efeitos do transientes.

O uso de computadores para resolução das equações que regem o fenômeno do transientes hidráulico teve início no ano de 1960, cerca de 15 (quinze) anos após o final de Segunda Grande Guerra Mundial e da criação do primeiro computador moderno. Vários softwares foram e são utilizados e desenvolvidos para solucionar estas equações que muitas vezes são impossíveis de serem resolvidas de forma analógica.

Nos dias atuais temos várias opções de ferramentas computacionais para resolução e simulação dos transientes hidráulicos, alguns exemplos são:

1. Pipenet, disponível no endereço eletrônico <http://www.sunrise-sys.com>, é possível parametrizar controle de bombas e válvulas e considera a cavitação na tubulação;
2. Hammer, disponível no endereço eletrônico <http://www.bentley.com>, é baseado no método das características;
3. Hytran, disponível no endereço eletrônico <http://www.hytran.net>, é baseado no método das características e emite um aviso em caso de cavitação;
4. Impulse, disponível no endereço eletrônico <http://www.aft.com>, é possível utilizar com vários tipos de fluido, é baseado no método das características e na modelagem computacional pode-se incluir a cavitação;
5. Wanda, disponível no endereço eletrônico <https://www.deltares.nl/en/software/wanda>, é possível parametrizar controle de bombas e válvulas, considera a cavitação e pode ser usado para tubos em pressão e canais, sendo capaz de ser usado para a simulação do enchimento e drenagem de tubos;

6. FlowMaster, disponível no endereço eletrônico <https://www.mentor.com/products/mechanical/flomaster/flomaster/>, é baseado no método das características, tem código aberto em linguagem Fortran e C e também calcula transmissão de calor e simula segmentos de tubos parcialmente vazios;
7. Surge 2000, disponível no endereço eletrônico <http://kypipe.com>, é baseado no método da superposição de ondas;
8. LIQT, disponível no endereço eletrônico <https://geologismiki.gr/products/liqit/>, é baseado no método das características;
9. Allievi, disponível no endereço eletrônico <http://www.allievi.net/allievi-es.php>, é baseado no método das características.

Além dos programas citados acima, vários pesquisadores e universidades em todo o mundo desenvolvem seus próprios programas, utilizando desde o MatLab até a linguagem de programação C. Nesta dissertação será utilizado o software livre Allievi. Por ser livre não há custo de aquisição, não requer computadores robustos para simulação e é de fácil operação, porém, possui algumas limitações na simulação.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Chama-se transientes ou transitório hidráulico, o regime variado que ocorre durante a passagem de um regime permanente para outro regime permanente. Assim, qualquer alteração no movimento ou paralisação eventual de um elemento do sistema dão origem aos chamados fenômenos transitórios. Após a ocorrência da perturbação, como o desligamento de uma bomba, o regime permanente presente antes da perturbação é alterado, dando origem a um regime não permanente que posteriormente passará a um novo estado de permanência (SANTOS e CASTRO, 2018).

Em sistemas de distribuição de água, a análise do fenômeno transitório (Golpe de Aríete) é de fundamental importância, pois, com base nessa análise é possível projetar sistemas que suportem as oscilações de pressão e assim evitar prejuízos econômicos e sociais (vazamentos e desabamentos) (BARBOSA, CASTRO e FERREIA, 2015).

Quando o estado permanente de escoamento em uma adutora é alterado, os valores de velocidade e pressão ao longo da tubulação mudam ao longo do tempo. As ondas de pressão que surgem no momento de alteração do regime de escoamento se deslocam praticamente na velocidade do som, elas dependerão das propriedades elásticas da água e da tubulação (material e espessura da parede) (MAGALHÃES, 2017).

Segundo Castro e Santos (2001), durante o transitório hidráulico, as oscilações de pressão ao longo da canalização ocorrem de maneira brusca, provocando ruídos que se assemelham a pancadas. Por isso, o transitório hidráulico também é comumente denominado de Golpe de Aríete. As sobre pressões e sub pressões que ocorrem durante o transitório hidráulico podem causar sérios problemas à tubulação e seus equipamentos, se estes não forem dimensionados para suportar tais sobrecargas, comprometendo a segurança e o funcionamento do sistema. Desse modo, a quantificação das pressões máximas e mínimas é de fundamental interesse para o projetista, a fim de que este possa dimensionar a tubulação e introduzir equipamentos protetores, cuja finalidade é amortecer as variações de carga, prejudiciais à vida útil da instalação.

Segundo Porto (2006) o escoamento em pressão ou forçado ocorre no interior das tubulações, ocupando integralmente sua área geométrica, sem contato com o meio externo. A pressão exercida pelo líquido sobre a parede da tubulação é diferente da atmosférica e qualquer perturbação do regime, em uma seção, poderá dar lugar a alterações de velocidade e pressão nos diversos pontos de escoamento, mas sem modificações na seção transversal. Tal escoamento pode ocorrer pela ação da gravidade ou através de bombeamento.

Quando o estado permanente de escoamento em uma adutora é alterado, os valores de velocidade e pressão ao longo da tubulação mudam ao longo do tempo. O fechamento rápido de uma válvula converte a energia cinética de escoamento de um fluido em movimento em energia de deformação, gerando um pulso de pressão que se desloca do ponto de fechamento por todos os condutos (MAGALHÃES, 2017).

A velocidade de propagação de uma onda de pressão em uma tubulação contendo um líquido pode ser consideravelmente reduzida se bolhas de ar estão dissolvidas neste líquido. (STREETER e WYLLIE, 1978)

Netto (2015) diz que o caso mais comum de Golpe de Aríete ocorre em tubulação de recalque onde há bombas acionadas por motores elétricos. O golpe se inicia logo após a interrupção de fornecimento de energia elétrica. Neste caso, devido a inércia das partes rotativas dos conjuntos elevatórios a velocidade das bombas começa a diminuir reduzindo-se rapidamente a vazão. A coluna líquida continua a subir pela tubulação de recalque até o momento em que a inércia é vencida pela ação da gravidade. Durante este período, verifica-se uma descompressão no interior da canalização e em seguida ocorre a inversão no sentido de escoamento e a coluna líquida retorna para os conjuntos motor-bomba.

O mesmo autor diz que o cálculo rigoroso do Golpe de Aríete em uma Estação Elevatória (EE) exige o conhecimento prévio de dados relativos aos grupos elevatórios, que influem no fenômeno:

- a) O momento de inércia das partes rotativas da bomba e do motor;
- b) Características internas da bomba e

c) Condição da bomba de recalque e comportamento da onda de pressão.

Com o objetivo de limitar o Golpe de Aríete nas EE, podem ser tomadas as seguintes medidas de proteção:

- a) Instalação de válvulas de retenção ou válvulas especiais de fechamento controlado;
- b) Utilização de tubos com materiais que suportem a pressão máxima prevista e
- c) Adoção de dispositivos limitadores de golpe, tais como descargas;
- d) Utilização de câmaras de ar comprimido;
- e) Uso de dispositivos especiais, como volante de inércia nos conjunto motor-bomba;
- f) Construção de câmaras de compensação ou chaminé de equilíbrio.

Basicamente, um reservatório hidropneumático (RHO) é um tanque contendo água e ar comprimido em seu interior, interligado à adutora, de modo geral junto à estação elevatória. Assim sendo, quando a adutora tende a ser submetida a acréscimos de pressão, a energia correspondente é transmitida ao ar do reservatório que, comprimindo-se, a armazena como energia elástica. Inversamente, quando a adutora tende a ser submetida a decréscimos de pressão, a energia correspondente é transmitida ao ar do reservatório que, distendendo-se, cede-a como energia elástica (VIANNA e NETO, 2017).

Tanques alimentadores bidirecionais (TAB) constituem alternativas para os tanques alimentadores unidirecionais (TAU) em adutoras de sistemas de abastecimento de água de pequeno e médio porte. Apresentam simplicidade construtiva e operacional e seu custo é comparativamente inferior aos dos TAU (VIANNA e NETO, 2016).

O que se tem basicamente é uma coluna cheia d'água, em cuja extremidade superior são instaladas uma válvula de retenção e uma ventosa de pequeno calibre. A válvula de retenção permite a entrada de ar na coluna e impede a saída de água. (VIANNA e NETO, 2016)

Em decorrência da variabilidade da pressão e da possível contração e expansão da tubulação durante o fenômeno transitório, a tubulação e equipamentos podem sofrer com problemas de fadiga, ruptura da tubulação e quebra de equipamentos, além de

danos a pessoas próximas as linhas de distribuição de água (BARBOSA e CASTRO, 2014).

Por isto, para reduzir os problemas citados anteriormente, mecanismos que atenuem esses efeitos devem ser considerados nos projetos de adutoras e redes. Recomenda-se utilizar mecanismos atenuadores de pressão tais como: válvula antecipadora de onda, ventosa, chaminé de equilíbrio, tanque de alimentação unidimensional (TAU), entre outros (BARBOSA e CASTRO, 2014).

A Válvula Antecipadora de Onda (VAO) tem a função de proteger a tubulação e o conjunto de bombas contra os transientes hidráulicos decorrente da parada repentina de bombeamento. A válvula deve ser regulada para funcionar quando a pressão atingir um valor mínimo. Para proteger a bomba contra os problemas decorrentes do efeito transitório, a válvula antecipadora deve ser instalada próximo ao conjunto de bombas (BARBOSA e CASTRO, 2014).

Outro dispositivo utilizado como mecanismo de proteção é a ventosa, que é projetada para admitir ou expulsar automaticamente grandes quantidades de ar durante o enchimento, esvaziamento ou operação de um sistema de adução de água. Assim, a ventosa atua na proteção das sobre pressões e sub pressões. A chaminé de equilíbrio é um dispositivo de proteção utilizado para minimizar os efeitos de fechamento rápido de válvulas ou variações bruscas de vazão em turbinas e bombas. O Tanque de Alimentação Unidirecional (TAU) consiste num reservatório de baixa altura, aberto para atmosfera e dotado de válvula de retenção, que impede a passagem de água da adutora para o reservatório (BARBOSA e CASTRO, 2014).

A VAO além de proteger contra as sobre pressões, atua de forma a estabilizar mais rapidamente a pressão em toda a tubulação, contribuindo, assim, para minimizar os efeitos decorrentes do Golpe de Aríete. Um fechamento repentino ocasiona a formação de onda de sobre pressão, isso ocorre devido à desaceleração repentina do escoamento, podendo ser evitada com um intervalo do tempo de fechamento próximo de 30 segundos (BARBOSA e CASTRO, 2014).

Os materiais mais comuns aplicados na construção de adutoras de médio e grande porte são ferro fundido, aço e mais recentemente o Polietileno de Alta Densidade – PEAD. Todos tem vantagens e desvantagens por tipo de obra. O que mais importa na escolha do material para execução da adutora, além do custo, certamente é a facilidade executiva, segurança operacional e a viabilidade financeira do empreendimento (SILVA, FRANÇA e PÊPE, 2017).

O tipo de material utilizado na tubulação de uma adutora também influencia na sua pressão de serviço e a celeridade do deslocamento do Golpe de Aríete. Estes parâmetros impactam no custo, tendo em vista a maior ou menor necessidade de dispositivos de proteção contra transientes hidráulicos a serem instalados nestas linhas (SILVA, FRANÇA e PÊPE, 2017).

Para dimensionamento de uma tubulação devemos saber que a pressão de cálculo em regime permanente deve ser menor ou igual a pressão de serviço admissível e que a Pressão máxima de cálculo tem de ser menor que a Pressão máxima de serviço.

Os tubos de PVC vêm sendo utilizados no Brasil desde 1975, ou seja, quando o ferro fundido já tinha 65 anos de uso no país um novo material chegou como opção. Em 41 anos houve muito progresso nas resinas e nas resistências mecânicas e hidráulicas dos tubos de PVC (MAGALHÃES, 2016).

O tubo de Ferro Fundido Dúctil está presente no saneamento e na hidráulica aqui no Brasil desde 1910. Desde então vem evoluindo, principalmente na modularização dos revestimentos interno e externo. Os tubos de PVC vêm sendo utilizados no Brasil desde 1975, ou seja, quando o ferro fundido já tinha 65 anos de uso no país um novo material chegou como opção. Em 41 anos houve muito progresso nas resinas e nas resistências mecânicas e hidráulicas dos tubos de PVC (MAGALHÃES, 2016).

## 4 METODOLOGIA

Por início dos estudos dos transientes hidráulicos desta dissertação, será feita uma breve introdução histórica do assunto antes de detalhar o método utilizado pelo *software* Allievi, que é o Método das Características – MOC.

### 4.1 História dos transientes hidráulicos

Os fenómenos transitórios dos escoamentos começaram a ser estudados por Young em 1808, quando a investigação da propagação de ondas de pressão em tubulação deu os primeiros passos. Helmholtz, sensivelmente na mesma época, foi o primeiro a indicar que a velocidade das ondas de pressão em água confinada em um tubo é menor do que aquela não confinada, salientando que essa diferença advém da elasticidade das paredes da tubulação. Manabrea, prosseguindo o ímpeto criado com estes trabalhos, iniciou, em 1858, o estudo do Golpe de Aríete, utilizando pela primeira vez essa designação para identificar o regime transitório em tubos e estabelecendo pela primeira vez as equações que deduzem o valor das sub pressões em canalizações por gravidade. Contudo, alguma literatura atribui esse feito a Michaud, que fez uma análise, utilizando chaminés de equilíbrio e válvulas de controle, ao choque hidráulico (ANDERSON, 1976; CHAUDHRY, 2014).

Apesar de Weston, Carpenter e Friezell terem desenvolvido, em 1897, estudos que examinam a relação entre as variações de pressão e a velocidade, foi só com o seu contemporâneo Jowkowsky que se começaram a realizar os primeiros trabalhos importantes, do ponto de vista de engenharia, quando este analisou o fenómeno em ensaios sistemáticos de redes de abastecimento de água. Em 1898, com a formulação da “Equação Fundamental do Choque Hidráulico”, que é conhecida também por “Equação de Jowkowsky”, “Equação de Allievi” ou “Equação de Allievi-Jowkowsky”, deu uma grande contribuição para o estudo do fenómeno. Estas fórmulas são apresentadas em 1 e 2 “Fórmula de Frizell-Joukowsky”.

$$\Delta P = \pm \rho \cdot c \cdot \Delta U \quad (1)$$

Ou

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\pm \rho \cdot c \cdot \Delta U}{\gamma} = \pm \frac{c \cdot \Delta U}{g} \quad (2)$$

Onde:

$c \rightarrow$  celeridade da onda (m/s);

$\Delta P \rightarrow$  variação de pressão provocada pelo fechamento brusco de uma válvula (mca);

$\gamma \rightarrow$  peso específico da água (N/m<sup>2</sup>);

$g \rightarrow$  aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$\Delta H \rightarrow$  variação da carga hidráulica (m);

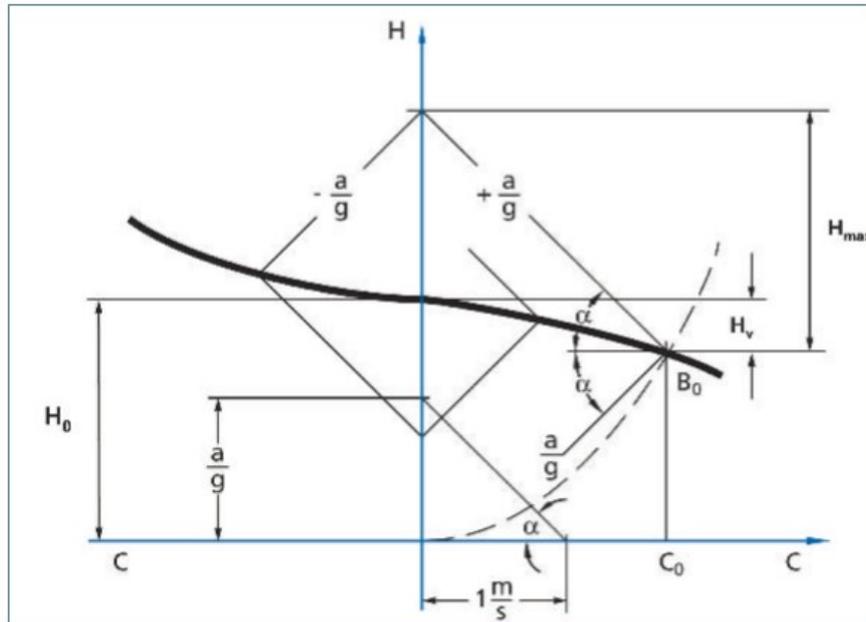
$\Delta U \rightarrow$  variação instantânea da velocidade (m/s)

Estas fórmulas não consideram vários aspectos na sua dedução, tais como as perdas de cargas contínuas, cavitação e ruptura da veia líquida, lei não uniforme de velocidades, existência de bolsas de ar acumulado e ainda vibrações na tubulação e nos equipamentos associados.

Na mesma época apareceu a teoria geral do choque hidráulico de Allievi, desenvolvida desde os princípios básicos publicados em 1902. Allievi, ao analisar casos importantes, especialmente os relacionados com manobras lineares de válvula, apresentou as suas fundamentações teóricas de um modo bastante detalhado. Porém, não considera as perdas de cargas e com isso pode apresentar falhas em casos práticos. Os trabalhos de Allievi serviram de base para muita investigação realizada nas décadas seguintes, destacando-se a de Jeager e Favre nos anos 30.

Na mesma década surge o método gráfico de Schyder-Bergeron. Este método é fruto da necessidade de compreensão do fenômeno em sistemas mais complexos. É um método ainda bastante utilizado pois, considera mesmo de forma aproximada as perdas de carga e as condições de fronteira (condições de contorno), a figura 1 mostra o gráfico.

Figura 1 - Método gráfico criado por Schnyder-Bergeron



Fonte: Salete (2018)

#### 4.2 Avarias devido aos transientes hidráulicos

Quando os sistemas não estão adequadamente protegidos surgem pressões negativas ou sub pressões durante os transientes hidráulicos. As pressões negativas devem sempre ser evitadas, geram grandes tensões nas paredes da tubulação, superiores as máximas admissíveis e as pressões normais de operação. As pressões negativas podem colapsar as paredes das tubulações independente do material de fabricação, ferro fundido dúctil, aço, PVC, PEAD e outros.

Porém o problema mais importante ocorre nas uniões das tubulações, já que não são projetadas para trabalhar com pressões negativas. Existem diferentes tipos de uniões nas tubulações, a seguir mencionamos sua capacidade de resistir às pressões negativas:

- União elástica, com vedação em anel de borracha EPDM (tubos PVC, PRFV, ferro fundido dúctil): capacidade nula frente a as pressões negativas, o anel de borracha se descoloca pela ação das pressões negativas e o tubo perde estanqueidade.

- União flangeada (ferro fundido e aço): maior capacidade frente as pressões negativas, porém no caso de pressões negativas elevadas podem perder a estanqueidade.
- União por eletro ou termo fusão (PEAD): alta resistência as pressões negativas já que não possuem conexões de união, porém a parede do tubo pode colapsar pela ação das pressões negativas, resistência variável dependendo do SDR do tubo.

Assim, mesmo quando os valores de pressão negativa alcançam a pressão de vapor a temperatura ambiente, acontece o fenômeno da cavitação. Ao alcançar este valor de pressão negativa a água é vaporizada e quando a pressão volta a subir, a água ingressa na cavidade de vapor e colide com as suas bordas resultando em picos elevados de pressão. Estes picos são ocasionados pelo colapso da cavidade de vapor. Nestas condições estarão presentes de forma combinada alternativamente picos de pressão e vácuo, produzindo grande avaria ao sistema. A principal dificuldade está em calcular com precisão os valores de pressão nestas condições.

O excesso de pressões positivas e negativas quando a proteção contra o Golpe de Aríete é insuficiente produz danos a tubulação. Este dano pode aparecer de forma repentina quando o fenômeno é muito severo ou de forma gradativa ao longo de uma quantidade de ciclos de sobre pressões e sub pressões, ocasionando a ruptura por fadiga dos materiais. Não somente a tubulação esta suscetível aos danos e rupturas como também o restante dos componentes do sistema como válvulas, bombas e outros.

As perdas econômicas não são mensuradas apenas pelo custo do reparo da tubulação ou equipamentos, mas também pelo lucro cessante (prejuízos causados pela interrupção de qualquer das atividades de uma empresa ou de um profissional liberal, no qual o objeto de suas atividades é o lucro) e alto custo social que significa suspender o serviço público mais importante como o fornecimento de água.

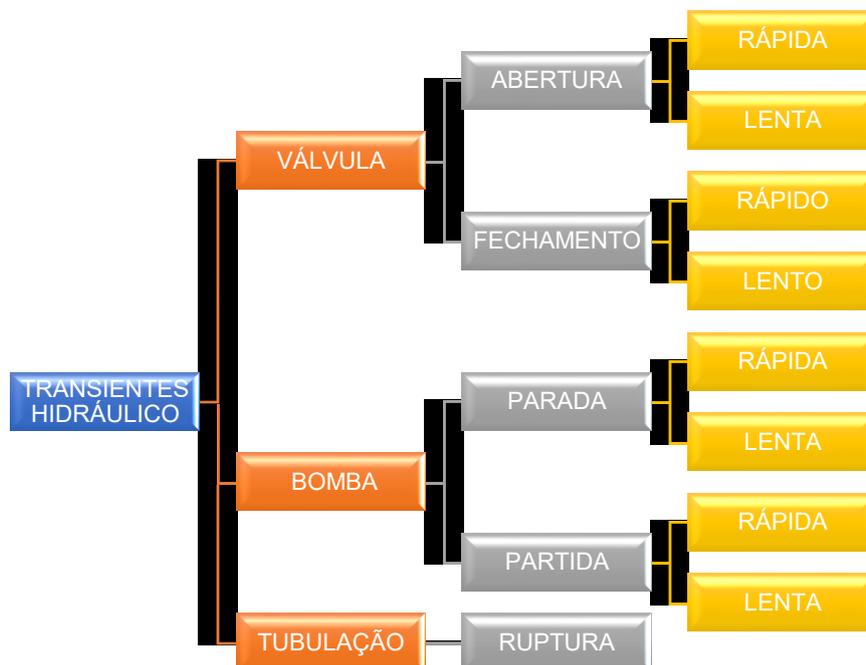
É muito comum ouvir que o custo de proteção é alto, seu custo incorretamente discutido como um item a mais de trabalho a ser tratado como os outros componentes do projeto e seu valor deve ser minimizado.

O custo da proteção contra o Golpe de Aríete deve ser avaliado no contexto global do trabalho, proteções econômicas mal avaliadas podem significar custos de reparação elevados, além do custo de proteção adequada.

Quanto mais detalhado e simulado for a análise dos transientes hidráulicos, maior é a chance da solução proposta ter o menor custo e maior segurança, a proteção normalmente não se dá com apenas um tipo de equipamento, mas com um conjunto de soluções e uma modelagem computacional eficiente.

A figura 2 ilustra de forma resumida o que pode ocasionar o Golpe de Aríete, ou seja, a mudança brusca do regime de escoamento. A figura 3 apresenta as consequências do Golpe de Aríete.

*Figura 2 - Origem do transientes hidráulico.*



Fonte: autor

Netto (2015), diz que o fechamento rápido ocorre quando o tempo de fechamento da válvula é menor do que o quociente da divisão entre o dobro da extensão da tubulação e a celeridade da onda. Como pode ser visto em 3:

$$t < \frac{2*L}{c} \quad (3)$$

Onde:

$t$  → tempo de fechamento da válvula (s);

$L$  → comprimento da tubulação (m);

$C$  → celeridade da onda (m/s)

No fechamento rápido, a sobrepressão máxima, no extremo da tubulação pode ser calculada por 4 e vista na figura 3:

$$\Delta H = \Delta p = \frac{V_o}{g} \quad (4)$$

Onde:

$\Delta H$  → variação de altura devido a sobrepressão (m);

$\Delta p$  → variação de pressão (mca);

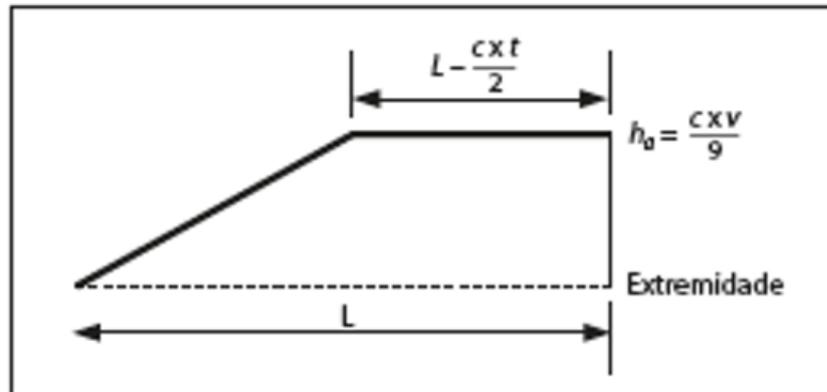
$V_o$  → velocidade inicial do fluxo (m/s);

$c$  → celeridade da onda (m/s);

$g$  → aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

Segundo Netto (2015) o fechamento lento ocorre quando o tempo de fechamento da válvula é maior do que o quociente da divisão entre o dobro da extensão da tubulação e a celeridade da onda. Como pode ser visto em 5:

Figura 3 - Diagrama de distribuição da sobrepressão ao longo da tubulação, com fechamento rápido.



Fonte: Netto (2015)

$$t < \frac{2 \cdot L}{c} \quad (5)$$

Onde:

$t$  → tempo de fechamento da válvula (s);

$L$  → comprimento da tubulação (m);

$C$  → celeridade da onda (m/s)

No fechamento lento, a sobrepressão máxima, pode ser calculada aplicando a fórmula de Michaud, que considera a proporcionalidade da velocidade, que é válida para manobras com variação linear de velocidade, como mostrado em 6 e na figura 5:

$$h_a = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot t} \quad (6)$$

Onde:

ha → sobrepressão ou acréscimo de pressão (mca);

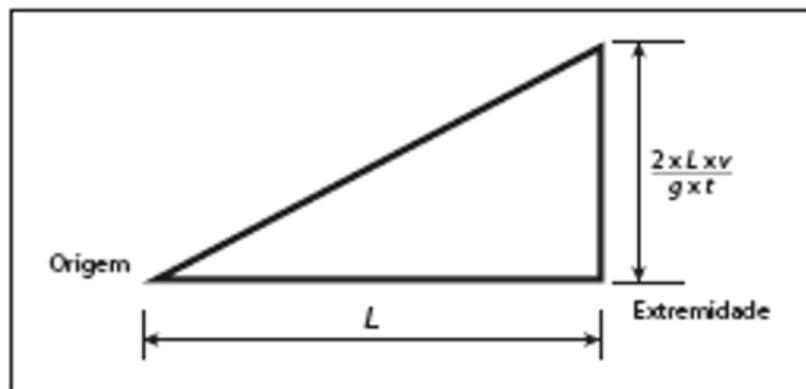
L → comprimento da tubulação (m);

V → velocidade do fluido (m/s);

g → aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

t → tempo de manobra

*Figura 4 - Diagrama de distribuição da sobrepressão ao longo da tubulação, com fechamento lento*



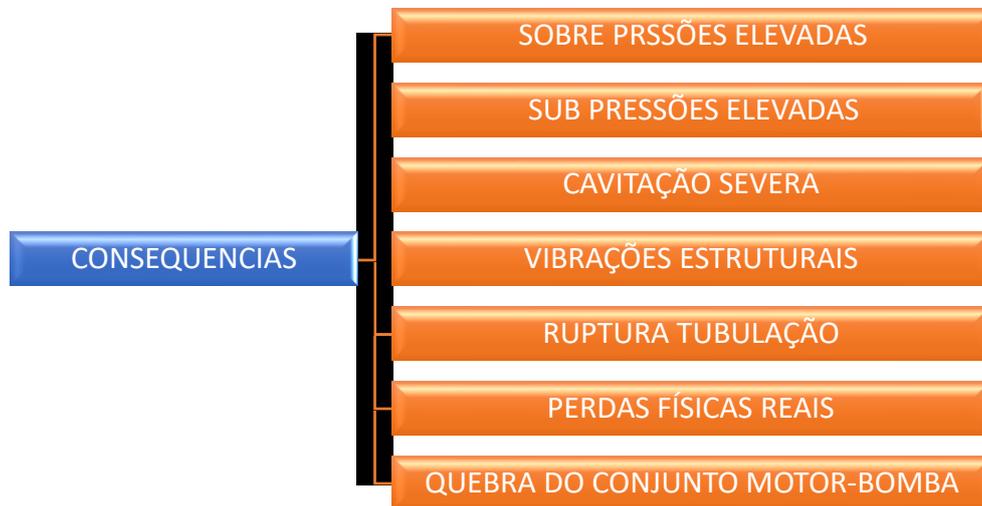
Fonte: Netto (2015)

A fórmula da equação 6 também pode ser aplicada para a determinação do tempo de fechamento a ser adotado, a fim de que a sobrepressão não ultrapasse determinado limite preestabelecido ou seja, até o limite da resistência da tubulação para que não haja ruptura.

Nenhum procedimento generalizado está atualmente disponível para projetar um sistema hidráulico com uma resposta aceitável para transientes hidráulicos. O desenho do sistema e os parâmetros de operação são selecionados pela primeira vez, e o sistema analisado para transientes causados por várias condições operacionais possíveis. Se a resposta do sistema é inaceitável, por exemplo, as pressões máximas e mínimas não estão dentro dos limites estabelecidos, em seguida, o layout

do sistema e/ou parâmetros são alterados, ou vários dispositivos de controle são fornecidos e o sistema é analisado novamente. (CHAUDRY, 2014)

*Figura 5 - Efeitos do Golpe de Ariete*



Fonte: autor

#### 4.3 Métodos de cálculo

Quando um escoamento sob pressão sofre perturbações em que se registam alterações das variáveis de pressão e de vazão que caracterizam o mesmo, diz estar sujeito a um regime variável. Estes poderão ser divididos em dois grupos: regimes gradualmente variáveis (ou quase-permanentes) e regimes rapidamente variáveis. Quando as variações dos parâmetros do escoamento são feitas de forma progressiva, possibilitando que as condições de compatibilidade interna sejam atingidas praticamente sem atraso, trata-se de um regime gradualmente variável. Trata-se de um regime rapidamente variável quando existe um atraso no estabelecimento das novas condições de compatibilidade interna, o que provoca consideráveis variações dos valores da pressão e da vazão que por sua vez mobiliza forças de natureza elástica resultantes da compressibilidade da água e da deformabilidade da tubulação (FIGUEIREDO, 1990).

O regime rapidamente variável que ocorre entre dois regimes permanentes, ou quase permanentes, resultante de uma alteração no escoamento é denominado transitório ou transientes hidráulico. Está diretamente relacionado com o fenómeno de choque

hidráulico pois este é o fenómeno que descreve as variações de pressão e de vazão capazes de mobilizar forças elásticas (FIGUEIREDO, 1990).

A fundamentação teórica e matemática do choque hidráulico é baseada na aplicação dos princípios de equilíbrio dinâmico e conservação da massa a um trecho elementar do escoamento sob pressão, entre duas secções da tubulação. Para estes serem aplicáveis, consideram-se algumas hipóteses simplificadoras que serão detalhadas a seguir.

Nas simplificações referentes às características do fluido e do escoamento, tem-se que (FIGUEIREDO, 1990):

- O escoamento é unidimensional e a distribuição de velocidades e de pressão é uniforme na secção transversal do tubo, pelo que serão deduzidas equações globais;
- O fluido é homogéneo e monofásico durante todo o regime transitório não sendo considerada a hipótese da cavitação;
- A compressibilidade do fluido é caracterizada por um único parâmetro, o módulo de elasticidade de volume,  $\varepsilon$ , como mostrado na equação 7, definido por:

$$\varepsilon = -V \cdot \frac{dP}{dV} = \rho \cdot \frac{dP}{d\rho} \quad (7)$$

Onde:

$V \rightarrow$  é o volume ( $m^3$ ) e

$\rho \rightarrow$  densidade do fluido ( $kg/m^3$ )

- As expressões utilizadas para o cálculo da perda de carga num escoamento permanente são aplicadas, no regime transitório, para o cálculo da perda de carga em cada instante;
- A carga cinética ( $U^2/2g$ ) é desprezável, definindo-se a carga H na equação 8, por:

$$H = z + \frac{P}{\gamma} \quad (8)$$

Onde:

$z \rightarrow$  é a cota topográfica (m) e

$P \rightarrow$  a pressão relativa (Pa)

- Em cada instante, a densidade do líquido no interior do tubo de corrente elementar é considerada constante, como pode ser visto na equação 9:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

Onde  $x$  é a coordenada segundo o eixo da conduta.

É preciso também considerar simplificações no que diz respeito ao comportamento da tubulação, tais como:

- Imobilidade do eixo do tubo durante o regime transitório, pelo que pode ser visto na equação 10:

$$\frac{dz}{dt} = 0 \quad (10)$$

- A tubulação (o invólucro) tem um comportamento elástico de acordo com a Lei de Hooke, caracterizado pelo módulo de elasticidade,  $E$ , e pelo coeficiente de Poisson,  $\nu$ ;
- Em cada instante, o trecho elementar da tubulação é considerado como uniforme, isto é, com diâmetro, espessura do invólucro e características elásticas constantes. Na equação 11, em particular admite-se que:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

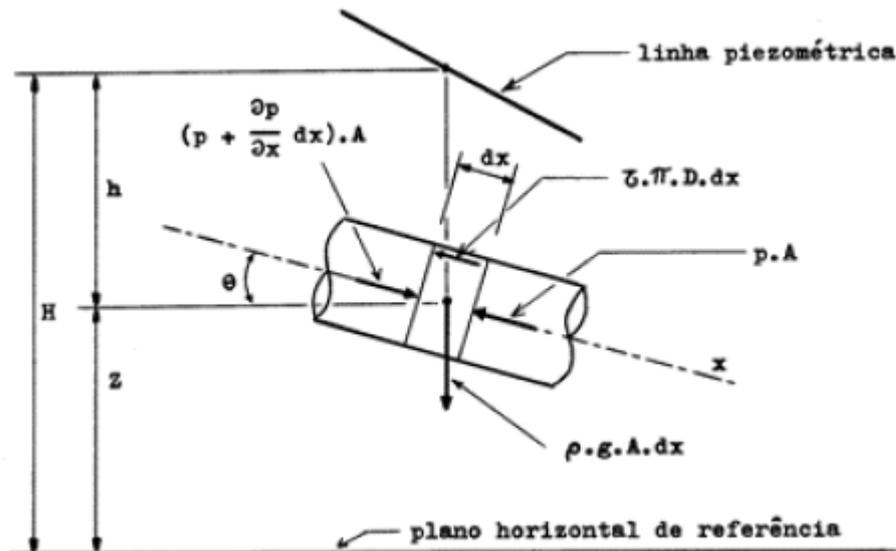
Onde  $S$  é a área da seção do tubo.

Segundo o mesmo autor, a equação de equilíbrio dinâmico exprime o princípio de equilíbrio de um sistema de forças, exteriores e de inércia, que atua sobre um determinado corpo ou volume. Esta equação advém da aplicação da Equação Geral da Dinâmica ao movimento de um fluido, como visto na equação 12.

$$\sum F \text{ exterior} + \sum F \text{ inércia} = 0 \quad (12)$$

É considerado, para a sua dedução e como ilustra a Figura 6, um trecho elementar de tubo de corrente delimitado por duas seções, afastadas de  $dx$ .

Figura 6 - Trecho elementar de uma tubulação



Fonte: Camargo (1991)

As componentes das forças exteriores e de inércias consideradas, segundo o eixo longitudinal da tubulação são as seguintes:

- Resultante da diferença de pressões entre as duas seções da tubulação, separada por  $dx$ , como mostrado na equação 13:

$$PS - \left( P + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \cdot \left( S + \frac{\partial S}{\partial x} dx \right) = -S \cdot \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (13)$$

- Peso do fluido contido no tubo de corrente elementar é mostrado na equação 14:

$$-\gamma \cdot S \cdot \sin \theta \, dx \quad (14)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo representado na Figura 6.

- Força tangencial devido ao atrito fluido-tubo, distribuída pela superfície lateral do tubo em sentido contrário ao deslocamento é visto na equação 15:

$$\pm \frac{\gamma \cdot \lambda \cdot U^2 \cdot S}{2 \cdot g \cdot D} \, dx \quad (15)$$

Onde:

$\lambda \rightarrow$  coeficiente de resistência e

$D \rightarrow$  diâmetro da tubulação (m)

- Força de inércia, sendo definida como o simétrico do produto da massa elementar pela respectiva aceleração, indicado na equação 16:

$$-\rho \cdot S \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) \, dx \quad (16)$$

Depois de simplificar sucessivamente as equações acima, juntando todas as componentes, segundo o eixo da tubulação e considerando a vazão  $Q$  em vez da velocidade, obtém-se o resultado da equação de equilíbrio dinâmico que é a equação 17:

$$\frac{1}{S} \cdot \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) + \frac{Q}{S^2} \cdot \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + g \cdot \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\lambda \cdot Q \cdot |Q|}{2 \cdot D \cdot S^2} = 0 \quad (17)$$

O princípio de conservação da massa, numa perspectiva de equação de balanço, determina que a diferença entre a quantidade de massa que sai  $M_s$  e a que entra  $M_e$ , seja igual à redução da quantidade de massa no interior do trecho do tubo. Pode-se então estabelecer a equação 18:

$$M_s - M_e = 0 \quad (18)$$

onde a massa que entra no volume de controle, trecho elementar representado na Figura 4, durante um intervalo de tempo  $dt$ , é expressa pela expressão 19 e a que sai, para o mesmo intervalo de tempo, é expressa pela equação 20:

$$M_e = \rho \cdot Q \, dt = \rho \cdot U \cdot S \, dt \quad (19)$$

$$M_s = \left( \rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \, dx \right) \cdot \left( U + \frac{\partial U}{\partial x} \, dx \right) \cdot \left( S + \frac{\partial S}{\partial x} \, dx \right) \, dt \quad (20)$$

A equação 21 traduz a diminuição da massa no interior do volume de controle é dada por:

$$\Delta M_i = - \frac{\partial(\rho \cdot S)}{\partial t} \, dx \, dt \quad (21)$$

A equação de balanço, depois de desenvolvida e arrumada no primeiro membro da igualdade, escreve-se igual a equação 22:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \frac{1}{S} \cdot \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right) = 0 \quad (22)$$

Como a apresentação da Equação 21 ainda não permite um desenvolvimento numérico adequado, é necessário transformá-la de modo a que as variações de seção  $S$  e da densidade do fluido  $\rho$  sejam expressas à custa das variáveis do problema, como a vazão ou a velocidade e a pressão ou carga hidráulica.

Para isso ser possível, substitui-se a segunda parcela do primeiro membro da Equação 21 por:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{dp}{dt} \quad (22)$$

Considerando também a variação da densidade, indicado na equação 23:

$$d\rho = \frac{\partial\rho}{\partial t} dt + \frac{\partial\rho}{\partial x} dx \quad (23)$$

Após múltiplas deduções e simplificações matemáticas que fogem do objetivo desta dissertação e juntamente com o uso de algumas hipóteses simplificadoras e até a introdução de novas variáveis como a celeridade, é possível chegar a equação 24 que é da conservação da massa para um escoamento transitório sob pressão:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{S} \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{c^2}{g \cdot S} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) - \frac{Q}{S} \cdot \sin \theta = 0 \quad (24)$$

A teoria da coluna rígida tem como hipótese que o fluido é incompressível, os tubos são rígidos e o fenômeno pode ser analisado unidimensionalmente. Como consequência o modelo é simplificado, as equações são mais simples (Equação Dinâmica e Equação da Continuidade) e o cálculo matemático fica distante da realidade física do fenômeno hidráulico. Algumas aplicações são os cálculos simples de manobras muito lentas e a estabilidade das chaminés de equilíbrio.

A teoria da coluna elástica tem como hipótese que o fluido compressível, os tubos são elásticos e o fenômeno pode ser analisado unidimensionalmente. Como consequência o modelo é mais complexo, as equações são mais complexas (derivadas parciais) e o cálculo matemático fica mais próximo da realidade física dos transientes hidráulicos. Algumas aplicações são o cálculo do Golpe de Aríete e cavitação.

#### 4.4 Método das características

A NBR 12215/17, recomenda a aplicação de vários métodos numéricos como: das características, método das ondas planas, método de diferenças finitas e método de elementos finitos na elaboração de projetos de sistemas hidráulicos. O Método das Características é uma dos mais utilizados, este método transforma as equações diferenciais parciais da continuidade e quantidade de movimento, em equações diferenciais ordinárias.

Neste método, o fenômeno adota uma lei de propagação de ondas que associa o tempo à abcissa  $x$ , que é definida ao longo do comprimento da tubulação através da celeridade,  $a$ . As equações indefinidas formam um sistema de equações parciais hiperbólicas quase lineares.

As duas equações de derivadas parciais, as equações fundamentais de equilíbrio dinâmico e de conservação da massa (equações 17 e 24, respetivamente), são transformadas em equações diferenciais integráveis pelo método das diferenças finitas. É de referir que para este método são desprezados os termos convectivos, o que leva a uma versão simplificada dessas equações (FIGUEIREDO, 1990), como mostrado em 25 e 26.

São obtidas, então, as seguintes equações:

$$L_1 = 0 \leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot S \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda \cdot |Q| \cdot Q}{2 \cdot D \cdot S} = 0 \quad (25)$$

$$L_2 = 0 \leftrightarrow g \cdot S \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} - g \cdot Q \cdot \sin \theta = 0 \quad (26)$$

Onde  $L_1$  e  $L_2$  são as equações diferenciais.

Sendo  $L_1$  e  $L_2$  iguais a zero, a combinação das equações lineares também será nula:

$$L = L_1 + \beta \cdot L_2 = 0 \quad (27)$$

Em que  $\beta$  é o coeficiente de combinação linear das equações diferenciais.

Resulta, portanto na equação 28:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \cdot a^2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta \cdot g \cdot S \cdot \left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) + F \cdot |Q| \cdot Q - \beta \cdot g \cdot Q \cdot \sin \theta = 0 \quad (28)$$

Em 29 é visto que  $F$  é dado por:

$$F = \frac{\gamma}{2 \cdot D \cdot S} \quad (29)$$

Para cada valor de  $\beta$  corresponde uma equação diferencial, pelo que para um par de valores de  $\beta$  corresponderão duas equações diferenciais, apresentado em 30 e 31 ( $A_1=0$  e  $A_2=0$ ), equivalentes a 25 e 26.

$$A_1 = L_1 + \beta_1 \cdot L_2 = 0 \quad (30)$$

$$A_2 = L_1 + \beta_2 \cdot L_2 = 0 \quad (31)$$

Considerando os diferenciais totais das variáveis dependentes Q e H, temos as equações:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial t} dt + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (32)$$

$$dH = \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x} dx \quad (33)$$

Para obter as referidas equações diferenciais ordinárias, pode-se integrar em ordem ao tempo ou em ordem ao espaço. Segundo Figueiredo (1990) os dois resultam em equações equivalentes, mas quando se segue o caminho da integração em ordem ao espaço, as equações características  $C^+$  e  $C^-$  apresentam formas que se adequam melhor à integração. Por esse mesmo motivo, apenas vai ser demonstrada, na presente dissertação, a integração em ordem ao espaço.

Para tal, é necessário dividir 32 e 33 por dx, obtendo 34 e 35:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (34)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial H}{\partial x} \quad (35)$$

Onde:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\beta} = \beta \cdot a^2 \rightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{1}{\beta \cdot a^2} = \beta \quad (36)$$

E:

$$\frac{1}{\beta} = \beta \cdot a^2 \rightarrow \beta = \pm \frac{1}{a} \quad (37)$$

Conhecendo  $\beta$ , obtém-se o conjunto de equações que relacionam  $x$  e  $t$ , temos 38 e 39:

$$\frac{dx}{dt} = +a \wedge \beta = +\frac{1}{a} \quad (38)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \wedge \beta = -\frac{1}{a} \quad (39)$$

Substituindo na equação 28 as equações 34 e 35, obtém-se dois novos conjuntos de equações 40, 41 e 42, 43:

- Equações  $C^+$  - onde  $\beta = +\frac{1}{a}$ :

$$\frac{dH}{dx} + \frac{a}{g \cdot S} \frac{dQ}{dx} + \frac{F \cdot |Q| \cdot Q}{g \cdot S} - \frac{Q}{a \cdot S} \cdot \sin \theta = 0 \quad (40)$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (41)$$

- Equações  $C^-$  - onde  $\beta = -\frac{1}{a}$ :

$$\frac{dH}{dx} - \frac{a}{g \cdot S} \frac{dQ}{dx} + \frac{F \cdot |Q| \cdot Q}{g \cdot S} + \frac{Q}{a \cdot S} \cdot \sin \theta = 0 \quad (42)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (43)$$

Considerando uma representação cartesiana das variáveis  $x$  e  $t$ , na qual cada ponto de uma dada secção  $x$  tem como correspondente um instante  $t$ , como representa a Figura 7. Considera-se a celeridade  $a$  constante para uma determinada tubulação. Assim, a integração de 41 e 43 leva, respectivamente, a 41 e 42:

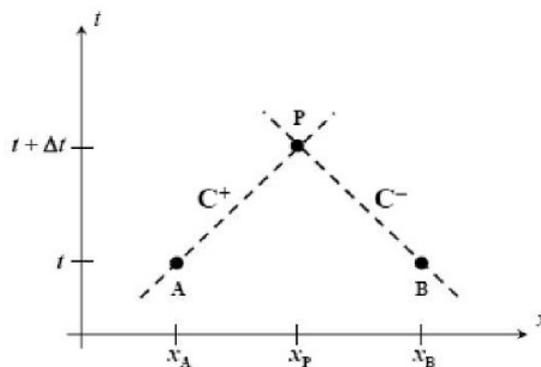
$$x_P - x_A = a \cdot (t_P - t_A) \quad (44)$$

$$x_P - x_B = a \cdot (t_P - t_B) \quad (45)$$

Com relação a figura 7, se as condições em A são conhecidas, isto é, são conhecidos  $Q_A$ ,  $H_A$ ,  $x_A$  e  $t_A$  para todo o conduto quanto  $t = t_0$ , então a determinação das condições no instante  $t = t_0 + \Delta t$  se obtém através de um esquema de diferenças finitas com as equações  $C^+$  e  $C^-$ .

Depois de simplificar as equações 40 e 42, integram-se entre A e P e entre B e P, respetivamente. Desta forma obtém-se um novo conjunto de equações 43 e 44, escritas do seguinte modo:

*Figura 7 - Linhas características*



Fonte: Figueiredo (1990)

$$C^+: H_P - H_A + \frac{a}{g \cdot S} \cdot (Q_P - Q_A) + 1^+ = 0 \quad (46)$$

$$C^-: H_P - H_A + \frac{a}{g \cdot S} \cdot (Q_P - Q_B) + 1^- = 0 \quad (47)$$

sendo  $H_P$ ,  $H_A$ ,  $H_B$ ,  $Q_P$ ,  $Q_A$  e  $Q_B$  a carga H e a vazão Q dos pontos A, B e C.

$I^+$  e  $I^-$  correspondem à integração das perdas de carga e do efeito relativo à inclinação do tubo. Estas podem ser escritas, depois de integradas por métodos numéricos aproximados, da seguinte forma mais sintética, como apresentado em 48 e 49:

$$I^+ = (1 - K)(R_A \cdot T_A) \cdot |Q_A| \cdot Q_A + K \cdot (R_P - T_P) \cdot |Q_P| \cdot Q_P \quad (48)$$

$$I^- = -(1 - K)(R_B \cdot T_B) \cdot |Q_B| \cdot Q_B - K \cdot (R_P + T_P) \cdot |Q_P| \cdot Q_P \quad (49)$$

K representa o fator de ponderação da integração numérica.

R e T, para uma dada secção do tubo são dados, respetivamente, por 50 e 51:

$$R = \frac{\lambda}{2 \cdot g \cdot D \cdot S^2} \Delta x \quad (50)$$

$$T = \frac{\sin \theta}{\alpha \cdot S \cdot |Q|} \Delta x \quad (51)$$

É possível reescrever as equações características para que, conhecendo os valores de Q e H nas secções A e B, permitam formar um sistema de equações com  $Q_P$  e  $H_P$  como incógnitas como apresentado em 52 e 53:

$$C^+ : H_P + [A + K \cdot (R_P - T_P) \cdot |Q_P|] \cdot Q_P - C_A = 0 \quad (52)$$

$$C^- : H_P - [A + K \cdot (R_P + T_P) \cdot |Q_P|] \cdot Q_P - C_B = 0 \quad (53)$$

Isso se as equações (54), (55) e (56) forem consideradas:

$$A = \frac{A}{g \cdot S} \quad (54)$$

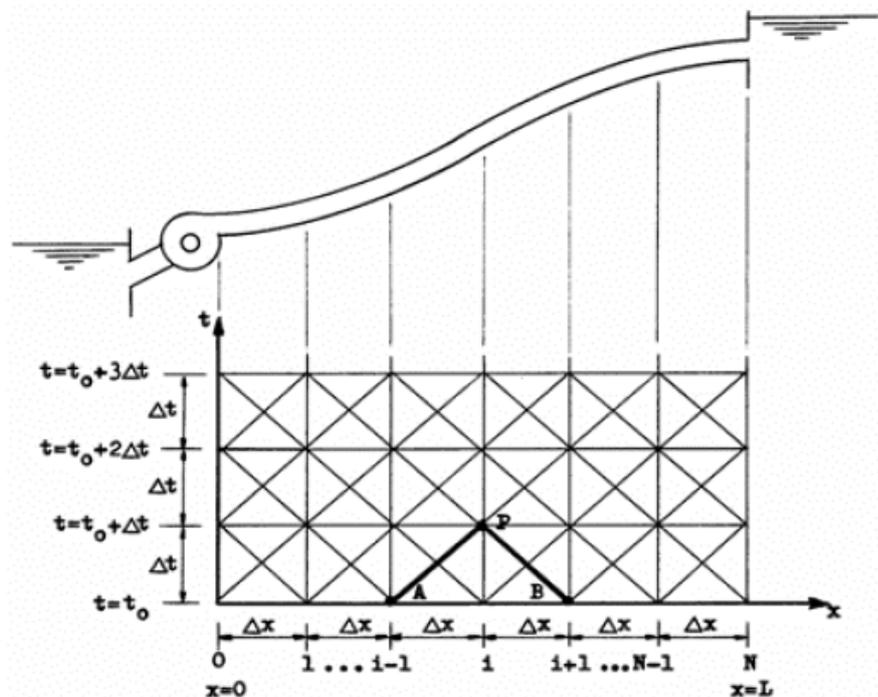
$$C_A = H_A + [A - (1 - K)(R_A - T_A) \cdot |Q_A|] \cdot Q_A \quad (55)$$

$$C_B = H_B - [A - (1 - K)(R_B + T_B) \cdot |Q_B|] \cdot Q_B \quad (56)$$

Para se compreender melhor este método, considere-se um conduto simples de comprimento total  $L$  que será dividido em partes iguais. Escolhe-se  $N$  trechos de igual comprimento  $\Delta x$  tal que  $\Delta x = L/N$  e  $\Delta t = \Delta x/a$ , conforme mostrado na figura 6 (pode ser tubulação por bombeamento ou por gravidade). Em seguida são determinados em cada seção  $i$  os valores  $Q_0$  e  $H_0$  para as condições de fluxo permanente inicial, que se verifica no sistema quando  $t = t_0$  (sobre o eixo  $x$ ), ao longo de todo comprimento  $L$  (CAMARGO, 1991).

Uma vez conhecidos os valores  $Q_0$  e  $H_0$ , isto é, os valores de  $Q_P$  e  $H_P$  no instante  $t = t_0$  a partir dos mesmos se calculam os valores  $Q_P$  e  $H_P$  nos pontos interiores da malha no instante  $t = t_0 + \Delta t$ . Estes últimos possibilitam o cálculo dos valores de  $Q_P$  e  $H_P$  nos pontos interiores a malha no instante  $t = t_0 + 2 \cdot \Delta t$ . E assim, sucessivamente.

Figura 8 - Malha cálculo



Fonte: Camargo (1991)

#### 4.5 Simulação computacional e transientes hidráulicos

Como dito anteriormente, o estudo de regimes transitórios ou variáveis é regido pelas equações fundamentais do equilíbrio dinâmico e da conservação da massa e estas formam um sistema de equações do tipo hiperbólico, cuja solução exata não pode ser obtida de forma manual, foram desenvolvidos vários métodos de estudo para chegar a soluções aproximadas.

Um dos métodos numéricos de maior utilização em uma época anterior a dos métodos computacionais é o Método de Allievi. Contudo com o desenvolvimento do cálculo computacional, foram desenvolvidos métodos bem mais complexos, tais como:

- Método das Diferenças Finitas;
- Método dos Elementos Finitos;
- Método Espectral;
- Método dos Elementos de Contorno;
- Método das Características.

Estes métodos, sendo os mais utilizados o das diferenças finitas e o das características, ganharam mais importância sobre os métodos algébricos ou gráficos devido à sua maior precisão (MARTINS, 2009).

O Método das Características, devido ao fato de poder definir condições de contorno mais diversas e de ter uma maior eficiência, é o mais utilizado, enquanto o dos Elementos Finitos é utilizado para casos de menor aproximação, não sendo conhecidas as condições de fronteira (MARTINS, 2009).

#### 4.5.1 Condições de contorno

Condição de contorno é a denominação dada à condição usada para representar o comportamento das fronteiras de cada tubulação em suas extremidades. Estas extremidades podem estar associadas a válvulas, reservatórios, bombas, etc., ou mesmo outras tubulações, como no caso de junções, nós ou interligações, de dois ou mais condutos (CAMARGO, 1991).

Como as equações 52 e 53, respectivamente em cada extremidade, estabelecem uma relação entre duas incógnitas, então surge a necessidade de uma condição adicional que represente, através das mesmas variáveis, a interação entre o tubo e o fluido, de forma a surgir a solução (CAMARGO, 1991).

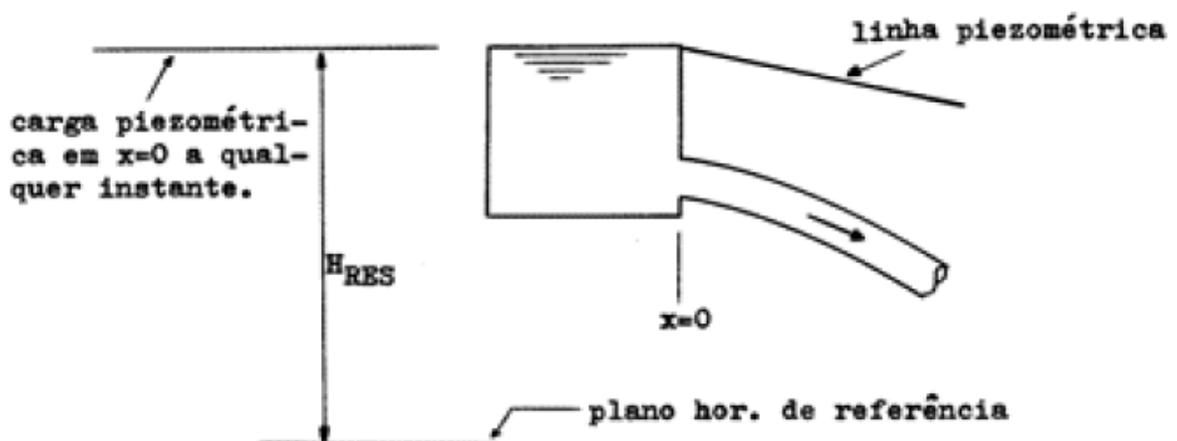
Para os métodos numéricos serem aplicados e as famílias de soluções, é necessário definir as condições de contorno pois é sobretudo devido a elas que acontece o regime transitório. As condições de operação de um sistema hidráulico podem ser, por exemplo, válvulas de retenção, reservatórios, bombas, reservatórios de ar comprimido ou chaminés de equilíbrio.

No caso de uma adutora elevatória composta pelo grupo elevatório (bomba hidráulica), válvula de retenção imediatamente a jusante da bomba e pela tubulação que conduz a água até ao reservatório, as condições de contorno a considerar são, na secção do reservatório e na secção da bomba hidráulica.

#### 4.5.1.1 No reservatório de nível constante a montante

A equação 56 representa a tubulação ou descarga em superfície livre que despeja água dentro do reservatório para qualquer vazão e carga hidráulica conforme figura 09.

*Figura 9 - Reservatório de nível constante a montante*



Fonte: Camargo (1991)

$$H = H_0 = \text{constante} \quad (56)$$

E da equação 53, vem:

$$Q_P = CM + A \cdot H_0 \quad (57)$$

#### 4.5.1.2 No reservatório de nível constante a jusante

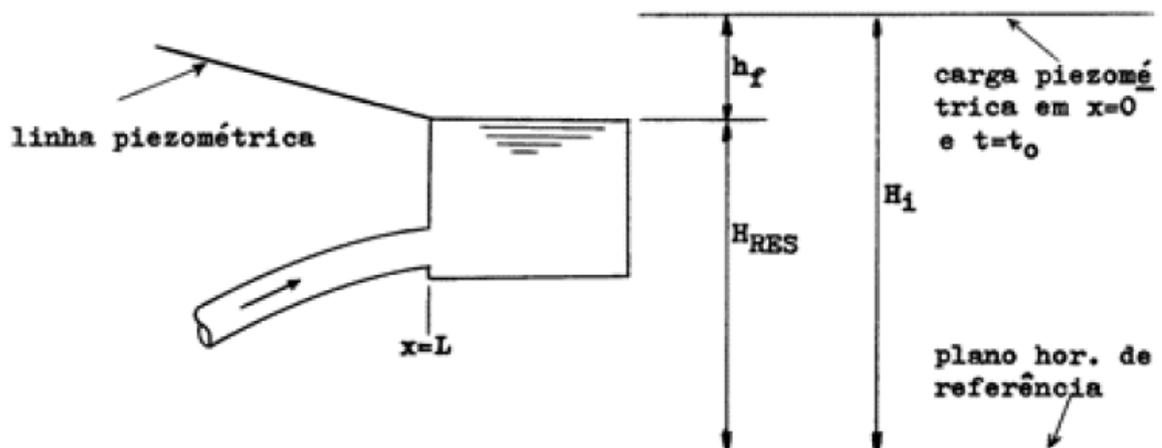
A equação 58 mostra que desprezando as perdas de carga locais de saída da tubulação e a carga de velocidade, comparadas às perdas ao longo do tubo, resulta em que a carga, em qualquer instante na seção  $x = L$ , conforme mostrado na figura 10, é constante e igual a própria altura estática nesta seção.

$$H = H_0 = \text{constante} \quad (58)$$

E da equação 52, vem:

$$Q_P = CP - A \cdot H_0 \quad (59)$$

Figura 10 - Reservatório de nível constante a jusante



Fonte: Camargo (1991)

#### 4.5.1.3 Na bomba

Para estabelecer uma condição de contorno na bomba é necessário relacionar os parâmetros que caracterizam o funcionamento desta. Essa relação designa-se por curva característica da bomba. Geralmente, é nesta seção que são geradas as perturbações do escoamento, com a entrada e saída de serviço da mesma.

A bomba tanto pode ter um comportamento ativo ou passivo no escoamento, dependendo desta ser ou não a responsável pela variação do escoamento. Para o caso que irá ser abordado, mais à frente, a bomba irá ser a responsável pela perturbação do escoamento, logo terá um comportamento ativo. Neste caso, a bomba representa uma condição fronteira dinâmica regida por duas equações:

- Equação diferencial que relaciona a cinemática do movimento de rotação das massas girantes e o momento atuante sobre as mesmas;
- Equação das curvas características da bomba.

Na primeira, admite-se que as massas girantes da bomba são rígidas, o que torna possível escrever-se a equação 60:

$$M_0 = M_m - M_r = \alpha_b \cdot I_0 \quad (60)$$

Onde:

$M_0$  → momento atuante sobre as massas girantes da bomba (N·m);

$M_m$  → momento do motor (N·m);

$M_r$  → momento resistente (N·m);

$\alpha_b$  → aceleração angular das massas girantes da bomba (rad/s<sup>2</sup>) e

$I_0$  → momento de inércia das massas girantes relativas ao eixo de rotação (N·m).

Segundo Figueiredo (1991), após algumas simplificações e considerações, obtém-se uma equação diferencial das massas girantes, que integrada entre os instantes  $t_i$  e  $t_{i+1}$  recorrendo a uma técnica de diferenças finitas resulta 61:

$$N_{i+1} = N_i - \frac{900 \cdot \gamma}{\pi^2 \cdot I_0} \cdot \left[ \frac{Q_b \cdot H_{man}}{N_{\eta}} \right] \cdot \Delta t \quad (61)$$

A equação acima 61 é conhecida como a Lei de Parada da Bomba.

Onde:

$N_{i+1}$  → velocidade de rotação da bomba no instante  $i+1$  (rad/s);

$N_i$  → velocidade de rotação da bomba no instante  $i$  (m/s);

$Q_b$  → vazão da bomba ( $m^3/s$ ) e

$N$  → velocidade de rotação da bomba (m/s)

Para a simulação do sistema com bombeamento, deve-se conhecer a curva de pressão em função da vazão, sendo que estes valores compõem as condições de contorno das bombas. Pouco se sabe a respeito do comportamento dessa relação Vazão x Pressão em regimes transientes. Contudo, dados das bombas em regime permanente vêm sendo considerados em estudos de transientes sem se ter registrado erros decorrentes dessa consideração (CHAUDHRY, 2014).

A vazão de uma bomba relaciona-se com a velocidade de rotação, com a carga hidráulica e com o torque. Essas variáveis se relacionam conforme apresentado na Equação 78 e são normalmente apresentadas pelos fabricantes como curvas de performance.

$$v = \frac{Q}{Q_R}; h = \frac{H}{H_R}; a = \frac{N}{N_R}; \beta = \frac{T}{T_R} \quad (62)$$

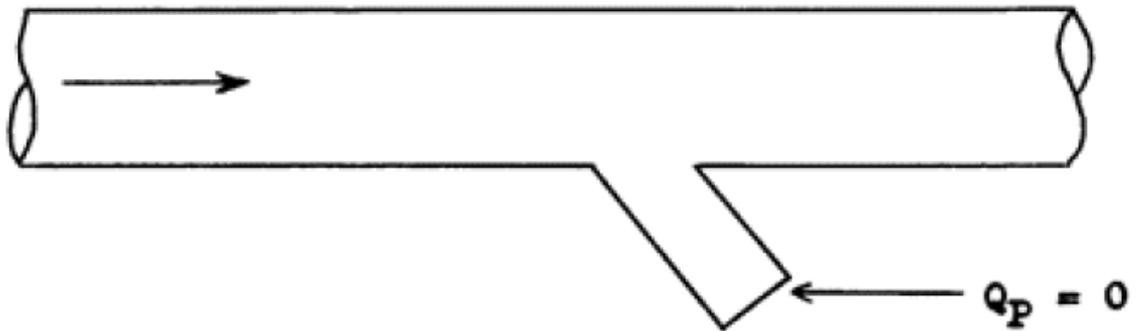
Sendo que as variáveis apresentadas com o sub-índice se referem àquelas do ponto de maior rendimento do equipamento.

#### 4.5.1.4 Conduto fechado em uma extremidade a jusante

No caso de um tubo com ramificação fechada em uma extremidade a jusante, conforme mostra a figura 11, como  $Q_P = 0$ , temos então 63

$$H_P = \frac{CP}{A} \quad (63)$$

Figura 11 - Extremidade fechada a jusante

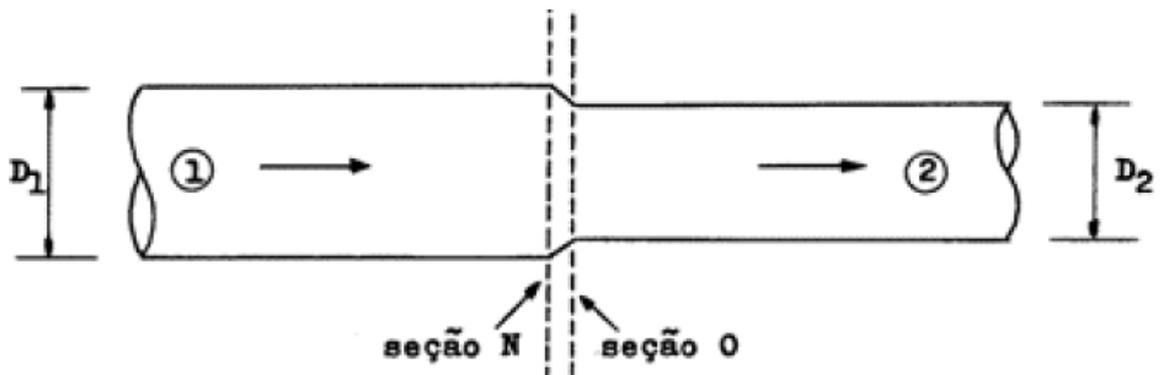


Fonte: Camargo (1991)

#### 4.5.1.5 Conexão em série

Nos casos de tubos contendo uniões de tubulações com propriedades distintas, conforme mostrado na figura 12, destas condições deverão ser estabelecidas equações adicionais que associadas às equações  $C^+$  e  $C^-$ , possibilitem determinar nas seções de transição, os valores de  $Q_P$  e  $H_P$ .

Figura 12 - Extremidade fechada a jusante



Fonte: Camargo (1991)

A união de tubulações em série, aqui analisada, inclui a variação de diâmetro, de espessura de parede, de rugosidade, etc., ou alguma combinação destas variáveis.

Nos casos de tubulações múltiplas é sempre conveniente se adotar uma notação com índices duplos, como aqui será utilizado. O primeiro índice se referirá ao número do tubo e o segundo à seção do mesmo. Cabe lembrar que, conforme dito anteriormente, o comprimento L do tudo é dividido em N trechos iguais, então N será a referência da seção da extremidade a jusante e 0 (zero) a da extremidade a montante (CAMARGO, 1991).

Assim, por exemplo,  $H_P(2,3)$  seria a altura piezométrica na seção 3 do tubo 2, ao passo que a notação  $Q_P(3,N)$  indicaria a vazão na extremidade a jusante do tubo 3 e  $H_P(4,0)$  a altura piezométrica na extremidade a montante do tubo 4.

Desta forma, desprezando os efeitos das perdas localizadas entre as seções N e 0 dos tubos 1 e 2, figura 12, temos:

$$H_{P(1,N)} = H_{P(2,0)} = H_P \quad (64)$$

Aplicando a equação C+ na seção N e a equação C- na seção 0, vem:

$$Q_{p(1,N)} = CP_{(1,N)} - Y_{(1)} \cdot H_{P(1,N)} \quad (65)$$

$$Q_{p(2,N)} = CP_{(2,N)} - Y_{(2)} \cdot H_{P(2,N)} \quad (66)$$

OBS.: O parâmetro Y recebe um só índice por ser constante o seu valor em cada tudo, para qualquer seção.

Com a equação da continuidade, temos 67:

$$Q_{P(1,N)} = Q_{P(2,0)} = Q_P \quad (67)$$

Associado as equações 65, 66 e 67 teremos 68:

$$H_P = \frac{CP_{(1,N)} - CM_{(2,0)}}{Y_{(1)} + Y_{(2)}} \quad (68)$$

E o valor de QP pode ser obtido com as equações 65 e 66.

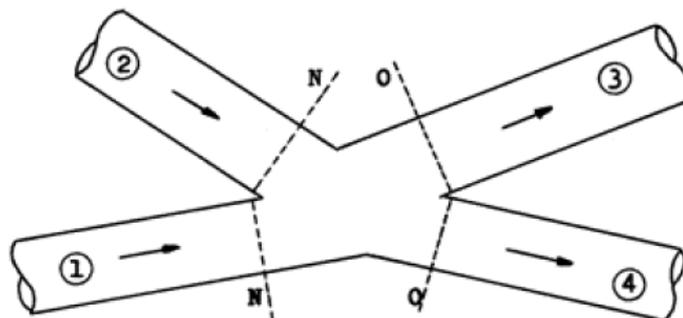
#### 4.5.1.6 Conexão ramificada

Em sistemas contendo conexões ramificadas. Como mostrado na figura 6, se desprezados os efeitos das perdas localizadas no nó, então aí poderá ser estabelecido um valor de HP comum aos extremos que se conectam.

Com isto, usando a notação de índices duplos, tem-se 63:

$$H_{P(1,N)} = H_{P(2,N)} = H_{P(3,0)} = H_{P(4,0)} = H_P \quad (69)$$

*Figura 13 - Extremidade fechada a jusante*



Fonte: Camargo (1991)

Aplicando a equação  $C^+$  nas seções N e a equação  $C^-$  nas seções 0, temos 70, 71, 72 e 73:

$$Q_{P(1,N)} = CP_{(1,N)} - Y_{(1)} \cdot H_{P(1,N)} \quad (70)$$

$$Q_{P(2,N)} = CP_{(2,N)} - Y_{(2)} \cdot H_{P(2,N)} \quad (71)$$

$$Q_{P(3,N)} = CP_{(3,N)} - Y_{(3)} \cdot H_{P(3,N)} \quad (72)$$

$$Q_{P(4,N)} = CP_{(4,N)} - Y_{(4)} \cdot H_{P(4,N)} \quad (73)$$

Da equação da continuidade temos 74:

$$Q_{P(1,N)} + Q_{P(2,N)} = Q_{P(3,N)} + Q_{P(4,N)} \quad (74)$$

Realizando operações com as equações 69 e 74 temos 75:

$$H_P = \frac{CP_{(1,N)} + CP_{(2,N)} - CM_{(3,0)} - CM_{(4,0)}}{Y_{(1)} + Y_{(2)} + Y_{(3)} + Y_{(4)}} \quad (75)$$

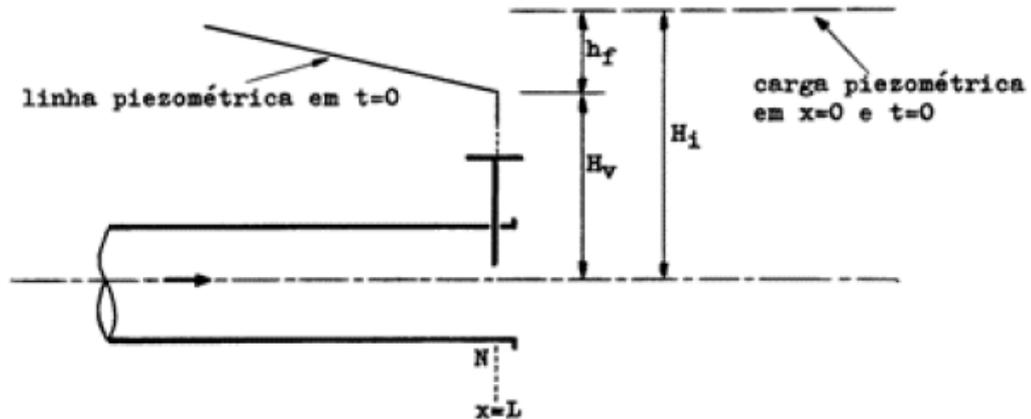
Uma vez conhecidos o valor de  $H_P$ , os valores de  $Q_P(1,N)$ ,  $Q_P(2,N)$ ,  $Q_P(3,0)$  e  $Q_P(4,0)$  são determinados com as equações 70, 71, 72 e 73 respectivamente.

#### 4.5.1.7 Válvula na extremidade a jusante do tubo

Em sistemas conforme mostrado na figura 14 a equação para escoamento da válvula, para as condições de fluxo permanente é dada por 76:

$$Q_i = (C_d \cdot A_i)_i \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_v} \quad (76)$$

Figura 14 - Válvula na extremidade a jusante



Fonte: Camargo (1991)

Nesta expressão,  $Q_i$  é a vazão ( $m^3/s$ ) no regime permanente inicial,  $H_v$  é a perda de carga através da válvula e  $(C_d \cdot A_v)_i$  é a abertura da válvula vezes o coeficiente de vazão que depende do tipo e do grau de abertura da válvula.

OBS.: O índice  $i$  refere-se ao regime inicial.

Para uma outra abertura qualquer da válvula temos 77:

$$Q_P = (C_d \cdot A_i)_P \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_P} \quad (77)$$

Definindo a abertura adimensional da válvula como 78:

$$\tau = \frac{(C_d \cdot A_v)_P}{(C_d \cdot A_v)_i} \quad (78)$$

E dividindo a equação 77 pela equação 76, como quociente teremos 79:

$$Q_P^2 = (Q_i \cdot \tau)^2 \cdot \frac{H_P}{H_v} \quad (79)$$

Resolvendo a equação 79 simultaneamente com a equação C<sup>+</sup>, vem 80:

$$Q_P^2 = \frac{(Q_i \cdot \tau)^2 \cdot (C_P \cdot Q_P)}{S \cdot H_p} \quad (80)$$

Tomando 81:

$$B = \frac{(Q_i \cdot \tau)^2}{S \cdot H_v} \quad (81)$$

Obtemos 82:

$$Q_p = \frac{-B \cdot \sqrt{B^2 + 4 \cdot B \cdot C_P}}{2} \quad (82)$$

E H<sub>p</sub> obtém-se de 79.

T poderá ser obtido de uma lei de abertura ou fechamento da válvula em função do tempo ou de pontos distintos de uma curva T x t. ou de valores experimentais.

Uma expressão analítica que relaciona a manobra de abertura ou fechamento de uma válvula, com o tempo consumido na execução desta manobra, é mostrado a seguir:

Seja, portanto:

$t \rightarrow$  tempo obtido através de acréscimos  $\Delta t$  (s);

$T \rightarrow$  tempo de duração da manobra (s);

$E \rightarrow$  expoente;

$n_f \rightarrow (C_d \cdot A_v)_f / (C_d \cdot A_v)_i$

$(C_d \cdot A_v)_f \rightarrow$  área efetiva da abertura da válvula no final da manobra

$(C_d \cdot A_v)_i \rightarrow$  área efetiva da abertura da válvula no início da manobra

a) Manobra de abertura

$$\tau = \left[ 1 + (n_f - 1) \cdot \frac{t}{T} \right]^E \quad (83)$$

Para  $0 \leq t \leq T$

$$\tau = (n_f)^E \quad (84)$$

Para  $t = T$

b) Manobra de fechamento

$$\tau = \left[ 1 - (n_f - 1) \cdot \frac{t}{T} \right]^E \quad (85)$$

Para  $0 \leq t \leq T$

$$\tau = (n_f)^E \quad (86)$$

Para  $t = T$

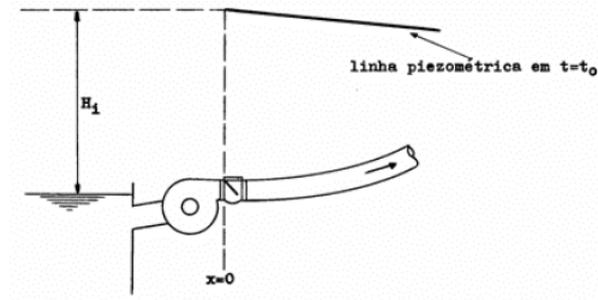
OBS.:

- Estas expressões não se aplicam à manobra de abertura de válvula a partir da posição inicial completamente fechada (impossibilidade da divisão por zero);
- Para escoamento permanente,  $T = 1$ ;
- Para nenhum escoamento, com a válvula na posição fechada,  $T = 0$ ;
- Para manobras de abertura,  $n_f \geq 1$  e  $T \geq 1$ ;
- Para manobras de fechamento,  $0 \leq n_f \leq 1$  e  $0 \leq T \leq 1$ ;
- Para  $E = 1$  a manobra é dita linear. Neste caso,  $T = n_f$  para todo  $t > T$ ;
- Para manobras de abertura ou fechamento de natureza diferente das que aqui são apresentadas, deverão ser utilizadas leis próprias;

#### 4.5.1.8 Bomba centrífuga com válvula de retenção situada na extremidade a montante da tubulação

Em sistemas elevatórios, impulsionados por CMB onde as bombas são iguais e operando em paralelo, protegidas por válvulas de retenção posicionadas imediatamente a jusante das bombas, conforme mostrado na figura 15, o Golpe e Aríete decorrente da brusca e simultânea interrupção de energia elétrica fornecido aos CMB's, pode ser tratado com algumas equações desenvolvidas para esta importante condição de contorno.

Figura 15 - Bomba centrífuga com válvula de retenção situada na extremidade a montante da tubulação



Fonte: Camargo (1991)

Das condições de homologia para bombas, temos 87, 88 e 89:

$$Q/Q_i = N/N_i \quad (87)$$

$$H/H_i = (N/N_i)^2 \quad (88)$$

$$P/P_i = (N/N_i)^3 \quad (89)$$

Onde:

$P \rightarrow$  Potência fornecida pelo motor (W)

$N \rightarrow$  rotação do eixo (rpm)

Fazendo  $\beta = N/N_i$ , temos 90, 91 e 92

$$Q/Q_i = \beta \quad (90)$$

$$H/H_i = \beta^2 \quad (91)$$

$$P/P_i = \beta^3 \quad (92)$$

A variação da velocidade angular ( $w$ ) das partes rotativas de um conjunto eletrobomba, quando se interrompe o fornecimento de energia elétrica ao motor, irá depender do momento polar de inércia / das massas girantes. Associando estas grandezas à potência fornecida pelo motor, tem-se 93:

$$P = l \cdot w \cdot \frac{dw}{dt} \quad (93)$$

Das equações 90, 91 e 92, temos 94 e 95:

$$P = P_i \cdot \beta^3 \quad (94)$$

$$W = w_i \cdot \beta \quad (95)$$

Além disto, lembrando que o índice “i” refere-se às condições do regime permanente inicial, temos 96 e 97:

$$P_i = \frac{\gamma \cdot Q_i \cdot H_i}{n_i} \quad (96)$$

$$w_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_i}{60} = \frac{\pi \cdot N_i}{30} \quad (97)$$

Com  $w_i$  em rad/s.

Substituindo-se 94, 95, 90 e 96 em 97 e integrando entre os limites  $t = 0$  e um instante qualquer  $t$ , teremos 98:

$$\alpha_p = \frac{1}{k_\beta \cdot t + 1} \quad (98)$$

Onde:

$$k_{\beta} = \frac{900 \cdot g \cdot \gamma \cdot Q_1 \cdot H_1}{n_1 \cdot l \cdot (\pi \cdot N_i)^2} = \frac{3600 \cdot g \cdot \gamma \cdot Q_i \cdot H_i}{n_i \cdot GD^2 \cdot (\pi \cdot N_i)^2} \quad (99)$$

Onde:

$n_i \rightarrow \%$

$N_i \rightarrow \text{rad/s}$

$GD^2 \rightarrow \text{N/m}^2$

Que são fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos

$Q_i \rightarrow \text{m}^3/\text{s}$

$H_i \rightarrow \text{m}$

Que provem das condições do fluxo permanente inicial

$\gamma \rightarrow \text{kgf/m}^3$

Depende do líquido em escoamento

$T \rightarrow \text{tempo transcorrido (s)}$

No regime permanente, o fluxo em um tubo por bombeamento, na condição de operação normal, tem a vazão relacionada com a carga piezométrica na bomba através de sua correspondente curva característica, geralmente expressa por uma parábola do tipo apresentada em 100:

$$H = A + BQ + CQ^2 \quad (100)$$

Geralmente as constantes A, B e C da equação 94 não são fornecidas pelos fabricantes de bombas e sim quando muito, ábacos contendo a família de curvas de cada equipamento. Contudo podem ser determinadas pela aproximação da curva correspondente a três pontos distintos localizados sobre a mesma (CAMARGO, 1991).

Substituindo as equações 90, 91 e 92 em 100, após substituir valores e realizar operações desprezando as perdas de carga na sucção, bem como a compressibilidade do fluido no interior da bomba, em relação ao restante do sistema e resolvendo em simultaneidade com a equação C-, tem-se 101:

$$Q_P = \frac{B_1 - \sqrt{B_1^2 - C_1}}{2C} \quad (101)$$

Onde:

$$B_1 = \frac{1}{S} - B \cdot \alpha_P \quad (102)$$

$$C_1 = 4C \cdot \left( A \cdot \alpha_P^2 + \frac{CM}{S} \right) \quad (103)$$

E A, B e C são coeficientes de 100.

O valor de  $H_P$  é obtido da equação C-, da qual se deduz 104:

$$H_p = \frac{Q_p - CM}{S} \quad (104)$$

Desta maneira, mediante acréscimos de tempo  $\Delta t$  ao tempo  $t$  da equação 98, vai-se obtendo, com as equações 102 e 103 a evolução dos valores de QP e HP.

#### 4.5.2 Convergência e estabilidade

Para se obter uma solução numérica satisfatória para as equações diferenciais parciais, as aproximações por diferenças finitas devem satisfazer certas condições de convergência e estabilidade (CHAUDRY, 2014).

Uma solução exata para as equações diferenciais é impossível de ser obtida quando se utiliza métodos numéricos, já que é finito o número de casas decimais em qualquer computador que se utilize. Entretanto, uma solução bastante próxima da realidade pode ser obtida quando se utiliza um esquema de diferenças finitas dito convergente, ou seja, quando se faz tender para zero as dimensões da malha definidas por  $\Delta x$  e  $\Delta t$ .

Ao se reduzir o tamanho da malha, deve-se ter o cuidado de não perder o ganho obtido com a diminuição do intervalo de discretização com um aumento excessivo do número de operações aritméticas, e conseqüentemente, de um aumento do erro computacional embutido nos truncamentos e arredondamentos do cálculo do transientes (CHAUDRY, 2014).

Para que um método de resolução seja estável, a equação (105) a seguir, conhecida como condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy, deve ser menor o igual a 1 ( $C_N \leq 1$ ):

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq c \text{ ou } C_{N=c} = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (105)$$

Sendo  $c$  celeridade,  $\Delta t$  o intervalo de tempo da simulação e  $\Delta x$  discretização espacial da simulação. Dessa forma, a partir da definição do Número de Courant e do intervalo de tempo da simulação, calcula-se a celeridade dos condutos e a discretização espacial da simulação.

Quando se tem dois ou mais diferentes condutos em um mesmo sistema, é necessário que se utilize o mesmo incremento de tempo  $\Delta t$  para todos os condutos. Com isso pode-se utilizar as condições de contorno nas junções e determinar as incógnitas para um dado instante.

Deve-se então escolher cuidadosamente o incremento de tempo  $\Delta t$  e o número inteiro de divisões  $N$  de cada canalização. De modo a obedecer a condição de COURANT, 106 deve-se ter:

$$\Delta t = \frac{L_i}{c_i \cdot N_i} \quad (106)$$

Onde:

$N_i \rightarrow$  número de trechos da tubulação  $i$ ;

$L_i \rightarrow$  comprimento da tubulação  $i$  (m) e

$c_i \rightarrow$  celeridade da onda no conduto  $i$  (m/s)

No caso das perdas de carga devido ao atrito serem representativas, Chaudry (2014) apresenta um termo de análise, o qual, para uma aproximação de primeira ordem dos termos não lineares da Equação da Quantidade de Movimento deverá ser inferior a 0,5 ( $C_R \leq 0,5$ ). Este termo é calculado pela Equação (107).

$$C_R = \frac{f(\Delta Q)(\Delta t)}{4 \cdot D \cdot A} \quad (107)$$

Observa-se na Figura 7 que o Método das Características considera, para os cálculos, discretizações de  $\Delta x$  (no eixo das abscissas) e  $\Delta t$  (no eixo das coordenadas) e, dessa forma, sendo o coeficiente de Courant igual a uma unidade, haverá a seguinte igualdade  $\Delta x = \alpha \cdot \Delta t$ , conforme Equação (105). Com isso, conclui-se que para um mesmo  $\Delta t$ , a necessidade de cálculos será maior para menores valores de  $C_N$ , exigindo-se maior discretização espacial. Assim, desde que sejam respeitadas as condições de estabilidade, o Coeficiente de Courant deverá ser considerado uma unidade, reduzindo-se a necessidade computacional para as simulações dos transientes hidráulicos.

#### 4.6 Estação Elevatória

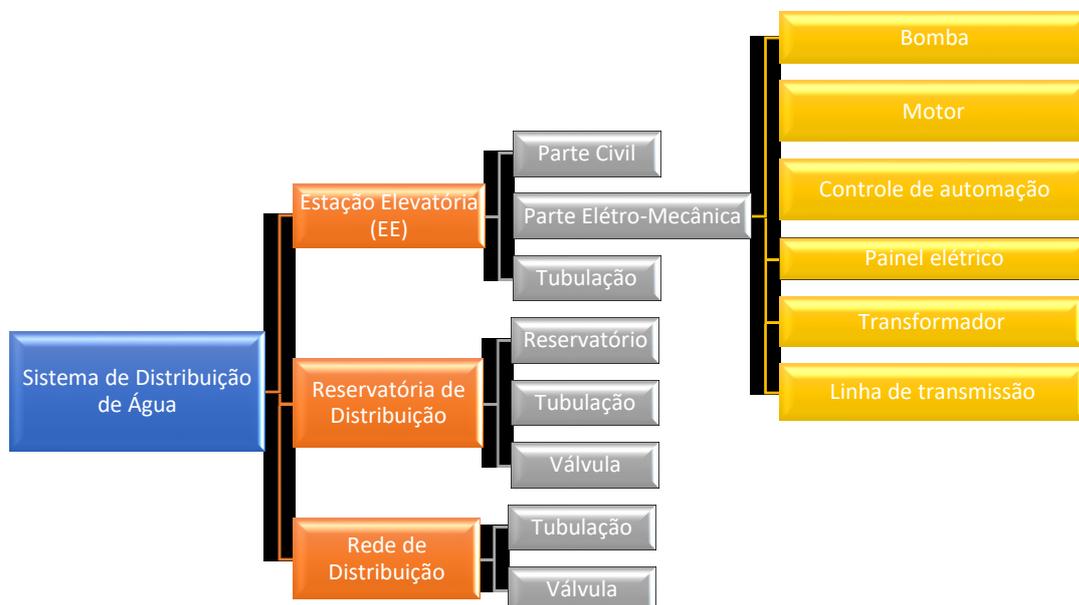
A figura 16 a seguir, apresenta de forma resumida os componentes e os subcomponentes do sistema de abastecimento de água de uma cidade.

De forma simples e resumida, as bombas em Sistemas de Abastecimento de Água podem ser classificação como mostrado na figura 18 a seguir.

Um Conjunto Motor-Bomba (CMB) pode iniciar seu funcionamento por um dos três métodos de comando a seguir:

1. Partida direta;
2. Partida estrela-triângulo e
3. Partida eletrônica (soft-starter).

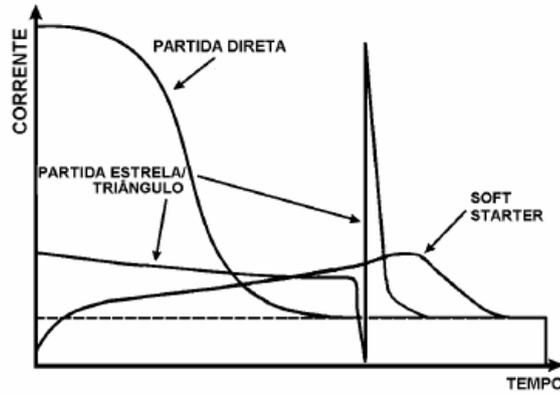
*Figura 16 - Componentes e subcomponentes de um sistema de abastecimento de água*



Fonte: autor

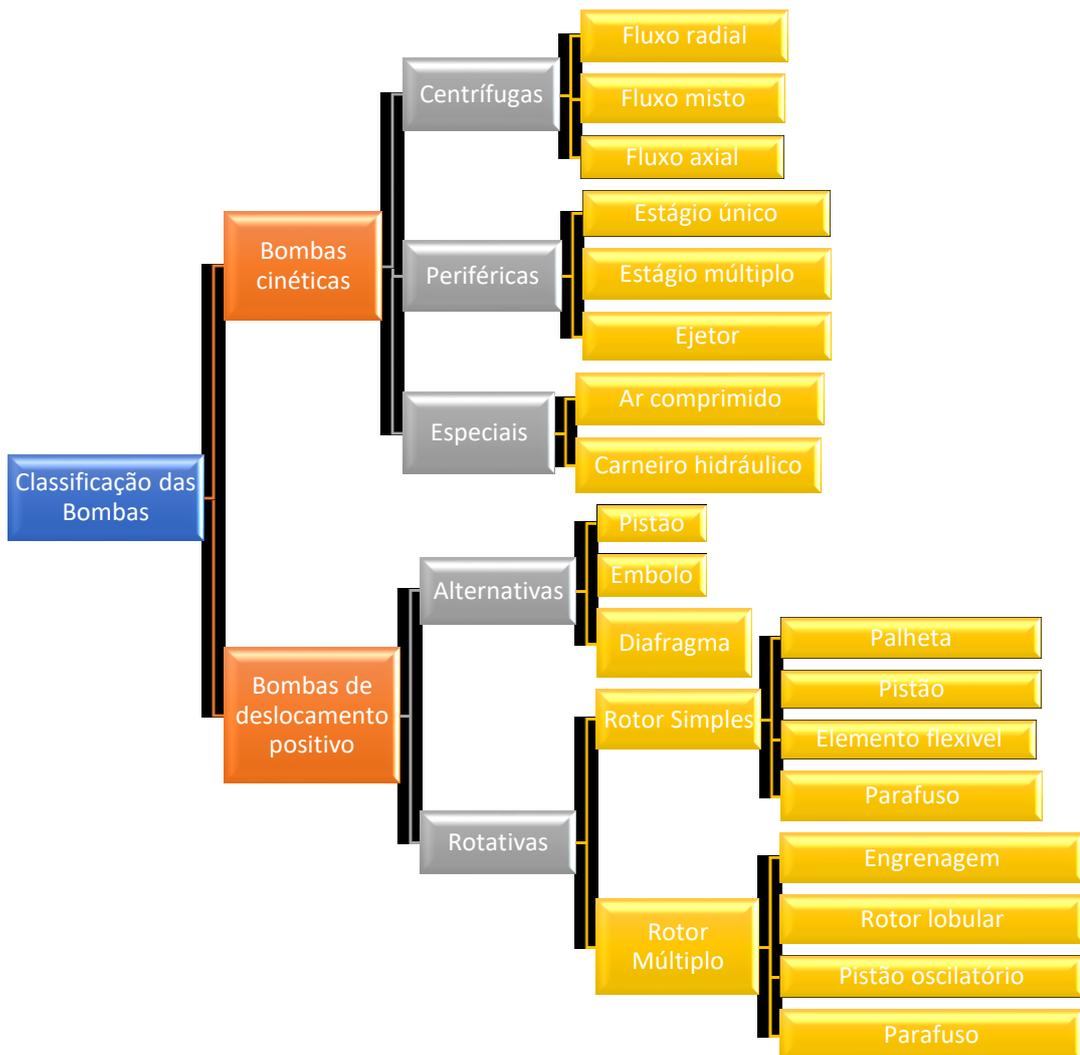
A figura 17 a seguir mostra os três métodos em uma relação corrente (i) x tempo (s)

Figura 17 - Tempo (s) x Corrente (A) dos métodos de acionamento de CMB



Fonte: Souza (2009)

Figura 18 - Classificação das bombas



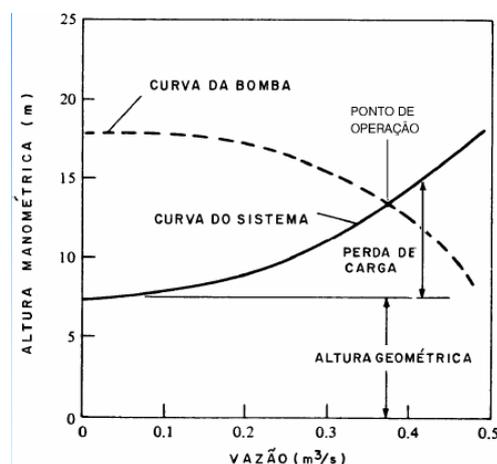
Fonte: autor

A escolha do melhor local para se ter uma estação elevatória deve atender aos seguintes itens:

- As dimensões do terreno deverão satisfazer às necessidades presentes e à expansão futura;
- Baixo custo e facilidades de desapropriação do terreno;
- Disponibilidade de energia elétrica;
- Topografia da área;
- Sondagens do terreno;
- Facilidades de acesso;
- Estabilidade contra erosão;
- Menor desnível geométrico;
- Trajeto mais curto da tubulação de recalque;
- Mínimo remanejamento de interferências;
- Menor movimento de terra;
- Segurança contra assoreamento;
- Harmonização da obra com o ambiente circunvizinho e
- Local que não alague

Para um sistema elevatório trabalhar dentro do padrão projetado, é preciso atingir o Ponto de Operação, como mostrado na figura 19.

*Figura 19 - Ponto de operação de um sistema elevatório*



Fonte: Souza (2009)

As estações elevatórias geralmente estão localizadas em uma das opções a seguir:

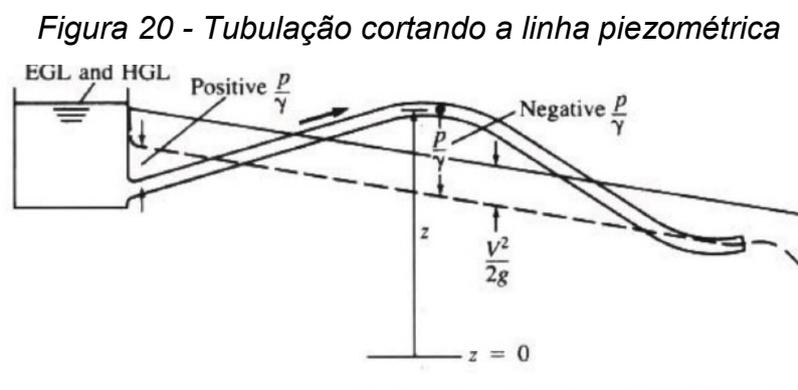
- Próxima do manancial;
- Junto ou próximas das estações de tratamento de água;
- Junto ou próximas aos reservatórios de distribuição de água e
- Para reforço na adução ou na rede de distribuição de água.

#### 4.7 Separação da coluna líquida

Se em um instante “t” a linha piezométrica transitória corta o perfil topográfico da tubulação, haverá o vácuo transientes com os riscos de ocorrer o seu colapso estrutural, as figuras 20 e 21, ilustram.

Para uma depressão excessiva, tal que a pressão transitória atinja o valor da pressão de vapor, ocorrerá a vaporização localizada do líquido e o fenômeno de cavitação acarretará a formação de uma cavidade de vapor no interior, separando desta forma as colunas líquidas. Este fenômeno é conhecido como “Separação das colunas líquidas”.

As colunas líquidas separadas tenderão a se fechar com o choque na fase seguinte do fenômeno transitório, acarretando, neste local, sobre pressões elevadas que irão se propagar nos dois sentidos a partir do ponto de reunião. Tais sobre pressões, atingindo valores que superam o limite estrutural das instalações, irão provocar a sua ruptura.



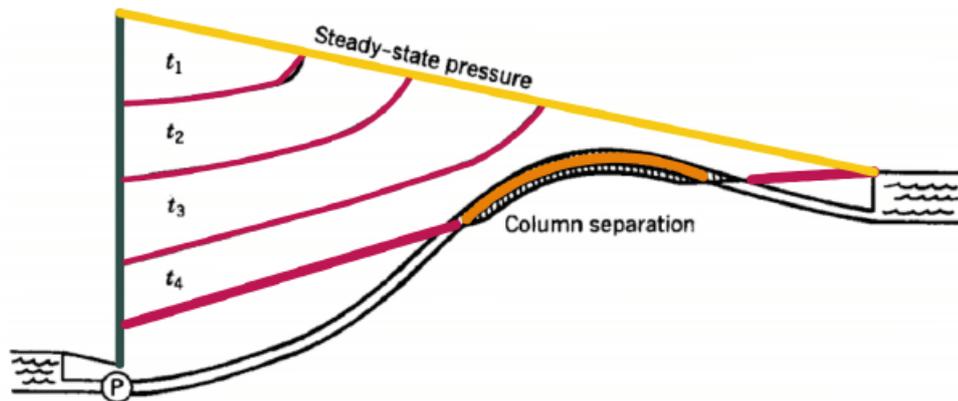
Fonte: Souza (2009)

Com atenção especial, devemos avaliar as linhas piezométricas para identificar as pressões máximas e mínimas do sistema. Especial atenção para as regiões onde há probabilidade de ocorrência de separação da coluna líquida e junção brusca.

A figura 22 a seguir mostra a separação de colunas líquidas quando ocorre o desligamento de uma bomba.

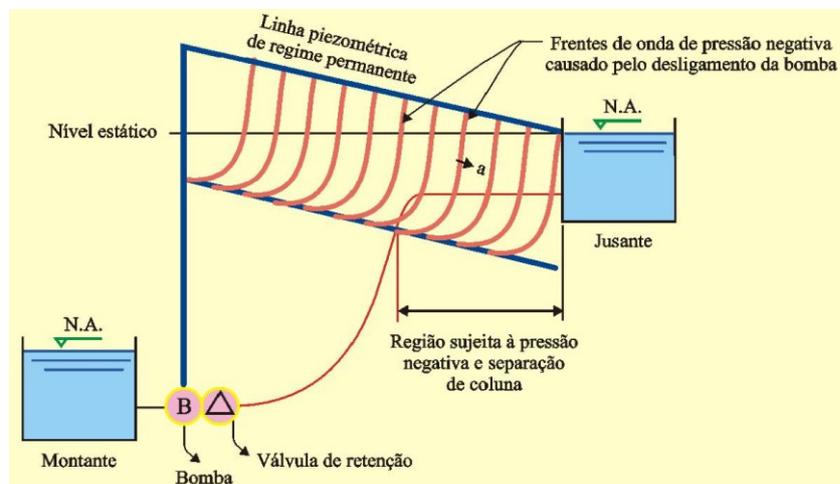
A figura 23 a seguir mostra a separação de colunas líquidas quando ocorre o fechamento de uma válvula.

Figura 21 - Onda de separação de pressão quando há quebra da coluna líquida



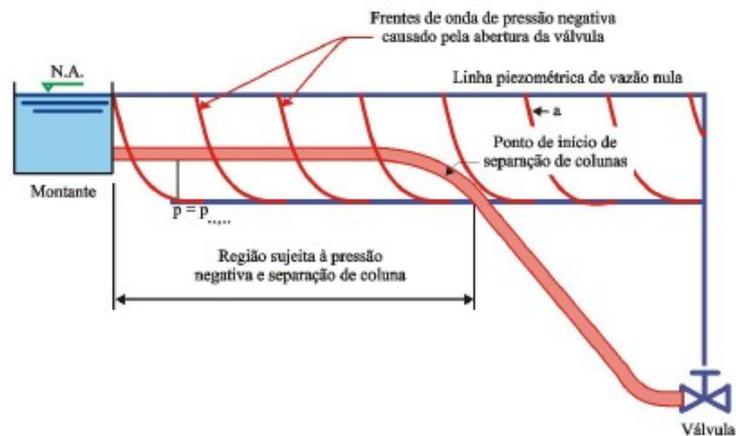
Fonte: Souza (2009)

Figura 22 - Separação da coluna líquida quando ocorre o desligamento de uma bomba



Fonte: Souza (2009)

Figura 23 - Separação de coluna líquida quando ocorre o fechamento de uma válvula



Fonte: Souza (2009)

A seguir a figura 24 mostra o que ocorre dentro da tubulação quando há a separação da coluna líquida e o rejuntamento da mesma.

Figura 24 - Separação da coluna líquida dentro de uma tubulação

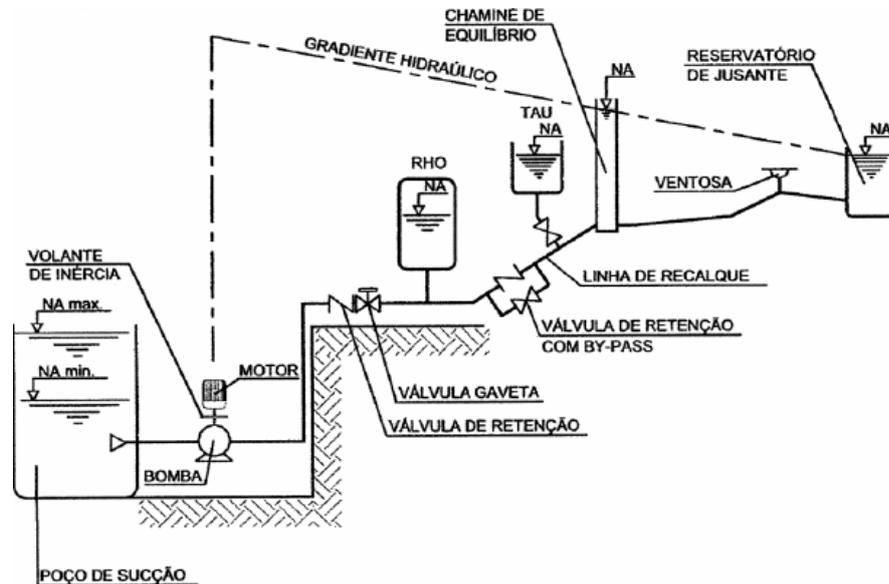


Fonte: Souza (2009)

A seguir, na figura 25 alguns dispositivos de proteção que podem ser utilizados para minimizar ou até mesmo eliminar os transientes hidráulicos e por consequência o Golpe de Aríete e a separação da coluna líquida.

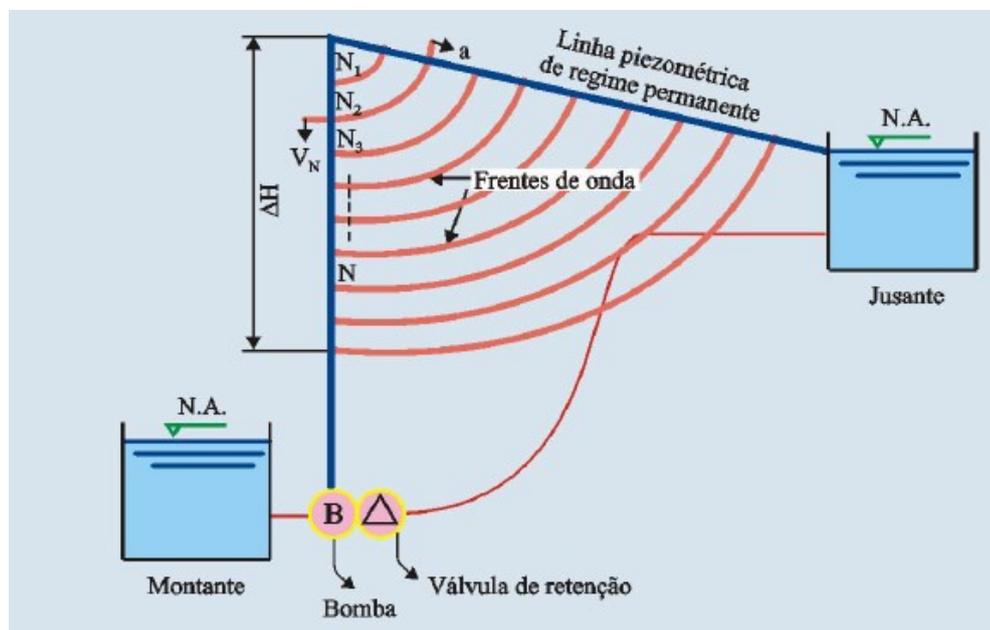
A figura 26, mostra o esquema de propagação de ondas de pressão (ondas de choque) quando ocorre a queda no funcionamento de CMB em uma estação elevatória (EE). A Figura 27 mostra a frente de onda refletida no reservatório a jusante logo após o desligamento do CMB.

Figura 25 - Alguns dispositivos utilizados para proteção do CMB contra os efeitos dos transientes hidráulicos



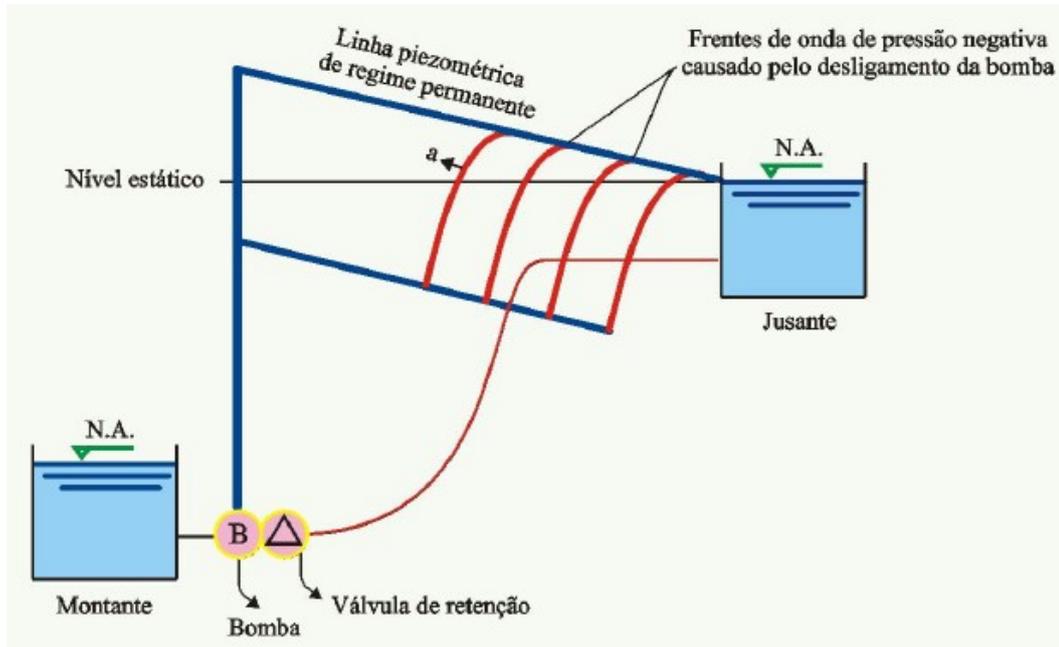
Fonte: Souza (2009)

Figura 26 - Esquema de propagação de ondas de pressão quando há parada do CMB



Fonte: Souza (2009)

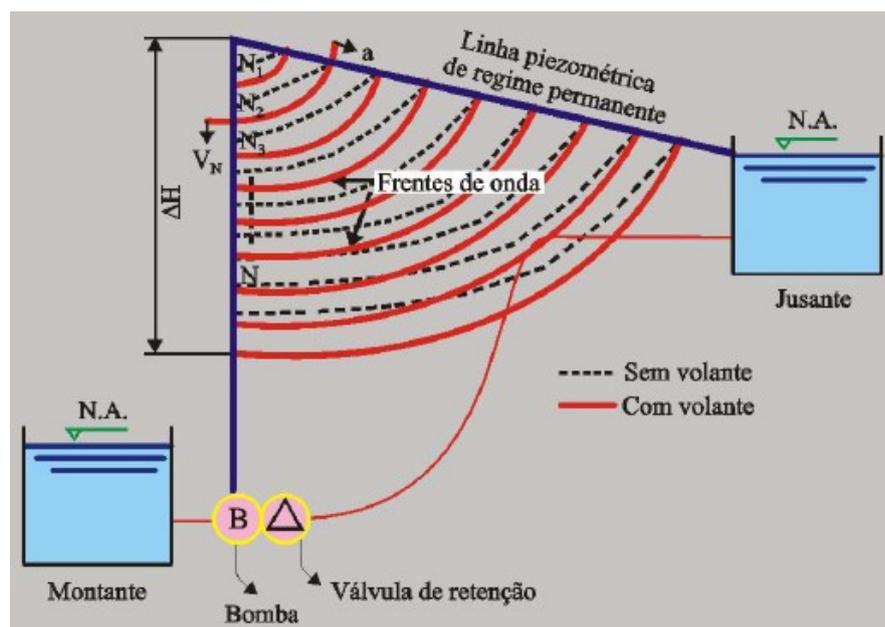
Figura 27 - Frente de onda refletida no reservatório a jusante logo após o desligamento do CMB



Fonte: Souza (2009)

A figura 28 mostra as ondas de pressão logo após o desligamento do CMB com e sem o volante de inércia

Figura 28 - Ondas de pressão após o desligamento de CMB com e sem volante de inércia



Fonte: Souza (2009)

## 4.8 Soft Allievi

ALLIEVI é um programa que proporciona condições para analisar e verificar os efeitos transitórios de manobras efetuadas nos elementos do sistema hidráulico. O programa permite analisar o escoamento em redes hidráulicas de condutos forçados alimentadas por vários reservatórios, com várias estações de bombeamento, e com o fluxo regulado por estações de válvulas formando redes malhadas, ramificadas ou mistas.

### 4.8.1 Introdução

O software dispõe de diferentes tipos de estações de válvulas inseridas nas tubulações da rede ou com descarga para o exterior. Algumas destas válvulas podem operar também como um sistema de proteção para controlar os transitórios hidráulicos. Em um sistema hidráulico operando em regime permanente, os transitórios podem ser gerados pelas ações dos elementos ativos do sistema. Estas ações ou manobras implicam variações das condições operacionais iniciais até se atingir o regime permanente final. As manobras de ligar/desligar bombas, abrir/fechar válvulas poderão ser simultâneas e poderão ocorrer ações adicionais que provocam transitórios.

Estas ações adicionais podem incluir mudanças no nível de líquido num reservatório, a modulação do consumo em uma rede de distribuição e, também a ruptura de uma tubulação em um dado momento. Destas três ações, as duas primeiras são geralmente consideradas manobras lentas ou muito lentas, razão pela qual os transientes gerados são irrelevantes. No entanto, a ruptura de um conduto pode causar uma transição rápida, especialmente quando a ruptura é significativa e ocorre em um intervalo de tempo relativamente curto.

Durante a transição, e enquanto o sistema se adapta de um estado permanente para outro, há variações e permutações de energia cinética em energia de pressão, e vice-versa, provocando flutuações de vazão e pressão no escoamento. As flutuações de velocidade não têm impacto direto sobre o sistema, mas se associam as mudanças

de pressão variando entre valores máximos e mínimos. É a pressão máxima que pode provocar rupturas e indicará a necessidade de proteger adequadamente o sistema instalando dispositivos apropriados para limitar os valores das pressões máximas.

Considerando os efeitos prejudiciais que podem ocorrer durante o desenvolvimento de um transitório hidráulico a solução será proporcionar aos elementos do sistema a resistência mecânica capaz de suportar as variações de pressão, ou instalar elementos de proteção para reduzir a amplitude destas flutuações e mantê-las entre limites aceitáveis. Para proceder de uma forma ou de outra sempre será necessário dispor de um programa de cálculo para simular o transitório e prever, dentre outros resultados, as pressões extremas que ocorrem depois de uma manobra assumida. Este é, como mencionado, o objetivo principal do ALLIEVI.

ALLIEVI é um programa de cálculo que pode ser utilizado tanto na fase de concepção de um projeto como na fase de verificação da operação de um sistema hidráulico. Na fase de concepção o programa permite que se incorpore ao sistema vários dispositivos de proteção (vasos de pressão, tanques alimentadores unidirecionais, chaminés de equilíbrio, válvulas de alívio, etc.), de modo que as oscilações de pressão geradas por manobras nos componentes do sistema sejam mantidas entre limites predeterminados.

Adicionalmente o ALLIEVI permite diagnosticar e visualizar os efeitos transitórios na operação do sistema ao se simular várias manobras numa instalação previamente projetada.

#### 4.8.2 Fundamentos de cálculos

Em um conduto forçado o transientes hidráulico é analisado aplicando as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento para um volume de controle que acompanha o deslocamento da onda de pressão ao longo da tubulação. É obtido um sistema de duas equações diferenciais não-lineares nas duas incógnitas ( $x$ -espaço

e t- tempo), para a determinação da carga piezométrica  $H=H(x, t)$  e da velocidade  $V=V(x, t)$ . A forma desse sistema de equações é apresentado em 108:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + f \cdot \frac{V \cdot |V|}{2 \cdot D} = 0 \end{cases} \quad (108)$$

Como este sistema não tem solução analítica, para a integração das equações o procedimento habitual é transformá-lo num sistema de equações de diferenças finitas e admitir que a solução seja alcançada em instantes t sucessivos separados de um intervalo  $\Delta t$  e em pontos x específicos (separados de uma distância  $\Delta x$ ) obedecendo a condição 109:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a \quad (109)$$

sendo "a" a celeridade, isto é, a velocidade de propagação da onda de pressão na tubulação. Esta celeridade, no caso da água, é calculada utilizando a expressão 110:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{47,6 + C \cdot \frac{D}{e}}} \quad (110)$$

onde o coeficiente C depende do material da tubulação.

As equações diferenciais acima são transformadas em um sistema de duas equações algébricas, lineares com duas incógnitas como em 111:

$$\begin{cases} H_i^{n+1} - H_{i-1}^n + \frac{a}{g} \cdot (V_i^{n+1} - V_{i-1}^n) + \frac{f_{i-1}^n \cdot \Delta x}{D} \cdot V_{i-1}^n \cdot |V_{i-1}^n| = 0 \\ H_i^{n+1} - H_{i+1}^n + \frac{a}{g} \cdot (V_i^{n+1} - V_{i+1}^n) + \frac{f_{i+1}^n \cdot \Delta x}{D} \cdot V_{i+1}^n \cdot |V_{i+1}^n| = 0 \end{cases} \quad (111)$$

Com as quais se pode calcular a carga piezométrica H e a velocidade V, na iésima seção da tubulação e no dado instante n+1, a partir dos valores de H e V conhecidos nos pontos i, i-1, i+1 no instante anterior n. Este procedimento utilizado no Allievi é conhecido como o "MOC - **MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS**".

O sistema acima pode ser resolvido para todos os pontos interiores de qualquer tubulação, mas não nos extremos, pois, aí, só há uma equação e duas incógnitas. Nesses extremos, onde se supõe que a tubulação está ligada a algum outro elemento da rede hidráulica, a equação que falta deverá representar o comportamento deste elemento; são as "**condições de contorno**". Estas condições de contorno representando o comportamento transitório do elemento podem se associar a novas incógnitas e, o ALLIEVI permite resolver o sistema de equações resultantes para considerar:

1. Reservatórios com seção variável
2. Estações de Bombeamento
3. Estruturas de controle de fluxo, que consiste em válvulas de vários tipos associadas em paralelo ou perda de carga localizada
4. Estruturas de Proteção, composto por vasos de pressão, tanques alimentadores unidirecionais e chaminés de equilíbrio.
5. Válvulas de Ar (ventosas), que podem ser distribuídas ao longo das tubulações.
6. Leis de carga piezométrica ou de vazão impostas nos extremos das tubulações.

#### 4.8.3 Cálculo do Regime Permanente

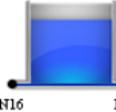
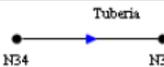
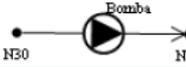
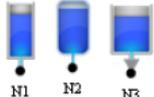
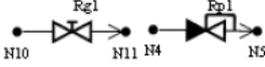
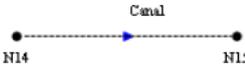
Em um sistema hidráulico o regime transitório decorre de manobras em seus elementos e começa a partir de um regime permanente inicial. No ALLIEVI, o cálculo do regime permanente inicial é realizado através do método das características sem

admitir a ocorrência de manobras. Com os resultados obtidos neste cálculo, essas condições são tomadas como CONDIÇÕES INICIAIS para a simulação do regime transitório, para o qual, se especificam as manobras a realizar nos elementos do sistema.

#### 4.8.4 Elementos do sistema a simular no ALLIEVI

O sistema hidráulico a simular é constituído de elementos que se interconectam entre si através de seus nós extremos. Em geral, cada elemento dispõe de dois nós, um inicial ou de entrada e outro final ou de saída, de maneira que o sentido positivo do fluxo em cada elemento se estabelece do nó inicial ao nó final. Os tipos de elementos considerados no programa podem ser vistos na figura 29.

*Figura 29 - Elementos utilizados no Allievi*

<i>Tipos de Elemento</i>	<i>Representação Gráfica no ALLIEVI</i>
1. Nós	 Nó
2. Reservatórios	 N16 N17
3. Tubulações	 Tuberia N34 N35
4. Estações de bombeamento	 Bomba N30 N31
5. Estruturas de Proteção	 N1 N2 N3
6. Estruturas de controle de vazão	 Rg1 Rp1 N10 N11 N4 N5
7. Leis de Vazão (Q) ou de carga (H)	 N12 N13
8. Conduitos livres (canais)	 Canal N14 N15

Fonte: ITA (2010)

O modo de introduzir os elementos no ALLIEVI é o seguinte:

- Ir ao menu Desenho → Básicos → Selecionar entre Nó, Tubulação, Bomba, Canal.
- Ir ao menu Desenho → Reservatório → Selecionar o tipo de reservatório e sua forma de conexão
- Ir ao menu Desenho → Válvulas → Selecionar o tipo de válvula que necessitas entre as possíveis opções proporcionadas no ALLIEVI (Válvula de regulação, retenção, automática, perda de carga, Estrutura composta para a opção de se ter válvulas instaladas em ramais em paralelo, e outras).
- Ir ao menu Desenho → Proteção → Selecionar entre Reservatório Hidropneumático (RHO), Tanque Alimentador Unidirecional (TAU) ou Chaminé de Equilíbrio (CEQ).
- Ir ao menu Desenho → Vários → Selecionar Lei ou outra opção indicada.

#### 4.8.4.1 Nó

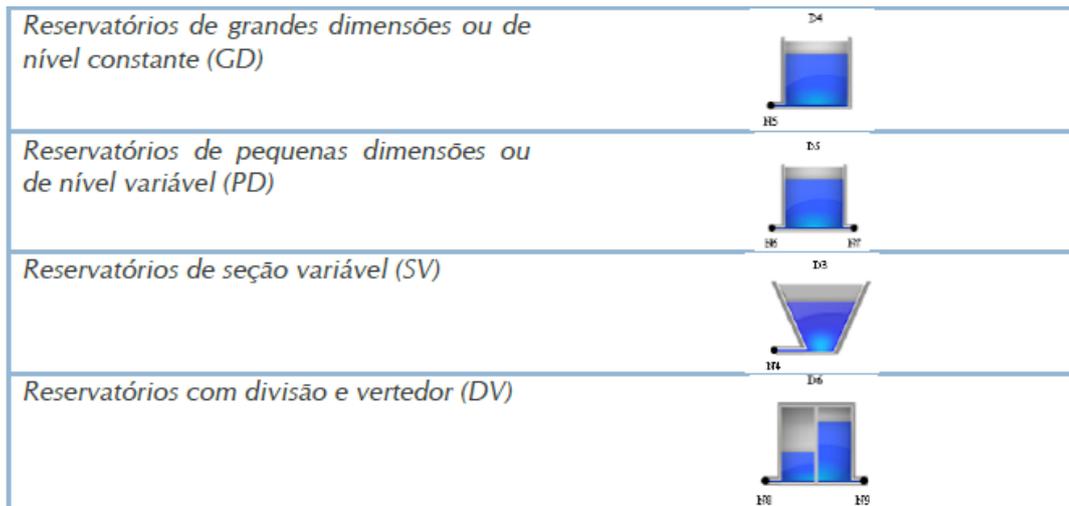
Ao gerar um nó, ALLIEVI requer que o usuário forneça o valor correspondente a:

- Denominação: A denominação (ou Nome) de cada nó é uma variável alfanumérica, com a única condição de não haver dois nós com a mesma denominação. Ao gerar um nó, o programa lhe atribui uma determinada denominação, que poderá ser modificada pelo usuário em qualquer momento. É muito importante ter em conta que, se a denominação proposta já está sendo utilizada em outro nó, será emitido o aviso de advertência e é necessário que o usuário modifique a denominação para poder continuar o desenho.
- Cota: É a cota do nó definida a partir de um nível de referência estabelecido pelo usuário.

#### 4.8.4.2 Reservatórios

Os Reservatórios são elementos do sistema nos quais se armazena líquido a pressão atmosférica. Os tipos de Reservatórios incluídos no programa são vistos na figura 30.

*Figura 30 - Tipos de reservatórios incluídos no Allievi*



Fonte: ITA (2010)

Reservatórios de grandes dimensões.

- Cota inicial de água ( $Z_0$ ): É a cota de água utilizada para calcular o regime permanente. Ao se tratar de um reservatório de grandes dimensões esta cota não se altera durante toda a simulação, independentemente das vazões de entrada e de saída que se estabelecem no processamento dos cálculos.

Reservatórios de pequenas dimensões

- Seção (S): É a seção transversal do reservatório, cujo valor é constante.
- Cota inicial de água ( $Z_0$ ): É a cota de água utilizada para calcular o regime permanente. Ao se tratar de um reservatório de pequenas dimensões esta cota se modificará ao longo da simulação, em função da seção do reservatório e das vazões de entrada e de saída que se estabelecem durante o processamento dos cálculos.

Reservatórios de seção variável

Nestes Reservatórios se admite que a seção varia em degraus, com tramos de seção constante entre a cota inferior e superior de cada degrau. As características destes Reservatórios são as seguintes:

- Cota inicial de água ( $Z$ ): É a cota de água utilizada para calcular o regime permanente. Esta cota pode se modificar ao longo da simulação do transitório.
- Para cada ponto  $i$  que define a seção do reservatório de seção variável:
  - Cota do ponto ( $z$ ): É a cota associada ao ponto  $i$ , a partir do nível de referência estabelecido.
  - Volume acumulado ( $V$ ): É o volume do reservatório acumulado desde a soleira até o ponto  $i$ . Para  $i = 0$ , o programa assume diretamente um volume acumulado igual a zero.

#### Reservatórios com divisão interna e vertedor

São os Reservatórios que dispõem de um vertedor retangular de parede delgada, transversal interno, que divide o reservatório em zona de entrada e de saída. Suas características são:

- Seção transversal a montante do vertedor ( $S_i$ ): É a seção do reservatório na zona de entrada.
- Seção transversal a jusante do vertedor ( $S_f$ ): É a seção do reservatório na zona de saída.
- Cota a montante e jusante do nível de água ( $Z_{S_i}$ ;  $Z_{S_f}$ ): São as cotas de água nas seções de entrada e de saída do reservatório, com as quais se calcula o regime permanente. Estas cotas podem ser iguais ou diferentes para as duas zonas do reservatório e podem ser alteradas durante a simulação do transitório.

#### 4.8.4.3 Tubulações

As características das tubulações são as seguintes:

- Comprimento ( $L$ ): É a extensão da tubulação.
- Diâmetro ( $D_{int}$ ): É o diâmetro interno da tubulação.
- Espessura da tubulação ( $e$ ): É a espessura da parede da tubulação que se utiliza para calcular a celeridade.
- Rugosidade absoluta ou ( $Rug$ ): As perdas por atrito em tubulações se calculam por meio da equação de Darcy, com o fator de atrito obtido mediante a fórmula de Colebrook. O usuário deve introduzir a rugosidade absoluta das paredes interiores da tubulação.

- Coeficiente de perdas singulares (k): É o coeficiente adimensional de perdas singulares global na tubulação.
- Celeridade: É a velocidade de propagação das ondas de pressão. Este dado se atribui diretamente para a tubulação ou se poderá calcular através do assistente a partir do diâmetro interno, da espessura da parede e do coeficiente do material da tubulação. Se é atribuído o valor zero para a celeridade, o transitório na tubulação será tratado como uma oscilação de massa.
- Traçado da tubulação (Perfil): Corresponde a forma geométrica do perfil da tubulação, definida a partir do traçado de seu eixo. Os dados necessários para definir o traçado de cada tubulação são os seguintes:
  - Distância da origem: É a distância do ponto *i* ao início da tubulação, medida ao longo do seu eixo. Para o ponto inicial o programa atribui diretamente à distância o valor zero, e para o ponto final o programa atribui à distância o valor igual ao comprimento da tubulação.
  - Cota: É a cota do ponto *i* situado sobre o eixo da tubulação. Para os extremos da tubulação o programa atribui as cotas dos nós correspondentes.

#### 4.8.4.4 Válvulas de ar (Ventosas) em tubulações

As ventosas se instalam para evitar pressões negativas em uma tubulação, admitindo ar quando a pressão interna no ponto em que está instalada tende a ser menor do que a pressão atmosférica e expulsando o ar quando a pressão alcança valores superiores a atmosférica. No entanto, a admissão de ar na tubulação poderá em alguns casos criar mais problemas do que soluções e, a utilização de ventosas como sistema de proteção para controlar os transitórios hidráulicos, se utiliza somente quando não há outro modo para evitar a ocorrência de pressões negativas.

ALLIEVI conta internamente com uma base de dados de características de ventosas, assim como permite que o usuário introduza os dados das curvas características de uma ventosa que deseja utilizar na instalação que está analisando. No Allievi as ventosas são configuráveis, ou seja, o usuário pode acessar as curvas de admissão e expulsão de ar das ventosas definidas e configuradas no programa.

#### 4.8.5 Ruptura de tubulação

ALLIEVI permite simular o efeito da ruptura de uma tubulação no sistema. Para isto, no assistente, para introduzir o perfil da tubulação que vai sofrer a ruptura, e selecionando a opção “Tubulação com ruptura” se introduzirão os seguintes dados:

- Distância da origem: É a distância desde a origem da tubulação até o ponto onde se vai produzir a ruptura.
- Instante da ruptura: É o instante que se inicia a ruptura.
- Duração da ruptura: É o tempo durante o qual permanece a ruptura.
- Kv final. É o coeficiente Kv final da ruptura, que relaciona a vazão descarregada por ruptura  $Q_{rot}$  com a pressão no interior da tubulação no ponto de ruptura  $P_{tub}$ , de acordo com a equação 112:

$$Q_{rot} = K_v \cdot \sqrt{P_{tub}} \quad (112)$$

Onde:

$Q \rightarrow$  vazão ( $m^3/h$ )

$P \rightarrow$  pressão ( $kg/m^2$ )

#### 4.8.6 Estações de bombeamento

As características gerais das estações de bombeamento são as seguintes:

- Número de bombas em paralelo: É o número de grupos instalados em paralelo, todos iguais, formando a Estação de bombeamento. Estes grupos terão exatamente o mesmo comportamento durante o transitório e poderão dispor a jusante de válvulas de regulação e de retenção submetidas a manobras iguais e, também de by-pass.
- Forma das curvas características das bombas: Se indica a forma de apresentação das curvas características das bombas,  $H_b = H_b(Q_b)$  e  $P_{acc} = P_{acc}(Q_b)$ , as quais podem ser Universais ou Ajustadas (por pontos).
- Tipo de válvula de grupo: Indica se existe ou não válvula de retenção e de regulação na saída de cada grupo, assim como by-pass entre a entrada e a saída da Estação de bombeamento.

- Inércia de cada grupo: É o momento de inércia das massas girantes de cada grupo, e inclui o rotor da bomba, o eixo, o acoplamento e o rotor do motor de acionamento. No caso de não dispor destes dados, o programa proporciona uma estimativa do momento de inércia do grupo utilizando a fórmula 113, de Thorley:

$$I = 0,03768 \cdot \left(\frac{P}{N^3}\right)^{0,9556} + 0,0043 \cdot \left(\frac{P}{N}\right)^{1,48} \quad (113)$$

Onde:

I → momento de inércia do grupo (Kg·m<sup>2</sup>);

P → potência nominal do grupo (Kw)

N → velocidade de rotação nominal (mil rpm).

Na expressão 113, o primeiro termo do segundo membro representa o momento de inércia da bomba e, o segundo termo o momento de inércia do motor elétrico de acionamento. Se for conhecido o valor de PD<sup>2</sup> do grupo, sua relação com o momento de inércia é dada por 114:

$$I(Kg \cdot m^2) = \frac{P \cdot D^2 (Nwm^2)}{4 \cdot G}; \quad I(kg \cdot m^2) = \frac{P \cdot D^2 (kp \cdot m^2)}{4} \quad (114)$$

- Velocidade de rotação de regime. É a velocidade de rotação dos grupos quando funcionam nas condições de regime permanente.
- Velocidade de rotação nominal: É a velocidade de rotação das bombas que corresponde às curvas características utilizadas.
- Funcionamento inicial das bombas: Nas condições iniciais os grupos podem estar em marcha (com a velocidade de rotação de regime), ou parados.

#### 4.8.6.1 Bombas com curvas características universais

Neste caso as curvas características das bombas se obtêm das curvas universais tabeladas para um total de 14 valores da rotação específica, de acordo com as variáveis propostas por Marchal, Flesch e Suter. Estas curvas permitem caracterizar

o comportamento das bombas em quaisquer condições de operação, isto é, para valores positivos, negativos ou nulos de vazão, altura e rotação.

Os dados necessários para caracterizar a bomba correspondem aos valores do ponto ótimo de operação (o ponto de rendimento máximo) na rotação nominal, isto é:

- Vazão  $Q_{b0}$ : É a vazão da bomba.
- Altura  $H_{b0}$ : É a altura gerada pela bomba.
- Potencia de acionamento  $P_{acc0}$ : É a potência de acionamento da bomba no ponto ótimo de operação.

Com estes três valores, o programa mostrará, para a verificação do usuário, o rendimento da bomba no ponto ótimo de operação com o seguinte procedimento.

#### 4.8.6.2 Bombas com curvas características por pontos

Os dados das curvas características ajustadas são fornecidos por pontos, para a rotação nominal, a partir das informações do catálogo fornecido pelo fabricante das bombas. Com esta informação o programa não poderá caracterizar o comportamento das bombas para valores negativos de vazão, altura ou rotação. Por isto esta forma de proporcionar as curvas características somente será útil nos casos em que o funcionamento das bombas for limitado ao primeiro quadrante, com rotação positiva. Para este caso, os dados necessários para obter as curvas características ajustadas deverão ser introduzidos de acordo com o seguinte procedimento:

- Vazão  $Q_{bi}$ : Vazão bombeada no ponto de funcionamento  $i$ .
- Altura  $H_{bi}$ : Altura associada ao ponto de funcionamento  $i$ .
- Potencia de acionamento  $P_{acci}$ : Potência de acionamento no ponto de funcionamento  $i$ .

Com estes três valores, para cada ponto de funcionamento  $i$ , o programa mostra a curva de rendimento da bomba para a verificação do usuário.

#### 4.8.6.3 Válvulas de grupo: Válvula de retenção

Os grupos de bombeamento com curvas ajustadas dispõem em todos os casos, de válvula de retenção. Os grupos com curvas universais poderão ou não dispor desta válvula de retenção na descarga.

Os dados necessários para a simulação são os seguintes:

- Coeficiente de perdas  $K_{VRt}$  da válvula de retenção: É o coeficiente de perdas na válvula de retenção totalmente aberta, com unidades em  $m/(m^3/s)^2$ , para o cálculo das perdas em função da vazão da bomba. Neste coeficiente de perdas deverão ser incluídas as perdas nos acessórios instalados na descarga atravessados pela vazão da bomba excluindo-se as perdas na válvula de regulação, se instalada.

#### 4.8.6.4 Válvulas de grupo: Válvula de regulação

A válvula de regulação se instala na descarga de cada grupo, geralmente após a válvula de retenção, se existe. Sua função é regular a vazão bombeada pelo grupo com o fechamento parcial ou isolar o grupo do sistema ao ser totalmente fechada.

As características destas válvulas são:

- Diâmetro nominal: É o diâmetro nominal da válvula de regulação.
- Tipo de válvula de regulação: É o tipo de válvula de regulação a instalar, selecionada entre os seguintes tipos:

$V_{Regulação} \rightarrow D$  (mm)

$V_{Regulação} \rightarrow$  Tipo: Borboleta

$V_{Regulação} \rightarrow$  Tipo: Comporta (gaveta)

$V_{Regulação} \rightarrow$  Tipo: Globo

$V_{Regulação} \rightarrow$  Tipo: Diafragma

$V_{Regulação} \rightarrow$  Tipo: Comercial

Para todos estes tipos, exceto para o caso de válvula comercial, o programa dispõe de curvas características típicas que proporcionam os valores dos coeficientes de perdas adimensionais em função do grau de abertura da válvula.

Para o caso da válvula comercial, a curva característica da válvula se obterá da base de dados de válvulas, a partir de informações de catálogo, e poderá ser adicionada ao programa do seguinte modo:

- Válvula comercial a instalar (Modelo): É a denominação da válvula comercial a instalar, com dados obtidos das válvulas comerciais disponíveis.

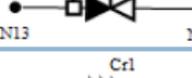
As válvulas de regulação instaladas nos grupos das Estações de Bombeamento poderão se submeter a manobras de fechamento e/ou abertura durante a simulação do transitório. Para definir estas manobras de forma tabular deverão ser fornecidos os seguintes dados:

- Instante  $t_i$ : É o instante de tempo correspondente ao ponto  $i$ .
- Grau de abertura  $A_{ri}$ : É a abertura relativa da válvula, em % relativa à abertura máxima (100%), no instante  $t_i$ .

#### 4.8.7 Estruturas de controle de vazão

As Estruturas de controle de vazão são constituídas basicamente por válvulas e outros componentes que intervêm na vazão circulante. Os elementos que se consideram nas Estruturas de controle de vazão são os mostrados na figura 31:

Figura 31 - Estrutura de controle de vazão

<i>Tipos de Elemento</i>	<i>Representação Gráfica no ALLIEVI</i>
1. Válvulas de regulação	
2. Válvulas de retenção	
3. Válvulas de alívio	
4. Válvulas de sobrevelocidade	
5. Perdas de carga localizadas	
6. Válvulas compostas (vários ramais em paralelo)	
7. Válvulas automáticas	

Fonte: ITA (2010)

#### 4.8.7.1 Válvulas de regulação

São válvulas cujo acionamento permite modificar a vazão circulante na instalação. Usualmente estarão inicialmente abertas, mas poderão fechar para isolar uma parte do sistema hidráulico. Suas características são:

- Cota (Z): É a cota em que se situa a válvula, é a mesma dos seus nós extremos.
- Diâmetro nominal (DN): É o diâmetro nominal da válvula.
- Coeficiente de perdas (k) do ramal: É o coeficiente de perdas adimensional do ramal no qual a válvula está instalada.
- Tipo de válvula: É o tipo de válvula a instalar, escolhida entre os seguintes tipos:
  - Borboleta
  - Esférica
  - Comporta (Gaveta)
  - Globo
  - Diafragma
  - Comercial

Para todos estes tipos, exceto no caso de válvula comercial, o programa dispõe de curvas características típicas que proporcionam os coeficientes de perdas adimensionais em função do grau de abertura da válvula.

Para o caso de válvula comercial, a curva característica da válvula se obtém da base de dados de válvulas a partir de informações de catálogos. Para estas válvulas se deve dispor do coeficiente de perdas adimensional em função do grau de abertura, entre 0 % e 100 % em intervalos de 5 % do grau de abertura.

As válvulas de regulação poderão se submeter a manobras de fechamento e/ou de abertura durante a simulação do transitório. Estas manobras poderão ser definidas como:

- Tabeladas
- Senoidais

Para definir as manobras de forma tabelada deverão ser introduzidos os seguintes dados:

- Instante  $t_i$ : É o instante de tempo correspondente ao ponto  $i$ .
- Grau de abertura  $A_{ri}$ : É a abertura reativa da válvula, em % relativa à abertura máxima (100%), no instante  $t_i$ .

#### 4.8.7.2 Válvulas de retenção

Estas válvulas abrem quando a vazão circula no sentido direto, e fecham quando a vazão se estabelece no sentido inverso. São consideradas elementos ideais, fechando instantaneamente no mesmo momento que a vazão na saída da válvula se inverte.

Suas características são:

- Cota: É a cota que se instala a válvula, a mesma dos nós extremos.
- Diâmetro nominal: É o diâmetro nominal da válvula.
- Coeficiente de perdas  $k$  do ramal: É o coeficiente adimensional de perdas do ramal onde a válvula está instalada.
- Coeficiente de perdas  $k$  da válvula fechada: É o coeficiente de perdas adimensional da válvula fechada. Se com a válvula fechada o fluxo inverso é impedido este coeficiente é assumido com um valor da ordem de  $1 \cdot 10^{32}$ .
- Coeficiente de perdas  $k$  de a válvula aberta: É o coeficiente adimensional de perdas da válvula totalmente aberta.

#### 4.8.7.3 Válvulas de alívio

São válvulas que se abrem quando a pressão em seu ponto de conexão supera um determinado valor, descarregando ao exterior toda ou parte da vazão circulante enquanto a pressão se mantém acima deste valor. Uma vez abertas, o grau de abertura é função da pressão de entrada até a abertura completa. E com a pressão mais baixa a válvula permanecerá fechada.

Suas características são:

- Cota: É a cota na qual se instala a válvula, é a mesma de seus nós extremos.

- Número de ramais em paralelo: É o número de válvulas de alívio, instaladas em paralelo, que constituem a “estrutura de alívio”. O programa admite um determinado número de válvulas em paralelo, não necessariamente iguais.

#### 4.8.7.4 Válvulas de sobrevelocidade

São válvulas que se fecham automaticamente quando se detecta uma variação considerável da vazão circulante, como pode ser o caso de uma ruptura. Sua função é evitar a ocorrência de inundações quando ocorrem rupturas. As características destas válvulas são:

- Cota: É a cota de instalação da válvula, é a mesma de seus nós extremos.
- Diâmetro nominal: É o diâmetro nominal da válvula.
- Coeficiente de perdas  $k$  do ramal: É o coeficiente adimensional de perdas do ramal da válvula.
- Tipo de válvula. É o tipo de válvula a instalar, dentre os seguintes tipos:
  - Borboleta
  - Esférica
  - Comporta (Gaveta)
  - Globo
  - Diafragma
  - Comercial

Em uma válvula de sobrevelocidade, o disparo (abertura plena) poderá ocorrer:

- Por velocidade mínima: A válvula dispara quando a velocidade na mesma é menor do que um valor determinado.
- Por velocidade máxima: A válvula dispara quando a velocidade na mesma é maior do que um valor determinado.
- Por diferença de vazões: A válvula dispara quando a diferença de vazões entre dois valores definidos em tubulações do sistema é maior do que um valor determinado.

#### 4.8.7.5 Perda de carga localizada

Corresponde a uma perda de carga localizada em uma posição determinada do sistema. Por exemplo, um acessório que provoca uma perda localizada entre dois tramos de uma tubulação. Os dados necessários são:

- Cota: É a cota que se situa a perda localizada, e a mesma dos nós extremos.
- Diâmetro nominal: É o diâmetro nominal do acessório que provoca a perda localizada.
- Coeficiente de perdas  $k$ : É o coeficiente adimensional de perdas do acessório.

#### 4.8.7.6 Válvula composta (ECQ)

É um elemento composto de um determinado número de válvulas instaladas em paralelo, as quais podem ser de regulação, de retenção, e acessórios que provoquem perdas localizadas. Para as válvulas compostas, os dados necessários são:

- Cota: É a cota na qual se situa a (ECQ), é a mesma de seus nós extremos.
- Número de válvulas de regulação: É o número de ramais com válvulas de regulação que formam parte da (ECQ).
- Número de válvulas de retenção: É o número de ramais com válvulas de retenção que formam parte da (ECQ).
- Número de perdas localizadas: É o número de ramais com acessórios, que provocam perdas localizadas, e formam parte da (ECQ).

#### 4.8.7.7 Válvulas automáticas

Estas válvulas têm funcionamento automático, modificando seu grau de abertura para manter constante o valor de um determinado parâmetro de operação. Os dados destas válvulas são:

- Cota: É a cota na qual se instala a válvula automática, é a mesma dos seus nós extremos.
- Diâmetro nominal: É o diâmetro nominal da válvula.
- Coeficiente de perdas  $k$  do ramal: É o coeficiente adimensional de perdas no ramal de conexão da válvula.
- Classe de válvula: É a classe da válvula a instalar, segundo a seguinte classificação:
  - Redutora de pressão

- Sustentadora de pressão
- Limitadora de vazão

- Tipo de válvula: É o tipo de válvula a instalar, dentre os seguintes tipos:

- Borboleta
- Esférica
- Comporta (Gaveta)
- Globo
- Diafragma
- Comercial

O funcionamento das válvulas automáticas está concebido como um controlador proporcional que, atuando sobre o grau de abertura da válvula, objetiva manter constante o valor da variável a ser controlada (set-point). Em geral, a expressão que define o funcionamento do controlador é dada por 115:

$$u(t) = \pm K_p \cdot e(t) \quad (115)$$

Sendo em cada caso:

$e \rightarrow$  Erro entre o valor desejado e o valor instantâneo obtido na operação

$u \rightarrow$  Resposta da válvula para a correção do erro detectado.

Na expressão 115 se toma o sinal positivo para as válvulas sustentadoras de pressão, enquanto que se toma o sinal negativo para as redutoras de pressão e para as reguladoras de vazão.

Os dados correspondentes para a regulação das válvulas automáticas são:

- Pressão de controle: É a pressão assumida (set-point) na entrada das válvulas sustentadoras de pressão, ou de saída nas válvulas redutoras de pressão.

- Vazão de controle: É a vazão assumida (set-point) nas válvulas reguladoras de vazão.
- Coeficiente  $K_p$ : É o coeficiente proporcional do regulador PID.

#### 4.8.8 Estruturas de proteção

As Estruturas de proteção são utilizadas para reduzir as oscilações de pressão no escoamento transitório. Em geral elas armazenam um determinado volume de água, e funcionam contribuindo com vazão para o sistema, no momento em que se reduz a vazão circulante. Posteriormente, ao se alterar o sentido do fluxo, vazão é introduzida na Estrutura de proteção provocando a desaceleração lenta do fluxo. Desta maneira as mudanças de vazão na tubulação são amortecidas, reduzindo a amplitude das oscilações de pressão.

Os elementos no ramal de interligação da tubulação principal com a estrutura de proteção deverão apresentar em seu conjunto um coeficiente de perdas de carga reduzido para o fluxo de saída da estrutura, e um coeficiente de perdas elevado para o fluxo contrário, de entrada na estrutura de proteção. Desta maneira facilita-se o fluxo de saída da estrutura de proteção para a tubulação principal, com o que se reduz os riscos de depressões nesta tubulação e se evitam as ocorrências de pressões negativas (vácuo) no sistema hidráulico. Além disto, ao se criar perda de carga elevada no fluxo de entrada para a estrutura de proteção, provoca-se a dissipação de energia e o amortecimento rápido do transitório.

Os tipos de Estruturas de proteção incluídos no programa são mostradas na figura 32.

##### 4.8.8.1 Chaminés de equilíbrio

- Diâmetro: É o diâmetro interior da Chaminé de seção circular constante.
- Rugosidade absoluta: É a rugosidade absoluta das paredes interiores da Chaminé.
- Cota da base: É a cota da base ou soleira da Chaminé.

Figura 32 - Estruturas de proteção

<i>Tipos de Elemento</i>	<i>Representação Gráfica no ALLIEVI</i>
1. <i>Chaminé de Equilíbrio (CEQ)</i>	
2. <i>Tanque Unidirecional (TAU)</i>	
3. <i>Reservatório Hidropneumático ou Calderín (RHO)</i>	
4. <i>Chaminé Diferencial</i>	
5. <i>Chaminé de Seção Variável</i>	

Fonte: ITA (2010)

#### 4.8.8.2 Tanques Alimentadores Unidirecionais (TAUs)

- Diâmetro: É o diâmetro interior do tanque unidirecional de seção circular constante
- Cota da base: É a cota da base ou soleira do tanque unidirecional.
- Rugosidade absoluta: É a rugosidade absoluta das paredes interiores do tanque unidirecional.
- Altura máxima da água no tanque unidirecional: É a altura máxima de água permitida no interior do tanque, referida à base ou soleira do tanque.

#### 4.8.8.3 Reservatórios Hidropneumáticos (RHOs) ou Calderíns

- Número de calderíns: É o número de calderíns iguais, instalados em paralelo, que constituem a Estrutura de Proteção.
- Diâmetro: É o diâmetro interno do calderín.
- Comprimento: É o comprimento do corpo paralelo do calderín, suposto cilíndrico.
- Volume: É o volume total do calderín, calculado pelo programa ao se dispor do diâmetro e do comprimento do calderín.
- Cota da base: É a cota da base ou da aresta inferior do calderín.
- Rugosidade absoluta: É a rugosidade absoluta das paredes internas do calderín.

- Pressão de Inchado do gás: No caso do calderín com bexiga é a pressão que se deve inflar a bexiga antes de se instalar o calderín no sistema hidráulico. Para o calderín sem bexiga, o inflado se realizará fechando a válvula no ramal de conexão do calderín com o sistema hidráulico (posteriormente esta válvula permanecerá sempre aberta com as bombas funcionando). Para o cálculo da pressão de inchado, admite-se que o gás sofre uma evolução isotérmica entre a condição de inchado e de funcionamento da instalação nas condições de regime, a expressão a utilizar é expressa por 116:

$$P_h^* \cdot V_{TC} = P_{OC}^* \cdot V_{0g} \quad (116)$$

Sendo:

$P_h^*$  → Pressão de inchado, em valor absoluto. Para determinar a pressão de inchado em valor relativo deverá ser subtraído o valor da pressão atmosférica.

$V_{TC}$  → Volume total do calderín.

$P_{OC}^*$  → Pressão do gás em valor absoluto nas condições de operação. Em calderins conectados ao barrilete de descarga da Estação de *bombeamento*, esta pressão se estima aproximadamente como a altura gerada pelas bombas nas condições operacionais, descontando a diferença de cotas entre as bombas e o nível médio da água nos calderins, e somando a pressão atmosférica.

$V_{0g}$  → Volume do gás no interior do calderín em condições de operação da estação de bombeamento.

- Expoente politrópico: É o expoente  $n$  que caracteriza a evolução termodinâmica do gás no interior do calderín durante o funcionamento do sistema em regime transitório, obedecendo à equação 117:

$$P_c^* \cdot V_g^n = cte \quad (117)$$

Para evolução isotérmica  $n = 1$ , para evolução adiabática  $n = 1,4$  e, para evolução politrópica  $n = 1,2$ . Este último valor é o habitualmente adotado, posto que a evolução do gás se considera intermediária entre a isotérmica e a adiabática.

- Posição do calderín (V – H): O calderín poderá ser instalado em posição vertical (V) ou horizontal (H).

#### 4.8.9 Lei de vazão ou de altura

Corresponde a imposição de uma lei de comportamento determinada em nós onde confluem tubulações. Esta lei pode ser:

- Lei de vazão
- Lei de altura

##### 4.8.9.1 Lei de vazão

Com esta lei se impõem uma vazão determinada associada aos nós correspondentes. Cabem as seguintes possibilidades:

- Por lei de Q
- Por pressão

Em todos os casos se introduzirá como dados a cota da lei,

- Cota: É a cota na qual se impõe a lei, é a mesma dos nós de conexão.

##### 4.8.9.1.1 Lei de vazão (lei de Q)

A imposição da vazão por lei força que a vazão que se vincula ao nó siga uma lei da forma conforme 118:

$$Q(t) = A \cdot t^2 + B \cdot t + C + D \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t + E\right) \quad (118)$$

Ao forçar a lei de vazão o programa calcula no nó a altura piezométrica requerida considerando esta vazão. Para este caso os dados necessários são:

- Coeficiente A: É o coeficiente de  $t^2$  na lei de Q.
- Coeficiente B: É o coeficiente de  $t$  na lei de Q.
- Termo independente C. É o termo independente na lei de Q.
- Coeficiente D. É o coeficiente da lei senoidal de Q.

- Período T: É o período da lei senoidal de Q.
- Ângulo de fase E: É o ângulo de fase da lei senoidal de Q.
- Limitação. Permite limitar os valores extremos de vazão proporcionados na lei de Q.

As possibilidades são as seguintes:

- Sem limitações
- Corta por baixo
- Corta por cima
- Corta acima e abaixo

Em caso de corte abaixo e/ou acima, deverão ser introduzidos os correspondentes valores de corte como valor mínimo e/ou máximo.

#### 4.8.9.1.2 Lei de vazão por pressão

Neste caso se admite que no nó exista um elemento que causa perdas de carga, de maneira que se descarrega uma vazão para atmosfera obedecendo a lei 119:

$$P_N(t) = K \cdot Q_N(t) \cdot |Q_N(t)| \quad (119)$$

Onde:

$P_N(t)$  → É a pressão no nó

$K$  → É o coeficiente de perdas no elemento que controla a vazão

$Q_N(t)$  → É a vazão no nó.

O coeficiente K será constante durante toda a simulação, e se avalia a partir da vazão inicial imposta e da pressão no nó nas condições de regime permanente.

- Valor de Q. É a vazão no nó nas condições iniciais.

#### 4.8.9.2 Lei de altura

Com esta lei se impõe uma altura piezométrica determinada em um nó onde confluem tubulações. Ao impor a altura piezométrica, o programa calcula a vazão que sai do nó nestas condições.

Para as leis de altura se dispõem de duas possibilidades,

- Sem reservatório associado
- Com reservatório associado

#### 4.8.9.2.1 Lei de altura sem reservatório associado

No caso em que não há reservatório associado, a função que impõe a altura piezométrica no nó é do tipo apresentado em 120:

$$H(t) = A \cdot t^2 + B \cdot t + C + D \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t + E\right) \quad (120)$$

Para a qual são requeridos os seguintes dados:

- Coeficiente A: É o coeficiente de  $t^2$  na lei de H.
- Coeficiente B: É o coeficiente de  $t$  na lei de H.
- Termo independente C: É o termo independente na lei de H.
- Coeficiente D: É o coeficiente da lei senoidal de H.
- Período T: É o período da lei senoidal de H.
- Angulo de fase E: É o ângulo de fase da lei senoidal de H.
- Limitação: Permite limitar os valores extremos de altura piezométrica proporcionados pela lei de H. As possibilidades são as seguintes:
  - Sem limitações
  - Corta por baixo
  - Corta por cima
  - Corta acima e abaixo

Em caso de corte abaixo e/ou acima, se introduzirão os valores de corte correspondentes como valor mínimo e/ou máximo.

## **5 ENGENHARIA DE MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES NA DIMINUIÇÃO DOS EFETOS DO GOLPE DE ARÍETE**

Os materiais estão provavelmente mais entranhados na nossa cultura do que a maioria de nós se dá conta. Nos transportes, habitação, vestuário, comunicação, recreação e produção de alimentos – virtualmente todos os seguimentos da nossa vida diária são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais. Historicamente o desenvolvimento e o avanço das sociedades estiverem intimamente ligados às habilidades dos seus membros em produzir e manipular materiais para satisfazer as suas necessidades. De fato, as civilizações antigas foram determinadas de acordo com o seu nível de desenvolvimento em relação os materiais (Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro) (CALLISTER, 2007)

Porque estudamos materiais, segundo William Callister Jr:

Muitas vezes, um problema de materiais consiste na seleção do material correto dentre muitos milhares de materiais disponíveis. Existem vários em relação aos quais normalmente se baseia a decisão final. Em primeiro lugar, as condições de serviço devem ser caracterizadas, uma vez que essas irão ditar as propriedades que o material deverá possuir. Em apenas raras ocasiões um material possui a combinação máxima ou ideal de propriedades. Desta forma, pode ser necessário abrir mão de uma característica por outra. O exemplo clássico envolve a resistência e a ductibilidade; normalmente, um material que possui uma alta resistência terá uma ductibilidade apenas limitada. Em tais casos, pode ser necessário um compromisso razoável entre duas ou mais propriedades.

Uma segunda consideração de seleção é qualquer deterioração das propriedades dos materiais que possa ocorrer durante a operação. Por exemplo, reduções significativas na resistência mecânica podem resultar da exposição a temperaturas elevadas ou ambientes corrosivos.

Finalmente, provavelmente a consideração definitiva está relacionada a aspectos econômicos. Quanto irá custar o produto acabado? Pode-se encontrar um material com o conjunto ideal de propriedades, mas com o preço proibitivo. Novamente, algum compromisso é inevitável. O custo de uma peça acabada também inclui qualquer

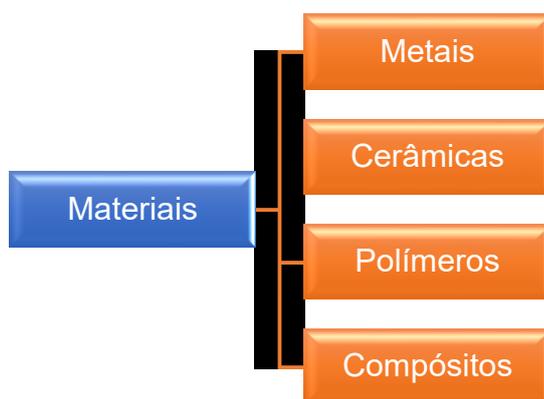
despesa incorrida durante o processo de fabricação para a obtenção da forma desejada.

Quanto mais familiarizado estiver um engenheiro ou um cientista com as várias características e relações estrutura-propriedade, assim com as técnicas de processamento de materiais, mais capacitado e confiante ele ou ela estará para fazer escolhas ponderadas e materiais com base nesses critérios.

Os materiais sólidos foram agrupados convenientemente em três classificações básicas: metais, cerâmicas e polímeros. Esse esquema está baseado principalmente na composição química e na estrutura atômica, e na maioria dos materiais se enquadra dentro de um ou de outro grupo distinto, embora existam alguns materiais intermediários. Adicionalmente, existem os compósitos, que consistem em combinações de duas ou mais das três classes básicas de materiais aqui citadas anteriormente. A figura 33 representa o esquema dos materiais sólidos.

Neste texto serão apresentados todos os três tipos de materiais, porém, os metais e os polímeros serão detalhados, pois são deles que a maioria dos materiais para saneamento são feitos para adutoras e dispositivos de proteção.

*Figura 33 - Esquema da classificação dos materiais*



Fonte: autor

## 5.1 Metais

Os materiais nesse grupo são compostos por um ou mais elementos metálicos (tais como, ferro, alumínio, cobre, titânio, ouro ou níquel) e com frequência, também elementos não-metálicos (por exemplo, carbono, nitrogênio e oxigênio) em quantidades relativamente pequenas. Os átomos dos metais e nas suas ligas estão arranjados de uma maneira muito ordenada e em comparação às cerâmicas e aos polímeros, são relativamente densos. Em relação às características mecânicas, esses materiais são relativamente rígidos e resistentes e ainda assim são dúcteis e resistentes a fratura (CALLISTER, 2007).

Os materiais metálicos possuem grande número de elétrons não localizados, isto é, esses elétrons não estão ligados a qualquer átomo em particular. Muitas das propriedades dos metais podem ser atribuídas diretamente a esses elétrons.

## 5.2 Cerâmicas

As cerâmicas são compostos formados entre elementos metálicos e não-metálicos; na maioria das vezes, elas consistem em óxidos, nitretos e carbetos. Por exemplo, alguns materiais cerâmicos comuns incluem o óxido de alumínio (ou alumina  $Al_2O_3$ ), o dióxido de silício (ou sílica,  $SiO_2$ ), carbeto de silício (SiC), nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ) e, ainda, o que alguns como sendo as cerâmicas tradicionais, aquelas que são compostas por minerais argilosos, assim como o cimento e o vidro. Em relação ao comportamento mecânico, os materiais cerâmicos são relativamente rígidos e resistentes (a rigidez e a resistência são comparáveis aquela dos metais. Adicionalmente, as cerâmicas são tipicamente muito duras. Por outro lado, elas são extremamente frágeis (ausência de ductibilidade) e altamente suscetíveis a fratura. Estes materiais são tipicamente isolantes à passagem de calor e eletricidade e são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes severos do que os metais e polímeros (CALLISTER, 2007).

## 5.3 Polímeros

Os polímeros incluem os familiares materiais plásticos e de borracha. Muitos deles são orgânicos quimicamente baseados no Carbono, no Hidrogênio e em outros elementos não metálicos como Oxigênio, Nitrogênio e Silício. Além disso, eles possuem

estruturas moleculares muito grandes, com frequência na forma de cadeias que possuem átomos de carbono como a sua espinha dorsal. Alguns dos polímeros comuns e familiares são o polietileno (PE), o náilon, o cloreto de polivinila (PVC), o policarbonato (PC), poliestireno (PS) e a borracha de silicone. Tipicamente, estes materiais possuem baixas densidades, enquanto as suas características mecânicas, são em geral, diferentes das características exibidas pelos materiais metálicos e cerâmicos – eles não são muito rígidos nem são muito resistentes como aqueles outros dois tipos de materiais. Entretanto, com base nas suas densidades reduzidas, muitas vezes a sua rigidez e resistência em relação à sua massa são comparáveis às dos metais e das cerâmicas. Adicionalmente, muitos dos polímeros são extremamente dúcteis e flexíveis (i.e., plásticos), o que significa que eles podem ser facilmente conformados em formas complexas. Em geral, eles são relativamente inertes quimicamente e não-reativos em diversos ambientes. Uma das maiores desvantagens dos polímeros é sua tendência em amolecer e/ou decompor em temperaturas modestas, o que em algumas situações limita seu uso. Eles possuem baixa condutibilidade elétrica e são não-magnéticos (CALLISTER, 2007).

#### 5.4 Compósitos

Um compósito é um composto por dois ou mais materiais individuais, os quais se enquadram dentro das categorias descritas acima, quais sejam: metais, cerâmicas e polímeros. A meta de projeto de um compósito consiste em se atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por qualquer material isolado e, incorporar as melhores características de cada um dos materiais componentes. Existem vários tipos de compósitos, os quais são representados por diferentes combinações de metais, cerâmicas e polímeros.

Um dos compósitos mais comuns e familiares é o que usa fibra de vidro, onde pequenas fibras de vidro são embutidas no interior de um material polimérico. Um outro desses materiais tecnologicamente importante é o compósito de polímero reforçado com fibras de carbono ou PRFC, o qual consiste em fibras de carbono embutidas no interior de um polímero (CALLISTER, 2007).

## 5.5 Materiais utilizados em tubulação de água (adutora) e em dispositivos de proteção contra o Golpe de Ariete

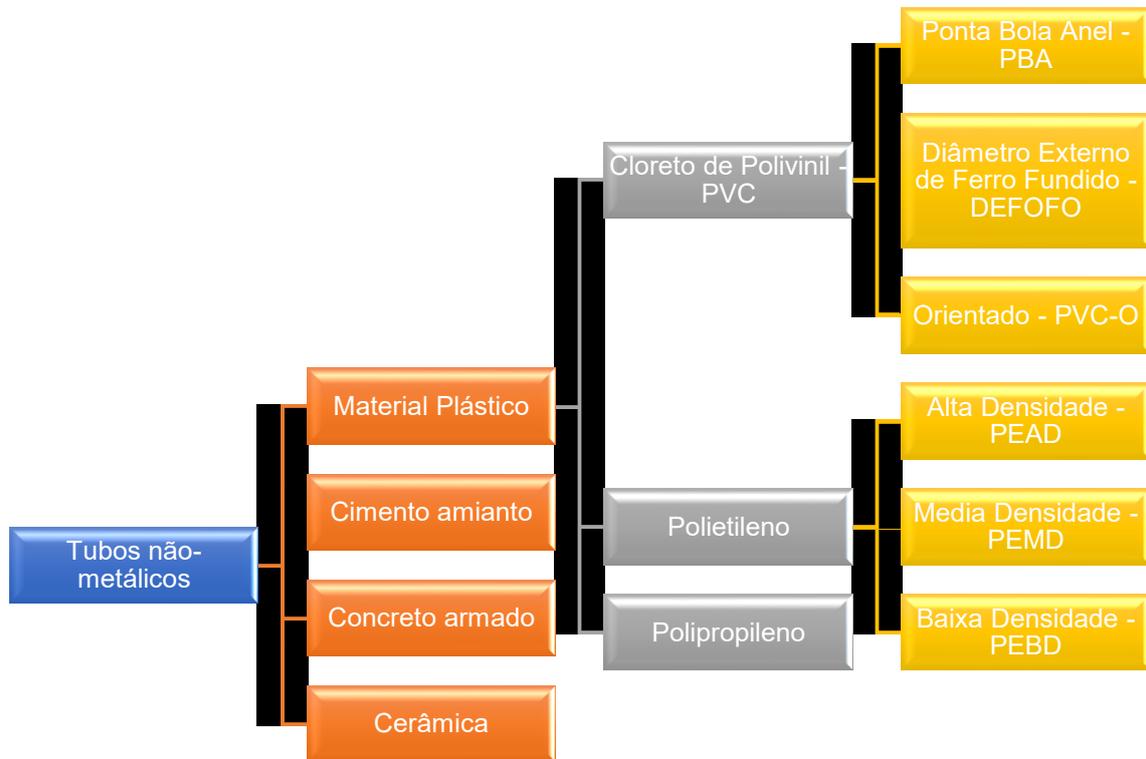
Diversos materiais são utilizados para fabricação de tubos e dispositivos de proteção para saneamento. Os tubos podem ser metálicos, poliméricos, cerâmicos ou compósitos. Nesta dissertação serão abordados os tubos metálicos (Tubo de Ferro Fundido Nodular e Tubo em aço carbono) e poliméricos (PVC DEFOFO, PVC-O e PEAD); os tubos cerâmicos não são utilizados para adutoras e nem para rede e abastecimento, basicamente são empregados para drenagem urbana e esgotamento sanitário atualmente, já os tubos compósitos como o PRFV (Polímero Revestido com Fibra de Vidro) estão em desuso devido a fragilidade da fibra de vidro, que no transporte e armazenagem pode sofrer fissuras e perder seu reforço estrutural. Um breve resumo pode ser visto nas figuras 34 e 35.

*Figura 34 - Tubos metálicos*



Fonte: Telles (2012)

*Figura 35 - Tubos não-metálicos*



Fonte: Telles (2012)

Quanto aos dispositivos de proteção, estes podem ser metálicos, poliméricos ou compósitos, dependendo da finalidade e dos esforços mecânicos. Há ventosas metálicas tanto corpo quanto tampa e ventosas compósitas, onde o corpo é metálico e a tampa é polimérica quando não há exigência de combater esforços mecânicos. O TAU (Tanque de Alimentação Unidirecional) basicamente é feito em concreto armado que é um material compósito, mas pode ser construído também em aço parafusado, com revestimento em epóxi ou vitrificado.

A seguir será detalhado o grupo de materiais metálicos e poliméricos empregados em saneamento. Os tubos, as válvulas e os dispositivos de proteção. Todos os tubos utilizados atualmente em abastecimento de água serão detalhados, informando material de fabricação, diâmetros e propriedades mecânicas.

### 5.5.1 Material metálico

Dentre os vários tubos metálicos, serão detalhados aqui o tubo em ferro fundido dúctil e o tubo em aço carbono.

#### 5.5.1.1 Tubo Ferro Fundido Dúctil

Entre as indústrias pioneiras de mecânica e metalurgia brasileiras, do início do século XX, um fato notável foi a invenção brasileira da fabricação de tubos de ferro fundido por centrifugação, de autoria dos Engenheiros Fernando Arens e Demètre Sensaud de Lavaud, patenteado pelos inventores e hoje em dia de uso generalizado em todo mundo. As primeiras experiências para elucidar os problemas que ocorrem na centrifugação do metal líquido e determinar a velocidade ótima de rotação do molde, foram feitas a partir de 1909 (MAGALHÃES, 2016).

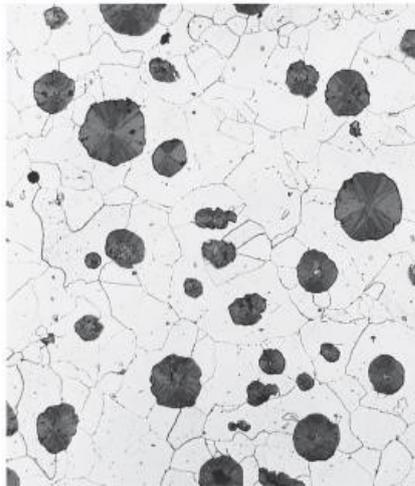
O tubo de Ferro Fundido Dúctil está presente no saneamento e na hidráulica aqui no Brasil desde 1910. Desde então vem evoluindo, principalmente na modularização e nos revestimentos interno e externo. Os tubos de PVC vêm sendo utilizados no Brasil desde 1975, ou seja, quando o ferro fundido já tinha 65 anos de uso no país um novo material chegou como opção. Em 41 anos houve muito progresso nas resinas e nas resistências mecânicas e hidráulicas dos tubos de PVC (MAGALHÃES, 2016).

Genericamente, os ferros fundidos formam uma classe de ligas ferrosas que possui teores de carbono acima de 2,11%. Na prática, contudo, a maioria dos ferros fundidos contém entre 3,0 e 4,5 % C e, além disso, outros elementos de liga. Ainda, alguns ferros fundidos são muito frágeis, e a fundição é a técnica de fabricação mais conveniente. Para a maioria dos ferros fundidos, o carbono existe como grafita, e tanto a microestrutura quanto o comportamento mecânico dependem da composição e do tratamento térmico. Os tipos mais comuns de ferros fundidos são os ferros fundidos cinzento, nodular, branco e maleável. Os tubos de ferro fundido utilizados atualmente no saneamento são do tipo nodular (MAGALHÃES, 2016).

A adição de uma pequena quantidade de magnésio e/ou cério ao aço cinzento antes da fundição produz uma microestrutura e um conjunto de propriedades mecânicas muito diferentes. A grafita ainda se forma, porém como nódulos ou partículas com

formato de esfera e não de flocos. A liga resultante é conhecida por ferro nodular ou ferro dúctil. A fase matriz que circunda essas partículas consiste ou em perlita ou em ferrita, dependendo do tratamento térmico. Ela é normalmente perlita para uma peça no estado bruto de fusão. Contudo, um tratamento térmico por várias horas a aproximadamente 700°C (1300°F) irá produzir uma matriz de ferrita como nessa fotomicrografia representada na figura 36.

*Figura 36 - Matriz ferrítica: ferro fundido nodular*



Fonte: Callister (2007)

Existem quatro tipos de ferros fundidos comercialmente, como mostrado na tabela 2. A diferença entre eles é basicamente a forma de resfriamento e a presença de elementos de liga.

Uma classificação de produtos ferrosos pode ser estabelecida em função do teor de carbono (C) no metal de base:

- Ferro: 0 a 0,1% de C;
- Aço: 0,1 a 1,7% de C;
- Ferro fundido: 1,7 a 5% de C.

Abaixo de 1,7% de Carbono, a solidificação passa por uma fase austenítica, dentro da qual todo o Carbono está em solução sólida.

Acima de 1,7% de Carbono, este não pode ser diluído em sua totalidade dentro da estrutura do ferro e desse modo se solidifica sob a forma de uma segunda fase, seja de grafita (Carbono puro) ou de carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). O ferro é um material polifásico de estrutura complexa: os constituintes principais são a ferrita ( $\text{Fe}_\alpha$ ) e a perlita ( $\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) (TELLES, 2012).

Outros elementos, presentes no ferro em proporções muito baixas, tem uma influência sobre a estrutura e as propriedades mecânicas e da moldabilidade do metal. O silício (habitualmente com teores de 1 a 3%) desempenha um papel particular e na realidade, transforma o ferro fundido em uma liga ternária: Ferro – Carbono - Silício (Fe-C-Si).

O termo ferro fundido cobre uma larga variedade de ligas Fe-C-Si. Ele é classificado em famílias (tabela 1) segundo a forma da grafita, com uma diferenciação suplementar devido à estrutura da matriz metálica (ferrítica, Perlítica).

*Tabela 1 - Tipos de ferro fundido*

Ferro fundido branco	Ferro fundido cinzento
Ferro fundido maleável	Ferro fundido dúctil ou nodular

Fonte: autor

Características dos ferros fundidos:

- Ferro fundido branco
  - Duro e frágil;
  - Excelente resistência ao desgaste
- Ferro fundido cinzento
  - grafita em veios;
  - frágil sob tensão trativa;
  - resistência a compressão;
  - resistência ao desgaste;
  - excelente absorção a vibrações;
- Ferro fundido maleável
  - Modificação do ferro fundido branco através de tratamento térmico;
  - Maior ductibilidade do que o ferro fundido branco;

- Grafita em nódulos difusos;
- Ferro fundido dúctil ou nodular
  - Adiciona Mg ou Ce ao ferro fundido cinzento;
  - Grafita em nódulos;
  - Matriz Perlítica, tem melhor ductibilidade;

Parte da metalografia quantitativa que consiste no estudo da forma da grafita, verificando sua aproximação à forma de uma esfera. Através deste estudo mede-se a eficiência do tratamento do banho líquido. Este estudo pode ser feito pelo método comparativo ou por contagem direta ao microscópio ou em fotomicrografia.

A análise de imagem para o grau de nodularização é feita de acordo com a norma JIS G 5502-86, utilizando-se da seguinte fórmula:

$$\text{Grau de Nodularização (\%)} = \frac{1 \cdot n_1 + 0,9 \cdot n_2 + 0,7 \cdot n_3 + 0,3 \cdot n_4 + 0 \cdot n_5}{(n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5)} \quad (121)$$

onde  $n_1$  à  $n_5$  são os números de partículas do tipo I à V e os multiplicadores de 0 a 1 são os fatores de forma correspondentes.

Porcentagem de Grafita Nodular e Não-Nodular – Consiste na medida da quantidade de grafita tipos I à VII ASTM A 147-67, considerando a fração volumétrica de cada forma de grafita, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\%G = \left( \sum \frac{G}{N} \right) - 100 \quad (122)$$

onde  $\sum G$  é a soma das grafitas não nodulares e N número de campos analisados.

Por este processo avalia-se a eficiência da nodularização e do processo de inoculação de ferros fundidos nodulares. Outra utilidade é a classificação entre ferro fundido nodular e vermicular.

As propriedades do ferro fundido em sua maior parte estão correlacionadas com a sua estrutura que, por sua vez, pode ser modificada pelo controle de algumas variáveis que intervêm no processo de solidificação.

A qualidade do ferro fundido produzido é normalmente avaliada com base em propriedades mecânicas resultantes do ensaio de tração, determinadas em corpos-de-prova cujo processo de obtenção e características são estabelecidos em normas técnicas.

As especificações dos usuários das peças incluem, muitas vezes, além dessas propriedades, requisitos de dureza, matriz metálica, composição química e, mais esporadicamente, valores mínimos de resistência ao impacto ou à fadiga. Tais requisitos serão ligados à solicitação das peças em serviço, à necessidade e tipo de usinagem a ser realizada e aos tipos de tratamento térmico ou tratamentos superficiais aos quais as peças serão submetidas (CALLISTER, 2007)

A análise química especificada é atingida através da composição adequada da carga do forno e do controle do processo de fusão. A matriz metálica é decorrente dessa composição química atingida e das consequências das condições nucleantes do banho na quantidade e distribuição da grafita, considerando um determinado tipo de ferro fundido, uma dada geometria da peça e um dado conjunto de condições de esfriamento das peças. Relativamente às propriedades mecânicas, estas dependem essencialmente da matriz metálica obtida, da quantidade, morfologia e distribuição da grafita presente na microestrutura (TELLES, 2012).

A resistência mecânica da grafita é desprezível em relação á dos outros microconstituintes da matriz metálica, podendo assim ser considerada como descontinuidade. Na produção de ferros fundidos, o tamanho e a morfologia da grafita é a componente microestrutural mais importante no controle das propriedades tecnológicas.

A análise de imagens metalográficas digitalizadas, permite avaliar as características da grafita com precisão e rapidez, melhorando assim a confiabilidade dos resultados.

O Ferro Fundido Nodular é utilizado na fabricação de tubos de ferro, conexões e válvulas: possui maior resistência entre os ferros fundidos, a grafita se apresenta na forma de nódulos, com isso aumenta sua resistência a propagação de fissuras e a nodularidade é conseguida adicionando-se magnésio ao ferro líquido no momento do vazamento, ou seja, dentro da coquilha pouco antes de ser lançado dentro do molde.

Na tabela 2 estão apresentadas as propriedades dos ferros fundidos nodulares de acordo com a NBR-6916/1981 (ABNT, 1981).

*Tabela 2 - Propriedades de ferros fundidos nodulares de acordo com a Norma Técnica ABNT-6916/1981*

Classe	Limite de Resistência (LR) MPa	Limite de Escoamento (LE) MPa	Alongamento (A) %	Dureza Brinel (HB)	Microestrutura predominante
FE38012	380	240	17,0	140-180	Ferrítica
<b>FE42012</b>	<b>420</b>	<b>280</b>	<b>12,0</b>	<b>150-200</b>	<b>Ferrítica-Perlítica</b>
FE50007	500	350	7,0	170-240	Ferrítica-Perlítica
FE60003	600	400	3,0	210-280	Perlítica
FE70002	700	450	2,0	230-300	Perlítica
FE80002	800	550	2,0	240-312	Perlítica
FE38017 - RI	380	240	17,0	140-180	Ferrítica

OBS: RI – Resistência ao choque

Fonte: ABNT (1981)

As letras FE, que a Norma Nacional se refere, indicam ferro grafita esferoidal (nódulos), os três primeiros algarismos indicam a resistência a tração em MPa (Mega Pascal) e os dois últimos algarismos o alongamento em %. O tubo FOFO é feito utilizando o FE42012. Isso quer dizer que tem resistência a tração de 420 MPa e alongamento de 12% (MAGALHÃES, 2017).

O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductibilidade e a rigidez.

Os principais processos de fabricação para tubos em ferro fundido são o de Lavaud (nos DN 80 a 600) e o sistema Wet Spray (nos DN 700 a 2000). No processo de Lavaud, o metal líquido é vazado em molde metálico de aço e sofre um resfriamento muito rápido. Um recozimento de grafitização e após, de ferritização é necessário para obter tubos com a estrutura e as propriedades mecânicas desejadas. O processo de centrifugação consiste em vazar o ferro líquido, através de um canal, em um molde metálico cilíndrico (coquilha) em alta rotação. A solidificação do metal é feita por resfriamento externo do molde metálico (MAGALHÃES, 2017).

No processo Wet Spray, a superfície interior do molde metálico, de aço, é coberta (antes de vazar o ferro fundido) com uma fina camada de pó de sílica refratária, o que diminui a condutibilidade térmica da interface do metal líquido com o molde metálico. A velocidade de resfriamento da parede do tubo é inferior à do processo de Lavaud e somente um recozimento de ferritização é necessário.

Na foto 37 mostra um tubo de ferro fundido dúctil saindo do molde, no início do século XIX os tubos tinham comprimento máximo de 3,0m e a fundição era vertical.

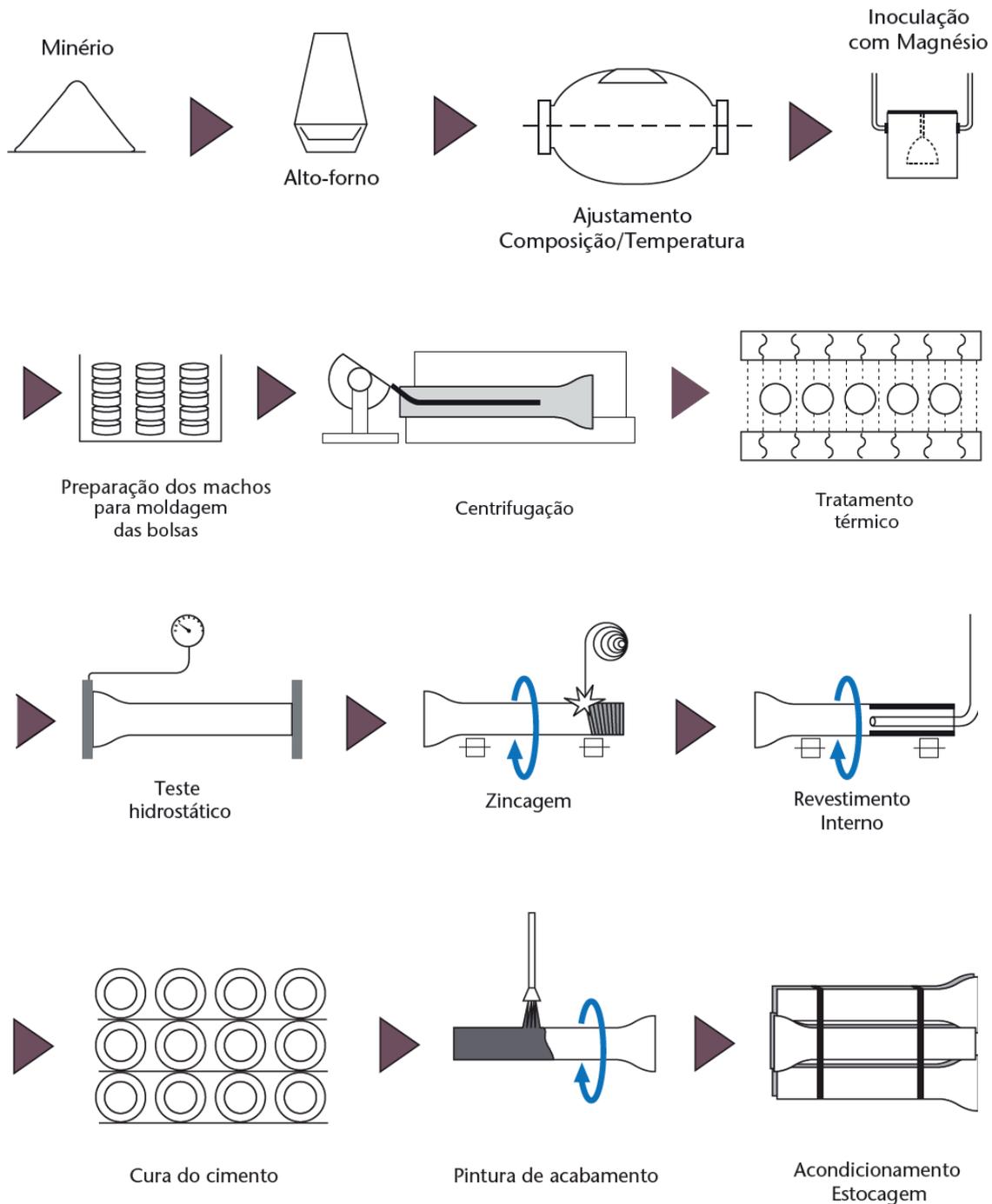
*Figura 37 - Fabricação de tubo de ferro fundido dúctil no início do século XIX*



Fonte: Saint Gobain (2015)

A seguir na figura 38 é apresentado de forma simplificada o processo de fabricação de tubo em ferro fundido dúctil.

*Figura 38 - - Processo de fabricação de tubo de ferro fundido dúctil atualmente*



Fonte: Catálogo Jindal (2016)

A partir da década de 40, a fundição passou a ser horizontal e o comprimento máximo do tubo passou a ser de 7,0m. As figuras 39 e 40 ilustram o processo atual.

*Figura 39 - - Processo de fabricação atual*



Fonte: Saint Gobain (2015)

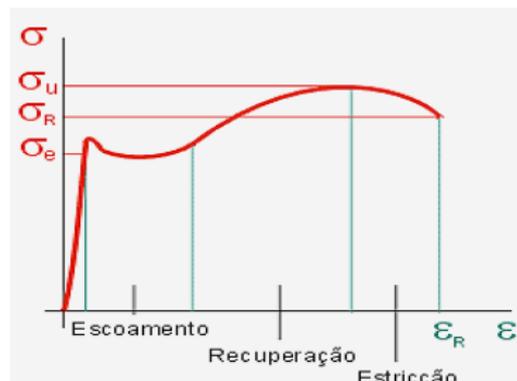
*Figura 40 - Processo de fabricação atual - cimentação*



Fonte: autor

A figura 41 mostra o gráfico tensão x deformação para materiais dúcteis com o ferro e o aço.

*Figura 41 - Diagrama deformação x tensão de materiais dúcteis*



Fonte: Callister (2007)

Onde:

$\sigma_u$  → tensão última (máxima tensão que se atinge);

$\sigma_R$  → tensão de ruptura (tensão que, se atingida, provoca ruptura do material);

$\sigma_e$  → tensão de escoamento;

$\epsilon_R$  → deformação de ruptura (deformação que, se atingida, provoca a ruptura do material)

Para calcularmos a Pressão Máxima de Serviço (PSA) utilizamos a equação 123

$$PSA = \frac{2 \cdot e \cdot R_m}{D \cdot C_S} \quad (123)$$

OBS.: Máximo de 6,4 MPa

Onde:

$e$  → Espessura mínima da parede do tubo (mm);

$D$  → Diâmetro médio do tubo (mm).

$R_m$  → Resistência mínima a tração do ferro dúctil (MPa);

$C_S$  → Coeficiente de segurança ( $C_S = 3$ , NBR- 7675).

De forma geral o tubo de ferro fundido dúctil vendido no Brasil é de classe K7 ou K9, com diâmetros variando de DN 80 a 1200. O **K** é um coeficiente utilizado para designar a classe de espessura, sendo selecionado de uma série de números inteiros entre 4 e 12.

A espessura da parede do tubo é dada pela fórmula 124:

$$e = K * (0,5 + 0,001 DN) \quad (124)$$

onde:

$e$  = espessura nominal da parede do tubo (mm);

DN = Diâmetro Nominal (mm).

Para tubos de classe K7, devem ser aplicadas as seguintes exceções à fórmula acima:

- Para tubo DN 80,  $e = 4,3 + 0,008 \text{ DN}$ ;
- Para tubos DN 100 até 300,  $e = 4,75 + 0,003 \text{ DN}$

#### 5.5.1.2 Tubo Aço Carbono

Entre todos os materiais industriais existentes, o aço carbono é o apresenta menor relação custo/resistência mecânica, além de ser um material fácil de soldar e de conformar também fácil de ser encontrado no comércio (TELLES, 2012).

As propriedades do aço-carbono são grandemente influenciadas por sua composição química e pela temperatura. O aumento na quantidade de carbono no aço produz basicamente um aumento nos limites de resistência e de escoamento e na dureza e temperabilidade do aço; em compensação, esse aumento prejudica bastante a ductibilidade e a soldabilidade do aço. Por este motivo, em aços para tubos limita-se a quantidade de carbono até 0,35%, sendo que até 0,30% de C a solda é bastante fácil e até 0,25% de C os tubos podem ser facilmente dobrados a frio (TELLES, 2012).

Os aços de baixo carbono (até 0,25% C) têm limite de resistência da ordem de 310 a 370 MPa ( $\cong 31$  a  $37 \text{ kg/mm}^2$ ), limite de escoamento de 150 a 220 MPa ( $\cong 15$  a  $22 \text{ kg/mm}^2$ ). Para os aços de médio carbono (até 0,35% C), esses valores são respectivamente 370 a 540 MPa ( $\cong 37$  a  $54 \text{ kg/mm}^2$ ) e 220 a 280 MPa ( $\cong 22$  a  $28 \text{ kg/mm}^2$ ) (TELLES, 2012).

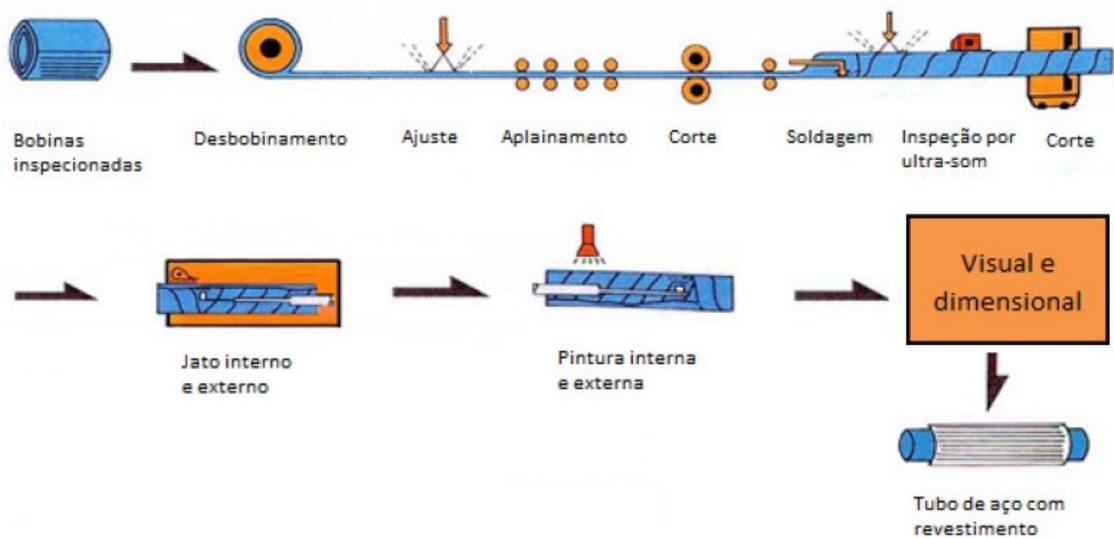
A resistência mecânica do aço-carbono começa a sofrer uma forte redução em temperaturas superiores a  $400^\circ \text{ C}$ , em função do tempo, devido principalmente ao fenômeno de deformações permanentes por influência (creep) (TELLES, 2012).

O aço carbono é um material de baixa resistência à corrosão, sendo muito raros os serviços para os quais não haja nenhuma corrosão. Por essa razão, é quase sempre

necessário acréscimo de alguma sobreespessura (margem para corrosão) em todas as partes de aço-carbono em contato com fluidos de processo ou com a atmosfera, exceto se houver uma pintura ou outro revestimento protetor adequado (TELLES, 2012).

O tubo de aço-carbono para adutoras pode variar de DN400 a DN 3000 e a espessura da chapa de 4,25mm a 19mm, com pressão máxima de serviço de 50bar (1bar = 1mca). A seguir as figuras 42 e 43 ilustram o processo de fabricação de tubos em aço-carbono com costura (solda) helicoidal.

*Figura 42 - Processo de fabricação de tubo em aço-carbono com solda helicoidal*



Fonte: Hydrostec (2011)

*Figura 43 - Tubos em aço carbono soldados*



Fonte: autor

Atualmente no Brasil para DN maiores de 400 e até 3000 (16" a 120") os tubos em aço carbono são feitos por solda helicoidal. A espessura da chapa varia de 4,25 a 19mm, com tamanho máximo de 12m.

A espessura da chapa é calculada de acordo com a Pressão Máxima de Serviço, do mesmo modo que o Tubo FOFO, equação 125. O tubo em aço carbono pode ter vários revestimentos interno e externo, como por exemplo PU (Poliuretano) e o Epoxi.

$$PMS = \frac{200 \cdot C_S \cdot LE \cdot e}{DN \cdot 1,5} \quad (125)$$

Onde:

PMS → Pressão Máxima de Serviço (MPa);

CS → Coeficiente de Segurança, para líquido 0,85;

LE → Limite de escoamento do aço (kgf/mm<sup>2</sup>);

e → Espessura da parede do tubo (mm);

DN → Diâmetro Nominal (mm).

OBS.: LE vai depender do tipo do aço utilizado, por exemplo o aço SAE 1012 o LE é 230 MPa e para o aço ASTM A 36 é 250MPa.

Da mesma forma que os tubos em ferro fundido dúctil, os tubos de aço carbono devem ser submetidos a ensaio hidrostático NBR- 9797/87 (ABNT, 1987).

A equação 126 é utilizada para calcular o valor da Pressão de ensaio.

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot e}{D} \quad (126)$$

Onde:

P → Pressão de ensaio (MPa);

S → Seção equivalente a 75% da tensão de escoamento da chapa utilizada (MPa);

e → Espessura nominal da chapa utilizada (mm) e

D → Diâmetro externo do tubo (mm).

Na figura 44 estão apresentadas as faixas usuais de fabricação relacionando o DN com a espessura da chapa.

A inspeção de espessura de revestimento seco utilizando o equipamento Holiday Detector visa identificar se a camada de revestimento aplicada sobre superfície metálica está de acordo com o que foi especificado em projeto.

O equipamento é um gerador de alta tensão que é regulável de acordo com a espessura do revestimento a ser inspecionado. A figura 45 mostra o teste de camada de espessura, utilizando o Holiday detector e a figura 46 mostra os equipamentos constituintes do medidor de espessura.

Figura 44 - Relação DN x e

Espessura		Diâmetro Nominal															
		3/16"		1/4"	5/16"	3/8"	7/16"	1/2"	9/16"	5/8"	11/16"	23/32"	3/4"				
		4,25mm	4,76mm	6,35mm	7,93mm	9,53mm	11,11mm	12,7mm	14,29mm	15,88mm	17,46mm	18,25mm	19,05mm				
mm	Pol	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
400	16																
450	18																
500	20																
550	22																
600	24																
650	26																
700	28																
750	30																
800	32																
850	34																
900	36																
1000	40																
1100	44																
1200	48																
1350	54																
1500	60																
1650	66																
1800	72																
2000	80																
2200	88																
2400	96																
2500	100																
2600	104																
3000	120																

Fonte: Hydrostec (2011)

Figura 45 - Ensaio Holiday detector em tubo de aço carbono



Fonte: autor

Figura 46 - Desenho esquemático do equipamento Holiday Detector



Fonte: Sabesp, NTS-042

### 5.5.2 Material polimérico

Os plásticos são materiais artificiais geralmente de origem orgânica sintética, oriundos de processos químicos e sínteses de materiais orgânicos simples, que possuem a capacidade de serem moldados, ou que em algum estágio de sua fabricação possuam esta capacidade sob determinadas condições de temperatura e pressão (DANIELETTO, 2007).

Os plásticos podem ainda ser subdivididos em dois grandes grupos: termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos se fundem quando aquecidos, sem desintegrarem sua

estrutura molecular, podendo então ser moldados e resfriados para obterem a forma do produto desejado. Podem ser reprocessados a um novo ciclo de temperatura e pressão (DANIELETTO, 2007).

Os termofixos (ou termorígidos) uma vez moldados sob determinadas condições de temperatura e pressão, sofrem um endurecimento permanente, isto é, ocorre uma reação de cura na qual cadeias moleculares adjacentes se interligam formando um complexo reticulado tridimensional, não permitindo seu reprocessamento, pois se reaquecidos suas moléculas se desintegram antes da fusão do material (DANIELETTO, 2007).

#### 5.5.2.1 Tubo PEAD

O PEAD – Polietileno de Alta Densidade possui macromoléculas com estrutura linear com poucas ramificações, grau de cristalização de 60 a 80%. Densidade de 0,941 a 0,965 g/cm<sup>3</sup>. Dependendo do grau de ramificação da cadeia, obtêm-se o polietileno de baixa, média e alta densidade. O grau de ramificação, por sua vez, depende do processo de polimerização empregado (DANIELETTO, 2007).

Normalmente na produção de PE e do PP distinguem-se os processos de alta pressão e os de baixa pressão. Dentre os processos de alta pressão, os mais utilizados são os processos ICI e CARBIDE (pressões da ordem de 2000 bar e temperaturas da ordem de 300 °C), utilizados na produção de polietilenos de baixa densidade (PEBD). Daí serem chamados, também, de polietilenos de alta pressão (DANIELETTO, 2007). Os processos de baixa pressão mais utilizados são os processos ZIEGLER e PHILIPS. No processo ZIEGLER, os catalisadores são obtidos através da reação de um composto orgânico de alumínio com um metal de transição, geralmente titânio e a polimerização é realizada com pressão da ordem de 3 a 4 bar e temperaturas entre 50 °C e 70 °C. No processo PHILIPS, os catalisadores são do tipo óxido de cromo parcialmente reduzido, com suporte de sílica e alumina ativados e a polimerização ocorre a pressões da ordem de 30 a 40 bar e temperaturas entre 120 °C e 175 °C (DANIELETTO, 2007).

A Norma ASTM D 1248 classifica os polietilenos em quatro grandes grupos, como pode ser visto na tabela 3:

*Tabela 3 - Densidade do polietileno*

<b>TIPO</b>	<b>DENSIDADE (g/cm<sup>3</sup>)</b>
I	0,910 – 0,925
II	0,926 – 0,940
III	0,941 – 0,959
IV	Acima de 0,960

Fonte: Danieletto (2007).

Os tipos I, II, III e IV correspondem, grosso modo, ao PEBD, PEMD e PEAD copolímero e homopolímero, respectivamente.

Quando o polímero a ser produzido origina-se de dois ou mais monômeros diferentes, adota-se para os monômeros secundários (os que geralmente entram em menor quantidade na reação e que geralmente não são responsáveis pelas características básicas do produto) a denominação de comonômeros e o produto final passa a ser um copolímero. Da mesma maneira, os produtos originados de um único monômero são designados de homopolímeros (DANIELETTO, 2007).

A Norma British Standard define como PEBD aqueles com densidade entre 0,910 e 0,930 g/cm<sup>3</sup>. Como PEMD aqueles entre 0,931 e 0,944 g/cm<sup>3</sup> e PEAD os maiores que 0,945 g/cm<sup>3</sup> (DANIELETTO, 2007).

No Brasil, a tendência atual é adotar a definição da British Standard. Como se observa, existe alguma dúvida quanto à melhor maneira de se classificar os polietilenos pela sua densidade. O que se busca na verdade, é uma distinção dos materiais quanto a seu comportamento e resistência mecânica a curta e longa duração, o que certamente não é possível analisando-se apenas uma característica dos mesmos (DANIELETTO, 2007).

Com o advento dos novos materiais, em especial os de distribuição molecular bimodal, a densidade em si já não é tão preponderante na distinção do comportamento dos materiais, sendo, hoje em dia, dada maior ênfase à classificação dos materiais em função do seu MRS (Minimum Required Strength) (DANIELETTO, 2007).

As propriedades térmicas são diretamente influenciáveis pela cristalinidade do polímero. Aumentando-se a densidade, aumentam o ponto de fusão e a condutividade térmica, e diminui calor específico, no intervalo de temperatura abaixo do seu ponto de fusão. O ponto de fusão do PEBD é da ordem 110°C, enquanto o do PEAD é da ordem de 132 °C e do PP é de 165 °C (DANIELETTO, 2007)

Segundo Danieletto, a maioria dos materiais de construção, do ponto de vista de resistência, seguem aproximadamente a Lei de Hook. Eles são elásticos ou quase elásticos, sendo possível conduzir os cálculos pela Lei de Hook com razoável segurança. Isto, entretanto, não se verifica para os materiais plásticos. Nestes, a deformação não é proporcional ao esforço, nem independe do tempo de duração da carga aplicada.

Quando o plástico é submetido a esforços, ocorre o creep no material semelhante ao que se observa no aço a alta temperatura. Esse creep aumenta com a temperatura. A consequência do creep é que independente da magnitude da tensão o material entrará em colapso depois de certo tempo. Este tempo varia inversamente com o valor da tensão e é precisamente isto que permite a utilização do plástico como material de construção (DANIELETTO, 2007)

A tensão de projeto de materiais plásticos de construção depende, portanto da vida útil desejada da aplicação. Para tubos de água sob pressão as Normas ISO recomendam a vida útil de 50 anos (vida útil de projeto), em função de fatores econômicos envolvidos na prestação de serviços públicos (2% de depreciação/ano) (DANIELETTO, 2007)

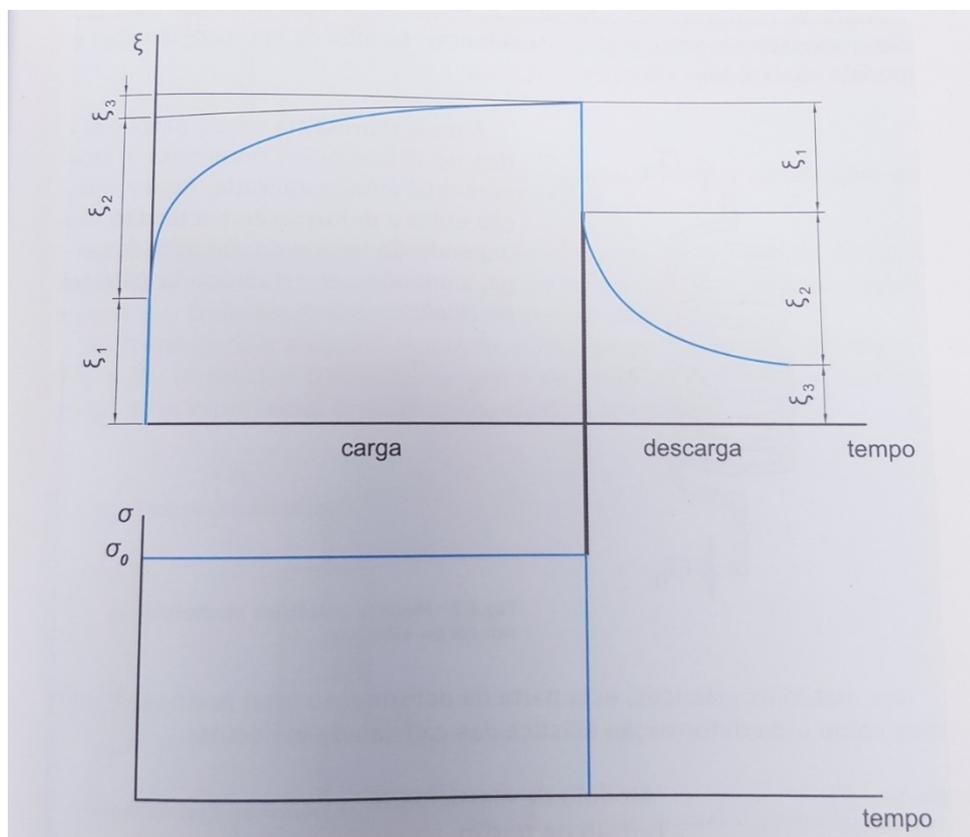
O gráfico da figura 47 mostra a relação entre deformação e o tempo para uma amostra de plástico sujeita a esforços.

Distinguem-se no diagrama, três tipos de deformação:

- deformação elástica  $\epsilon_1$ : que ocorre imediatamente e segue a Lei de Hook;
- deformação elástica retardada (creep primário)  $\epsilon_2$ : o material se deforma lentamente quando submetido a esforços. Com a retirada do esforço o material se recupera também gradativamente com o passar do tempo;
- deformação viscosa ou permanente (creep secundário)  $\epsilon_3$ : a deformação permanente mesmo depois do descarregamento.

Um dos ensaios mais utilizados para a análise das propriedades mecânicas dos plásticos é o ensaio de tração, definido pelas Normas ASTM D 638, DIN 53444, ISO 6259, ISO R 527 ou NBR 9622. Neste ensaio, um corpo de prova em forma de gravata borboleta é recortado do produto através de gabaritos de corte padronizados ou é usinado ou ainda moldado a quente. Após o condicionamento a 23° C, o corpo-de-prova é fixado na máquina de tração universal que o submete a uma força de tração, alongando-o com uma velocidade de deformação constante, até sua ruptura.

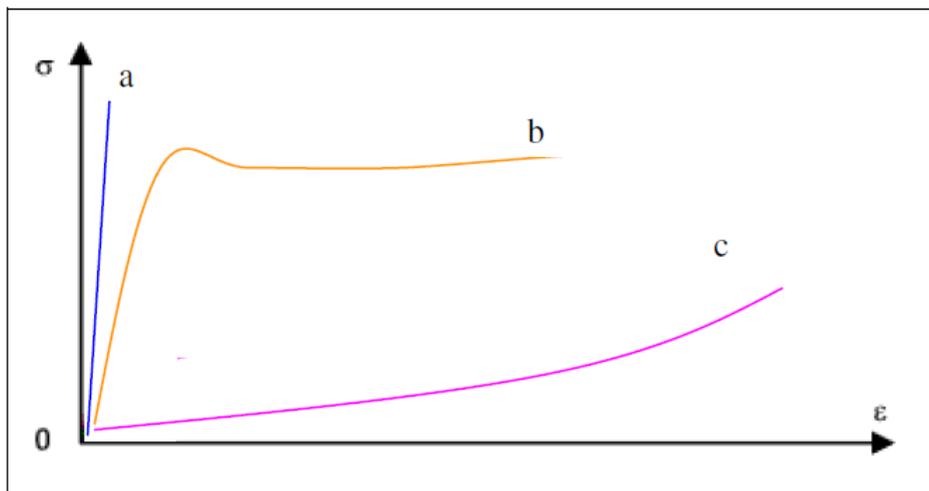
*Figura 47 - Relação entre deformação e tempo*



Fonte: Danieletto (2007)

A figura 48 mostra três gráficos de Tensão x Deformação para diferentes tipos de polímeros.

*Figura 48 - Tensão versus deformação para polímeros a) frágeis, b) plásticos e c) elastômeros*



Fonte: Danieletto (2007)

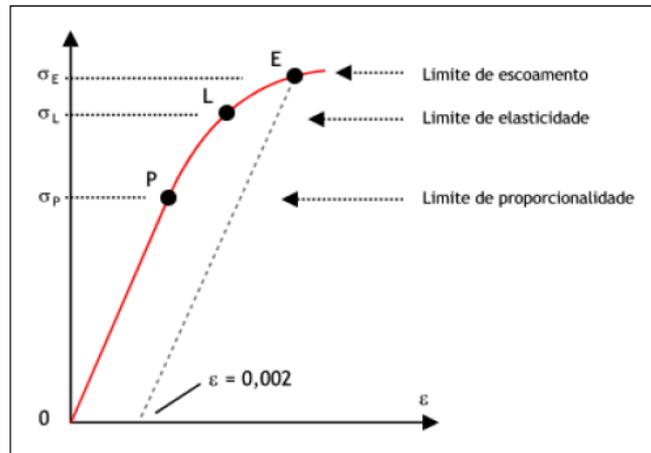
Um material é dito ter comportamento elástico se, uma vez removido o esforço, as dimensões retornam àquelas antes da aplicação do mesmo, isto é, não há deformações permanentes. O trecho 0-L da figura 49 é a região elástica do material, ou seja, o comprimento retorna ao valor  $L_0$  se o ensaio for interrompido nessa região. A tensão máxima na mesma é o limite de elasticidade  $\sigma_L$  do material. Dentro da região elástica, no trecho 0P, a tensão é proporcional à deformação, isto é, o material obedece à lei de Hooke.

A partir do ponto L tem-se o início da região plástica ou escoamento do material, em que as deformações são permanentes. É usual considerar início ou limite de escoamento  $\sigma_E$  a tensão que produz uma deformação residual  $\epsilon = 0,002$  ou 0,2% (ponto E conforme figura 49).

Depois do limite de escoamento há uma significativa redução da área da seção transversal e a tensão real segue algo como a curva tracejada da figura 49. Mas a convenção é usar tensão aparente, em relação à área inicial (DANIELETTO, 2007).

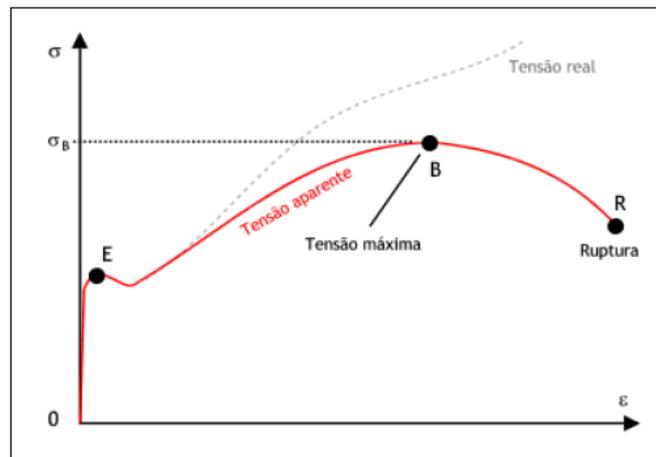
Em B da figura 50 tem-se a tensão máxima e, em R, a ruptura do corpo de prova. A tensão  $\sigma_B$  é a tensão máxima, também denominada resistência à tração do material. A tensão em R é a tensão de ruptura.

Figura 49 - Comportamento elástico de um polímero



Fonte: Danieletto (2007)

Figura 50 - Comportamento plástico de um polímero – tensão máxima



Fonte: Danieletto (2007)

Atualmente existem dois tipos de resinas para fabricação dos tubos: PE 80 ou PE 100. Onde a PE 80 MRS corresponde a 80 kgf/cm<sup>2</sup> é a mais flexível e a resina PE 100 MRS corresponde a 100 kgf/cm<sup>2</sup> é a mais rígida. MRS (Minimum Required Stregth)

em português significa Resistência Mínima Requerida, ou seja, a resistência a longo prazo dos materiais, que é 50 anos a 20°C.

Um fator muito importante no dimensionamento de tubulação utilizando tubo PEAD é a SDR (Standard Dimension Ratio) que em português significa rigidez anelar mínima (KN/m<sup>2</sup>), que é representada pela fórmula 127.

$$SDR = \frac{DN}{e} \quad (127)$$

A tensão do dimensionamento do material é dada por 128

$$\sigma = \frac{MRS}{C} \quad (128)$$

Os métodos de união utilizados para tubos de PEAD para adução e distribuição de água são:

- Solda por termofusão
  1. usa-se para DE ≥ 63 até 1600
  2. interligação do topo dos tubos após aquecimento e compressão
  3. as conexões devem ser do mesmo SDR do tubo
  4. Conexões de PE 100 podem ser soldadas a topo em tubos de PE80, desde que do mesmo SDR e de materiais compatíveis.

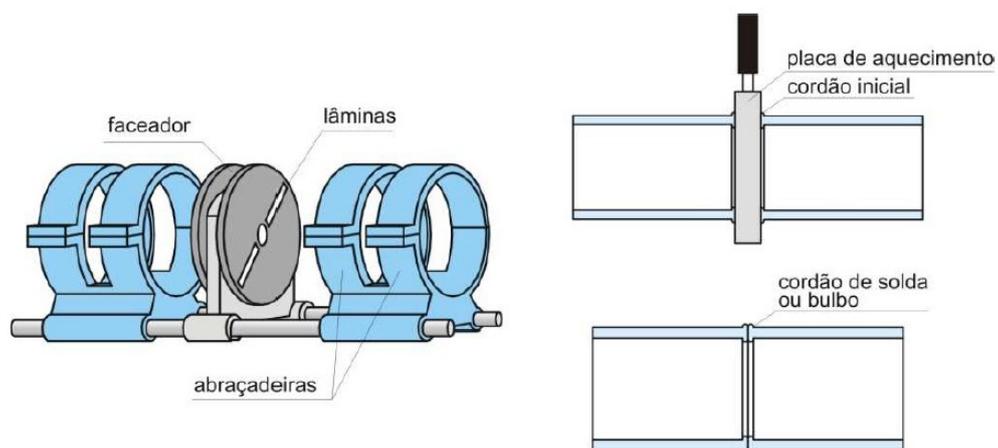
A figura 51 mostra o equipamento que realiza solda de topo em tubo PEAD em campo, soldando tubos com 12m de comprimento. A figura 52 ilustra o equipamento utilizado para realizar a solda de topo e a figura 53 mostra um tubo PEAD DN 630 aplicado com solda de topo fazendo uma curva exatamente no ponto de solda.

*Figura 51 - Máquina para solda de topo em tubo PEAD*



Fonte: autor

*Figura 52 - Equipamento utilizado para realizar solda de topo em tubos PEAD*



Fonte: Danieletto (2007)

*Figura 53 - Tubo PEAD DN 630, assentado, com solda de topo*

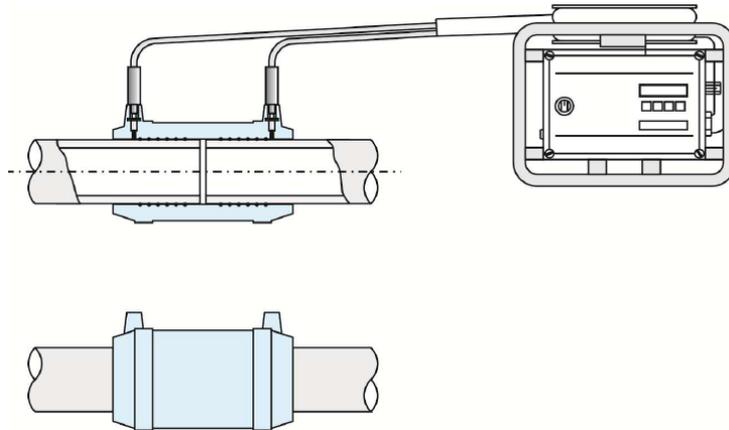


Fonte: autor

- Solda por eletrofusão
  1. As conexões devem ser do tipo monofilar, ou seja, ter uma única resistência elétrica por peça, tal que a soldagem seja executada numa única operação
  2. união injetada em polietileno que tem incorporada uma resistência eléctrica, a qual é aplicada uma potência de 39,5 V aos terminais do acessório, verifica-se o aquecimento necessário a que as paredes em contato se fundam, originando uma situação de completa estanqueidade.
  3. DE 20 até 800

A figura 54 apresenta o equipamento utilizado para realizar a solda por eletrofusão.

*Figura 54 - Equipamento para realizar solda por eletrofusão de tubo PEAD*



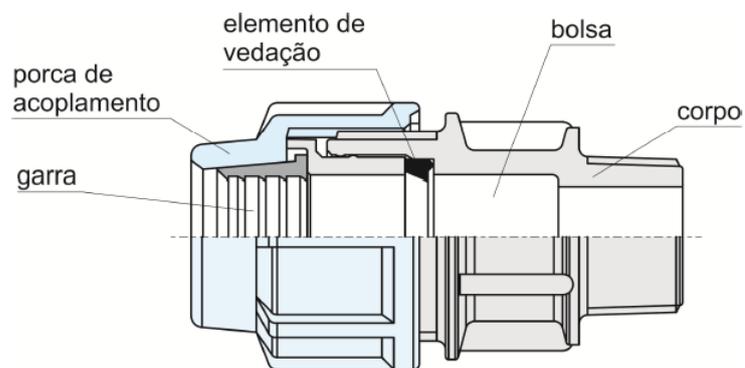
Fonte: Danieletto (2007)

- Junta mecânica
  - Aplicam-se em Ramais Prediais e Redes de Água de DE 16 até 160 mm.
  - Devem ser PN 16.

A figura 55 é de uma junta mecânica para tubo PEAD.

- Flange
  1. Podem utilizar-se flanges para a ligação dos tubos entre si. Para tal solda-se na extremidade do tubo um terminal (colarinho) em PEAD no qual se aplica um flange em aço. A ligação de válvulas e outros acessórios metálicos é habitualmente feita por este sistema.

*Figura 55 - Junta mecânica para tubo PEAD*



Fonte: Danieletto (2007)

### 5.5.2.2 Tubo PVC (DEFOFO e Orientado)

Devido à sua estrutura molecular, o PVC é obtido a partir de 57% de insumos provenientes do sal marinho ou da terra (salgema), e somente 43% de (Eteno) insumos provenientes de fontes não renováveis como o petróleo e o gás natural. Estima-se que somente 0,25% do suprimento mundial de gás e petróleo são consumidos na produção do PVC. Vale ressaltar que existe tecnologia disponível para a substituição dos derivados de petróleo e gás pelos de álcool vegetal (cana de açúcar e outros) (INSTITUDO DO PVC, 2018).

Devido a seu processo de obtenção, baseado na eletrólise de uma mistura de sal e água, o cloro deve ser utilizado em balanço com a soda cáustica. O processo ainda fornece hidrogênio, normalmente utilizado como combustível nas próprias plantas de eletrólise para geração de energia (INSTITUDO DO PVC, 2018).

O átomo de cloro atua ainda como um marcador nos produtos de PVC, permitindo a separação automatizada dos resíduos de produtos produzidos com esse material de outros plásticos em meio ao lixo sólido urbano, facilitando, assim, sua separação para reciclagem (INSTITUDO DO PVC, 2018).

Para a obtenção do Eteno, que representa apenas 43% desta resina, o óleo cru passa por uma destilação na qual é obtida a nafta leve. O Eteno é gerado a partir do processo de craqueamento catalítico (quebra de moléculas grandes em moléculas menores com a ação de catalisadores para aceleração do processo) da nafta. Tanto o cloro como o Eteno estão na fase gasosa e da reação dos dois é produzido o DCE (dicloro etano) (INSTITUDO DO PVC, 2018).

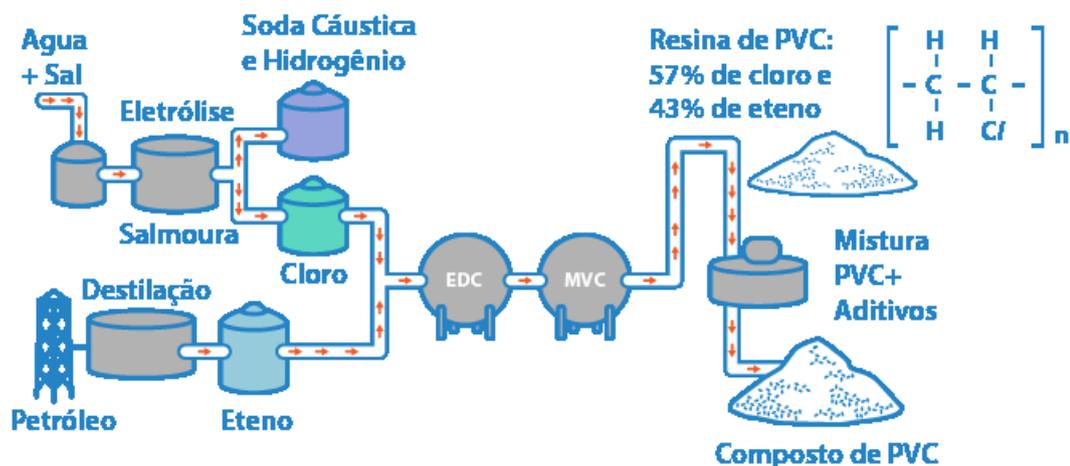
A partir do DCE, obtém-se o MVC (monômero cloreto de vinila). As moléculas de MVC são submetidas ao processo de polimerização, ou seja, elas se ligam formando uma molécula muito maior (polímero), conhecida como PVC (policloreto de vinila), que é um pó muito fino, de cor branca e totalmente inerte (INSTITUDO DO PVC, 2018).

A resina de PVC, na sua forma pura, pós-fabricação, é um pó branco que sozinho não tem nenhuma aplicação industrial, pois não é processável devido às suas

características físicas e químicas. Para a fabricação de produtos em PVC, é necessária a adição de produtos químicos (aditivos) à resina de PVC. A esta mistura dá-se o nome de composto de PVC. A ação de misturar resina e aditivos é chamada de formulação. O composto de PVC é, então, inserido em máquinas específicas (a depender do produto a ser fabricado) como extrusoras, injetoras, sopradoras, etc. onde serão transformados ou processados no produto desejado, como tubos, conexões, frascos, etc. A figura 56 ilustra este processo fabril (INSTITUTO DO PVC, 2018).

O tipo de resina e os aditivos utilizados determinarão as características finais dos produtos em PVC, que podem se apresentar nas formas rígida ou flexível, transparente ou opaco, dentre diversas outras características (INSTITUTO DO PVC). O processo de moldagem por extrusão é uma das técnicas de processamento mais úteis e das mais utilizadas para converter compostos de PVC em produtos comerciais. Considera-se que entre 45 e 50% de todos os produtos de PVC são obtidos por meio do processo de moldagem por extrusão. A capacidade do PVC de aceitar várias modificações por meio da incorporação de aditivos permite seu uso numa ampla diversidade de produtos, dentre os quais filmes para embalagens, fios e cabos elétricos, chapas, perfis diversos e tubos (NUNES E ORMANJI, 2006).

Figura 56 - Processo de fabricação do composto de PVC



Fonte: INSTITUTO DO PVC (2018)

O processo de extrusão consiste basicamente em forçar a passagem do material por dentro de um cilindro aquecido de maneira controlada, por meio da ação bombeadora de uma ou duas roscas sem fim, que promovem o cisalhamento e homogeneização do material, bem como sua plastificação. Na saída do cilindro o material é comprimido contra uma matriz de perfil desejado, a qual dá formato ao produto, podendo o mesmo em seguida ser calibrado, resfriado, cortado ou enrolado (NUNES E ORMANJI, 2006).

Os principais componentes de uma extrusora são: motor elétrico (responsável pelo acionamento da rosca), conjunto de engrenagens redutoras (responsável pela capacidade de transferência de energia por meio de torque do motor para a rosca), cilindro, rosca, matriz, carcaça, painel de comando, resistências de aquecimento, ventiladores de resfriamento e bomba de vácuo. A figura 57 mostra, esquematicamente, os principais componentes de uma extrusora (NUNES E ORMANJI, 2006).

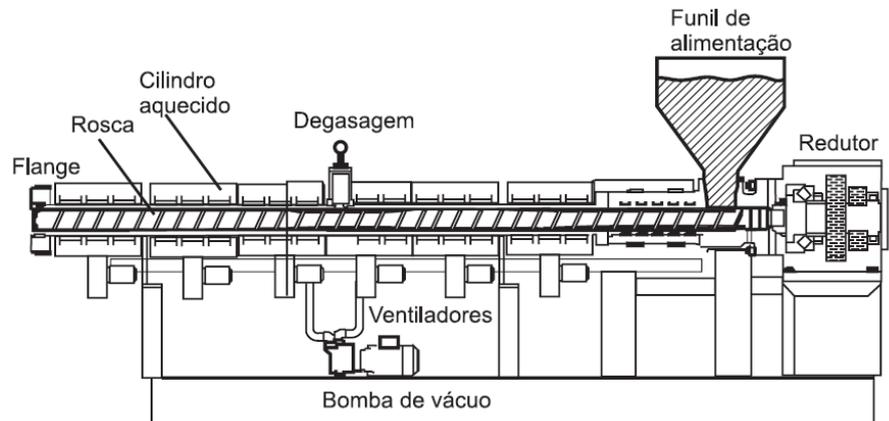
A produção de tubos rígidos de PVC normalmente é feita por meio da utilização de extrusoras de rosca dupla, a partir do composto na forma de dry blend. No passado utilizavam-se extrusoras de rosca simples, principalmente em tubos de menores diâmetros, porém essa tecnologia hoje apresenta pouca competitividade em relação à extrusão com rosca dupla, que pode atingir produtividade da ordem de 1.000 kg/h (NUNES E ORMANJI, 2006).

O processo de produção de tubos rígidos de PVC inicia-se na extrusora, responsável pela gelificação, plastificação e homogeneização do composto originalmente na forma de pó. Uma vez fundido, o composto alimenta a matriz, responsável pela conformação do material na forma do produto. À saída da matriz encontra-se um calibrador a vácuo, o qual resfria o material fundido e dá dimensões ao produto. Para linhas de maior produtividade ou em tubos de maiores espessuras é comum a utilização de água gelada no resfriamento do calibrador, de modo a conseguir maiores taxas de remoção de calor (NUNES E ORMANJI, 2006).

Na sequência do calibrador propriamente dito, dentro da própria câmara de vácuo, o tubo passa por uma série de jatos de água para resfriamento adicional. Nas linhas de alta produtividade ou na produção de tubos de maiores espessuras podem ainda ser incorporadas banheiras adicionais de resfriamento. À frente da linha encontram-se o

puxador e o dispositivo de corte e recepção das barras cortadas (JR, NUNES E ORMANJI, 2006).

*Figura 57 - Representação esquemática de uma extrusora*

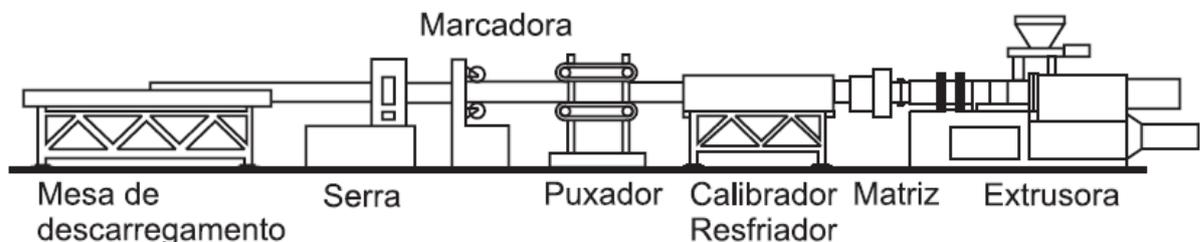


Fonte: Nunes e Ormanji (2006)

Uma vez cortadas, as barras passam por um dispositivo de formação da bolsa: por meio de aquecimento de uma de suas pontas, o tubo recebe um macho que ajusta o diâmetro interno do tubo para perfeito acoplamento entre as barras. Outros tipos de tubos podem sofrer processos de incorporação de roscas machos e fêmeas, como no caso de tubos para irrigação, ou ainda incorporação de juntas de borracha para garantir estanqueidade na junção ponta/bolsa.

A figura 58 mostra esquematicamente o processo de extrusão de tubos de PVC.

*Figura 58 - Processo de extrusão de tubos de PVC*



Fonte: Nunes e Ormanji (2006)

## 5.6 Principais tipos de tubos utilizados na adução de água

Dois grandes grupos de materiais são empregados para fazer a adução de água, metálicos e poliméricos. Cada um tem suas características, usos e aplicações.

#### 5.6.1 Ferro Fundido Dúctil – FOFO

Todos os tubos são submetidos, na fábrica, ao teste de pressão interna, segundo a NBR-7675 (ABNT, 2005). Na tabela 4 mostra a pressão do teste hidrostático de acordo com a classe do tubo e o DN.

*Tabela 4 - Pressão mínima do teste hidrostático para tubo de ferro fundido dúctil*

DN	Pressão mínima do teste hidrostático (MPa)	
	K 7	K 9
80 a 300	3,2	5,0
350 a 600	2,5	4,0
700 a 1000	1,8	3,2
1200	1,3	2,5

Fonte: Saint-Gobain (2015)

A escolha do diâmetro de uma canalização é feita levando-se em consideração:

- parâmetros hidráulicos (vazão, perdas de carga, velocidade) para uma adução por gravidade e
- parâmetros hidráulicos e econômicos ideais (custo do bombeamento e amortização das instalações) para uma adução por recalque.

Em função das condições de serviços, deve-se quantificar os riscos eventuais de Golpes de Aríete, cavitação e abrasão e instalar as proteções adequadas.

Sob o termo “pressão”, devem-se distinguir as terminologias:

- do projeto da canalização (ligadas as capacidades hidráulicas)
- do fabricante (ligadas ao desempenho dos produtos).

As terminologias utilizadas para pressão em tubos em ferro dúctil, são as apresentadas na Tabela 5:

*Tabela 5 - Terminologia utilizada para pressão em tubos de ferro fundido dúctil*

	TERMINOLOGIA	
	ABREVIATURAS	DESCRIÇÃO
PROJETO	PRP	Pressão de cálculo em Regime Permanente
	PMC	Pressão Máxima de Cálculo
	PTR	Pressão de Teste da Rede
FABRICANTE	PSA	Pressão de Serviço Admissível
	PMS	Pressão Máxima de Serviço
	PTA	Pressão de Teste Admissível

Fonte: Saint-Gobain (2015)

Para dimensionamento de uma tubulação temos que usar 129, 130 e 131, a saber:

$$PRP \leq PSA \quad (129)$$

$$PMC \leq PMS \quad (130)$$

$$PTR \leq PTA \quad (131)$$

No momento da escolha de um componente de uma canalização, e preciso assegurar-se de que as três condições acima são respeitadas.

PRP – Pressão de cálculo em regime permanente

Pressão máxima de serviço, fixada pelo projetista, excluindo o golpe de ariete.

PMC - Pressão máxima de cálculo

Pressão máxima de serviço, fixada pelo projetista, incluindo o golpe de ariete e levando em consideração alterações futuras.

- PMCe quando parte do golpe de ariete e estimado
- PMCc quando o golpe de ariete e calculado.

#### PTR - Pressão de teste da rede

Pressão hidrostática aplicada a uma canalização recentemente assentada, de modo a assegurar sua integridade e estanqueidade.

#### PSA - Pressão de serviço admissível

Pressão interna, excluindo o golpe de ariete, que um componente pode suportar com total segurança, de forma contínua, em regime hidráulico permanente.

#### PMS - Pressão máxima de serviço

Pressão interna máxima, incluindo o golpe de ariete, que um componente pode suportar em serviço.

#### PTA - Pressão de teste admissível

Pressão hidrostática máxima que pode ser aplicada no teste de campo a um componente de uma canalização recém-instalada.

As canalizações são concebidas para resistir a pressões elevadas, em geral bem superiores aos valores habitualmente encontrados nas redes. Isso se justifica pela necessidade de resistir as numerosas solicitações a que elas são submetidas, não somente no momento da entrada em operação, mas também – e principalmente – ao longo do tempo.

As pressões indicadas na tabela XX, anterior, são estabelecidas com coeficientes de segurança elevados, que levam em conta não só os esforços devidos a pressão interna, mas também numerosas outras solicitações, as vezes acidentais, a que as

canalizações são submetidas no momento de sua instalação e quando estão em serviço.

As solicitações mecânicas (pressão interna, cargas externas) as quais é submetida uma canalização quando colocada em serviço podem ser avaliadas com precisão. Em contrapartida, e mais difícil prever com certeza quais os esforços que aparecerão com o tempo.

Os tubos dispõem, além de suas características nominais (Pressão de Serviço Admissível, Alturas de Recobrimento) de uma grande reserva de segurança.

Os revestimentos interno e externo para tubos para condução de água são geralmente:

- Argamassa de cimento de alto forno para revestimento interno e
- Zinco metálico com 200g/m<sup>2</sup> e pintura em acabamento betuminoso para revestimento externo.

Efetivamente:

- a ductibilidade confere aos materiais em ferro dúctil uma grande capacidade de absorção de trabalho ou energia, além dos limites de seu regime elástico; e
- os métodos utilizados para o cálculo das espessuras dos tubos preveem coeficientes de segurança elevados.

Isso é ilustrado pelo gráfico 59 a seguir, onde vemos que as pressões de ruptura reais observadas são mais do dobro das Pressões de Serviço Admissíveis.

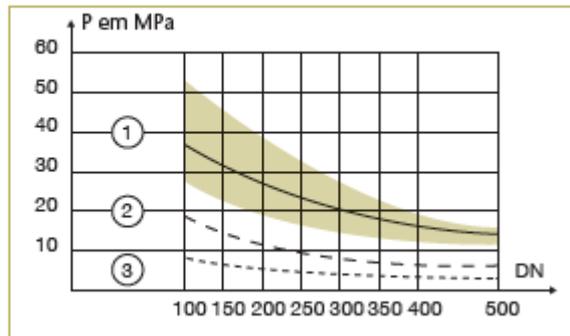
Os tubos de ferro fundido podem ter 4 tipos de junta de acoplamento:

- Elástica, do tipo JE2GS;

- Travada interna
- Travada externa
- Flangeada

*Figura 59 - Pressão de ruptura real*

**Tubos**



Fonte: Saint-Gobain (2015)

Onde:

1. Pressão de ruptura real
2. Pressão de ruptura calculada
3. Pressão de serviço admissível

Junta elástica - Suas características principais são:

- Perfil assimétrico (evitando erros de montagem);
- Facilidade e rapidez na instalação (junta automática, sem parafuso);
- Resistência a altas pressões (quanto maior a pressão do líquido, maior a vedação);
- Possibilidade de deslocamento axial e a deflexão angular;
- Descontinuidade elétrica;
- Não utiliza parafusos.

É usada em:

- Canalizações aéreas e enterradas;
- Baixas e altas pressões, inclusive sobpressão negativa;
- Assentamento em solos com lençol freático.

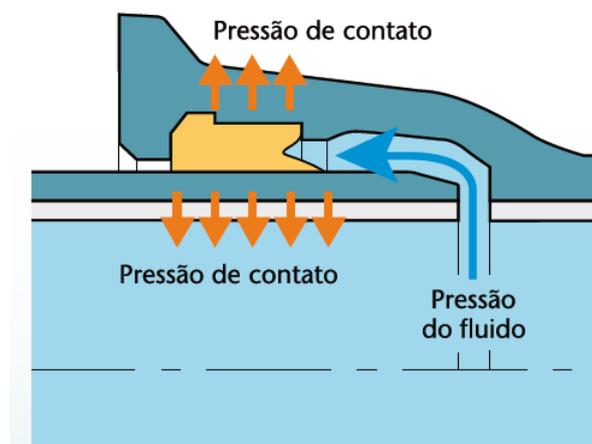
A junta JE2GS apresenta como característica de concepção um formato assimétrico, impossibilitando erros na montagem. A pressão inicial, decorrente da montagem, de contato entre o anel de vedação em elastômero e o metal, aumenta à medida que a pressão do fluido cresce. Uma estanqueidade perfeita é então assegurada.

A junta JE2GS se caracteriza também por uma excelente resistência a pressão externa: resiste a 0,3 MPa (30 mca.).

As figuras 60 e 61 mostram o acomodamento do anel na bolsa e o comportamento da junta elástica JE2GS mediante a pressão no tubo.

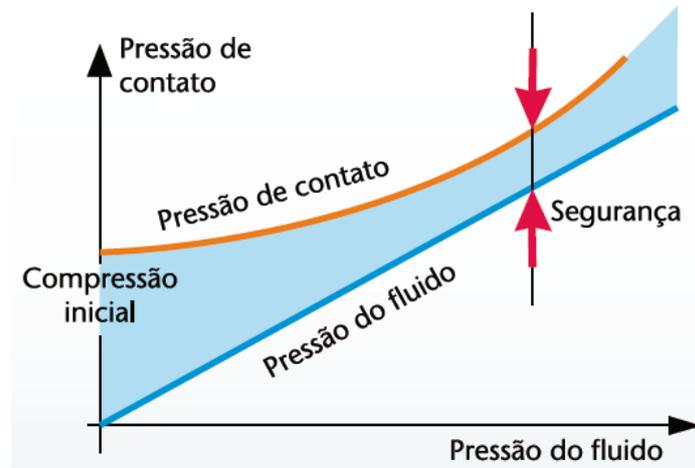
Os elastômeros utilizados nos anéis de vedação da junta elástica são geralmente em SBR (borracha sintética) ou EPDM.

*Figura 60 - Acomodação do anel na bolsa do tubo de ferro*



Fonte: Saint-Gobain (2015)

Figura 61 - Pressão de contato da junta elástica x Pressão do fluido



Fonte: Saint-Gobain (2015)

SBR – Borracha sintética (polímero de estireno-butadieno)

NBR – Borracha nitrílica

EPDM – Polímero etileno propileno

A junta travada interna JTI (junta elástica JE2GS com travamento interno) permite a montagem de canalizações auto ancoradas. O travamento nas juntas (a montante e a jusante das conexões) transfere os esforços axiais do empuxo para o terreno através do atrito tubo/solo, o que possibilita a eliminação dos blocos de ancoragem.

O princípio básico do sistema de travamento das juntas consiste em transferir os esforços axiais de um elemento da canalização para o solo, impedindo a desmontagem do conjunto. O anel de borracha JTI permite, graças a presença dos insertos metálicos de fixação, travar as bolsas e os tubos de um trecho pré-determinado, o que torna desnecessária a confecção do bloco de ancoragem.

Os anéis são fornecidos com as garras metálicas inseridas no seu corpo. Elas se fixam sobre a ponta do tubo após a montagem, assegurando o travamento. O anel de

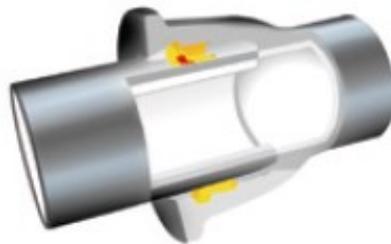
borracha possui um lábio, sobre a parte posterior, que protege as garras metálicas do contato com os meios externo e interno.

A utilização da junta JTI é particularmente indicada quando não se pode construir bloco de ancoragem ou em terrenos de baixa resistência mecânica, assim como nos casos de canalizações assentadas em grandes declives ou aéreas.

A estanqueidade desta junta obedece ao princípio da junta elástica JE2GS, porém com variações das pressões conforme a classe de pressão (K7 e K9) e DN utilizados.

As figuras 62 e 63 ilustram as a JTI.

*Figura 62 - JTI (Junta Travada Interna)*



Fonte: Saint-Gobain (2015)

*Figura 63 - Anel da JTI*



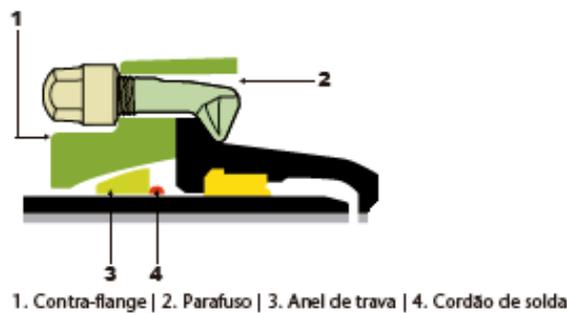
Fonte: Saint-Gobain (2015)

A junta travada externa JTE e um sistema de travamento externo com anel JE2GS que permite a montagem de canalizações auto ancoradas. O travamento tem como

função absorver os esforços axiais e eliminar a construção do bloco de ancoragem em concreto, a figuras 64 e 65 mostram a JTE.

O princípio básico do travamento das juntas consiste em transferir os esforços axiais de um elemento da canalização para os tubos, sem permitir a desmontagem do conjunto (tubo/conexão). As juntas travadas transferem para um ou mais tubos os empuxos axiais que ocorrem em determinados pontos (curvas, tês, flange cego, etc.), que, por sua vez, são transmitidos ao solo, através do atrito não havendo assim a necessidade de construir blocos de ancoragem em concreto.

*Figura 64 - Junta Travada Externa*



Fonte: Saint-Gobain (2015)

*Figura 65 - Junta Travada Externa montada*



Fonte: Saint-Gobain (2015)

A estanqueidade é assegurada pela junta elástica JE2GS. A transferência dos esforços axiais é feita através de um sistema de travamento, constituído de:

- Cordão de solda próximo a ponta do tubo;
- Anel de travamento;
- Contra-flange especial (diferente da junta mecânica) que assegura o travamento do conjunto bolsa/tubo;
- Parafusos e porcas em ferro dúctil ou aço.

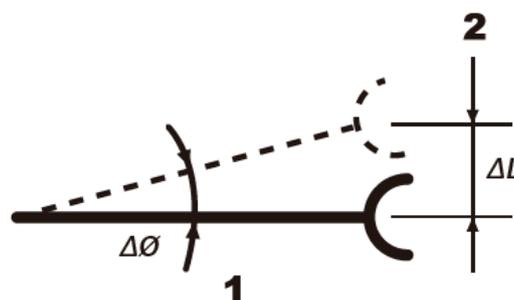
A utilização das juntas travadas é uma solução para casos em que existam limitações ou congestionamentos para construção de blocos de ancoragem, ou em terrenos de baixa resistência e ainda naqueles com declividade acima de 25% ou assentamento aéreo.

A estanqueidade desta junta obedece ao princípio da junta elástica JE2GS, porém com variações das pressões limitadas pelo sistema de travamento.

A importância da deflexão angular permitida pelas juntas elásticas (inclusive com travamento) JE2GS, JTI e JTE da grande flexibilidade ao assentamento da canalização, permitindo a eliminação de conexões no seu traçado.

A figura 66 mostra a representação esquemática de uma deflexão em uma tubulação.

*Figura 66 - Representação da deflexão em adutora*



1. Deflexão | 2. Desvio

Fonte: Saint-Gobain (2015)

A tabela 6 mostra a deflexão máxima por diâmetro e o respectivo afastamento.

*Tabela 6 - Deflexão máxima por diâmetro*

<b>DEFLEXÃO E AFASTAMENTO</b>			
DN	Deflexão máxima admissível	Comprimento do tubo	Afastamento (desvio) $\Delta L$
80 a 150	5°	6,0	52
200 a 300	4°	6,0	42
350 a 600	3°	6,0	32
700 a 800	2°	7,0	25
900 a 1200	1° 30'	7,0	19

Fonte: Saint-Gobain (2016)

A junta flangeada é constituída por dois flanges, uma arruela de vedação e parafusos cuja quantidade e dimensões dependem do PN e do DN do flange. A estanqueidade é assegurada pela compressão axial da arruela de vedação, obtida pelo aperto dos parafusos. A resistência a pressão de uma peça com flanges é caracterizada pelo seu PN.

Suas características principais são:

- precisão de montagem;
- possibilidade de montagem e desmontagem sem utilizar equipamentos específicos.

A estanqueidade é obtida através do aperto dos parafusos com arruela de vedação. Dimensões, posicionamento e número de furos de passagem de parafusos nos flanges são fixados por normas brasileiras e internacionais, a fim de permitir a unia-o de todos os tipos de conexões, bombas, válvulas e aparelhos ou outros acessórios.

Os tubos fabricados em ferro fundido dúctil, nos diâmetros de 3" a 48", são fornecidos conforme NBR 7675 com flanges PNs 10, 16, 25 ou 40. As arruelas de vedação são fornecidas em EPDM (Polímero Etilico Propileno) com alma metálica para os flanges classe PN 10, PN 16, PN 25 e PN 40.

Os tubos com flanges são empregados geralmente em instalações aéreas e em montagens dentro de caixas ou câmaras de alvenaria que abrigam bombas, válvulas e acessórios. A precisão de montagem desta junta, assim como sua possibilidade de desmontagem, a torna especialmente indicada para montagem de peças em instalações e manutenções, tais como:

- Estações de bombeamento;
- Câmaras de válvulas;
- Travessias aéreas;
- Reservatórios.

#### 5.6.2 Aço carbono - AC

São fabricados conforme AWWA C200, com costura helicoidal por arco submerso interna e externa (HSAW).

Aço carbono estrutural resistente à corrosão atmosférica (aço COR-TEN ou Patinável), com limite de escoamento mínimo de 300MPa e teor de cobre mínimo de 0,20%.

O teste hidrostático é realizado em 100% dos tubos, antes do revestimento, a pressão hidrostática de 18 kgf/cm<sup>2</sup>.

Aço recomendado: Aço estrutural resistente à corrosão atmosférica (Patinável).

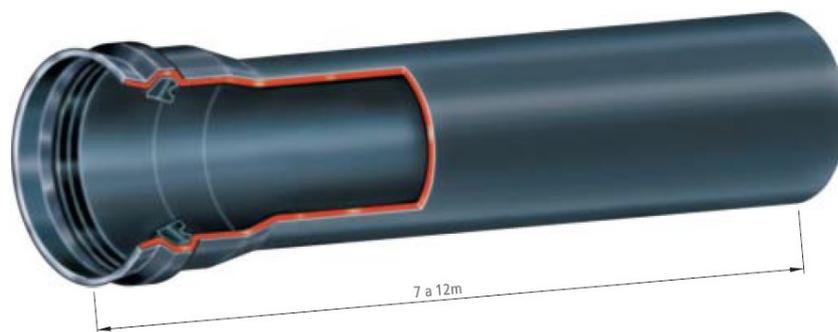
- Os aços patináveis são aços de baixo carbono e têm garantia de composição química, boa tenacidade e soldabilidade, e alta resistência mecânica.
- Com adição, em quantidades apropriadas, de elementos de liga, tais como Cu, Cr, Si e P, em contato com o meio ambiente, desenvolve-se uma camada de óxido altamente protetora, conferindo ótima resistência à corrosão atmosférica, no mínimo quatro vezes superior aos aços estruturais convencionais.

Pode ser unido por quatro formas diferentes:

1. Ponta e bolsa junta elástica
2. Ponta e bolsa junta soldada
3. Biselado para solda
4. Acoplamento mecânico tipo K

Os tubos de aço carbono ponta e bolsa junta elástica são indicados para captação, adução, linhas de recalque e irrigação. A figura 67 ilustra o tubo e a tabela 7 contém as informações dimensionais.

*Figura 67 - Tubo aço carbono ponta e bolsa com junta elástica*



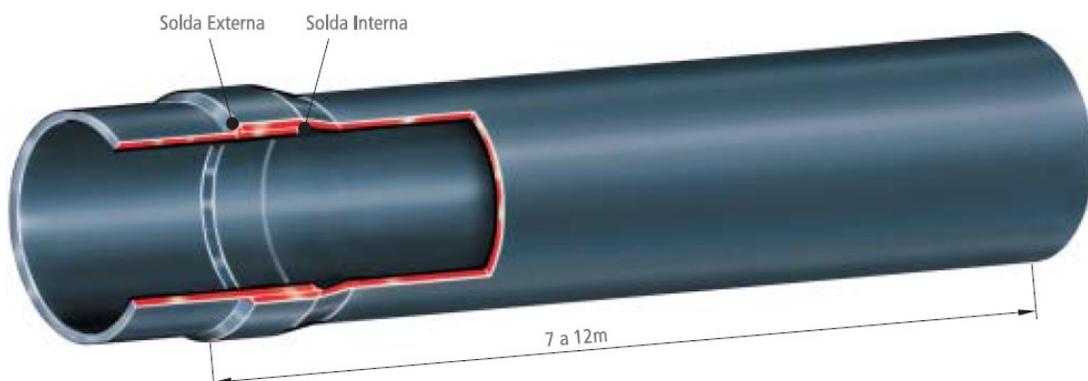
Fonte: Tenaris Confab (2003)

*Tabela 7 - Informações dimensionais para o tubo em aço carbono bolsa e ponta - junta elástica*

<b>TUBOS DE AÇO PONTA E BOLSA – JUNTA ELÁSTICA</b>						
DN	DE	e	DEFLEXÃO MÁXIMA	PESO	P <sub>MÁX</sub> TRABALHO LE = 250	P <sub>MÁX</sub> TRABALHO LE = 310
mm	mm	mm	Graus	Kg/m	MPa	MPa
300	323,9	4,0	4	31,56	3,06	NA
350	355,6	4,4	4	38,11	3,07	NA
400	406,4	4,4	3	43,62	2,69	NA
450	457,2	4,8	3	53,55	2,61	NA
500	508,0	4,8	3	64,48	2,54	NA
600	635,0	4,8	3	74,60	NA	2,33
700	738,0	5,6	2	101,14	NA	2,34
800	842,0	5,6	2	115,50	NA	2,05
900	945,0	5,6	2	129,73	NA	1,82
1000	1048,0	6,4	2	164,93	NA	1,88
1100	1151,0	7,9	1,5	222,69	NA	2,13
1200	1255,0	7,9	1,5	242,95	NA	1,96

Fonte: Tenaris Confab (2003)

*Figura 68 - Tubo aço carbono ponta e bolsa com junta soldada*



Fonte: Tenaris Confab (2003)

O tubo ponta e bolsa junta soldada, figura 68 acima, após a centralização e o acoplamento, é feita a solda circunferencial de filete, podendo ser somente externa, ou se o diâmetro do tubo permitir, somente pelo lado interno, ou ainda em condições especiais, interna e externamente, tendo notável aplicabilidade quando se deseja alternativas técnicas para viabilização de projetos onde juntas travadas e blocos de ancoragem são requeridos. Na tabela 8 contém informações dimensionais.

*Tabela 8 - Informações dimensionais para o tubo em aço carbono bolsa e ponta - junta soldada*

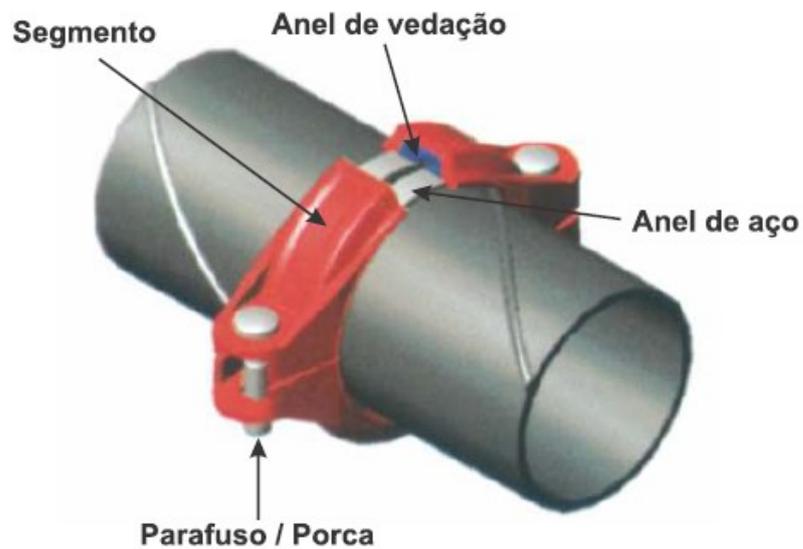
<b>TUBOS DE AÇO PONTA E BOLSA – JUNTA ELÁSTICA</b>						
DN	DE	e	DEFLEXÃO MÁXIMA	PESO	P <sub>MÁX</sub> TRABALHO LE = 250	P <sub>MÁX</sub> TRABALHO LE = 310
mm	mm	mm	Graus	Kg/m	MPa	MPa
600	635,0	4,8	1,5	74,60	1,88	2,33
700	738,0	5,6	1,5	101,14	1,88	2,34
800	842,0	5,6	1,5	115,50	1,64	2,05
900	945,0	5,6	1,5	129,73	1,47	1,82
1000	1048,0	6,4	1,5	164,93	1,51	1,88
1100	1151,0	7,9	1,5	222,69	1,72	2,13
1200	1255,0	7,9	1,5	242,95	1,58	1,96

Fonte: Tenaris Confab (2003)

A simplicidade dos acoplamentos mecânicos dispensa a utilização de mão de obra especializada e ferramentas especiais, facilitando sua montagem. O sistema K é montado com dois, três, quatro, seis ou oito parafusos, dependendo do diâmetro e do tipo de acoplamento. A instalação, sem o processo de solda, resulta em uma grande vantagem para diversos usuários e pode ser até seis vezes mais rápida quando comparada a sistemas tradicionais, como: rosca, flange ou solda. Qualquer serviço de inspeção ou manutenção é realizado rapidamente e de maneira independente entre os diversos componentes da linha, diminuindo, assim, o tempo de parada.

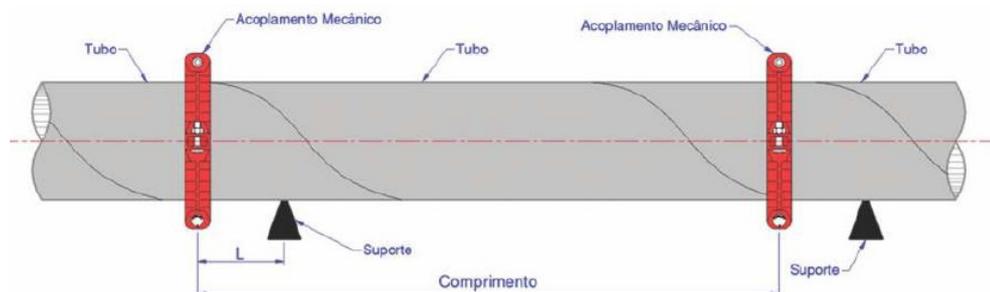
A figura 69 apresenta de forma esquemática como é o acoplamento mecânico. A instalação das tubulações de engate rápido deve ser aérea, sobre suportes estáveis, com uma altura mínima recomendada do solo de 150mm. É expressamente proibida a instalação desta tubulação diretamente apoiada no solo ou enterrada, pois prejudica sua vida útil, além de necessitar investimentos e provocar desgastes maiores.

*Figura 69 - Acoplamento tipo K*



Fonte: Alvenius (2015)

*Figura 70 - Tubo de aço carbono sobre suportes*



Fonte: Alvenius (2015)

A localização dos suportes é estabelecida em função do vão máximo admissível para os tubos. Essa localização pode sofrer pequenas variações para atender situações

particulares durante a montagem. Nos sistemas tubulares unidos através de acoplamentos mecânicos flexíveis, deve-se utilizar pelo menos um suporte por tubo. Esse suporte deve estar situado a uma distância “L” entre 300 e 600mm da extremidade do tubo, conforme figura 70 acima.

### 5.6.3 Diâmetro Externo de Ferro Fundido - PVC DEFOFO

Os tubos DEFOFO são feitos com PVC-U - PVC não plastificado, que lhe dá algumas propriedades boas propriedades mecânicas:

- alta resistência mecânica, rigidez e dureza
- baixa resistência ao impacto
- alta resistência química

Os tubos possuem diâmetro externo compatível com tubos e conexões de ferro fundido, o que permite o acoplamento das pontas dos tubos nas bolsas ou conexões de ferro fundido. São fabricados com comprimento total de 6m na cor azul como mostrado na figura 71, os tubos possuem junta elástica removível ou integrada, dependendo do fabricante e estão disponíveis nos DN 100 a 500.

São utilizados em adutoras enterradas ou em rede de distribuição. Não são utilizados para linha de recalque nem ficam expostos as intempéries pois sofrem oxidação quando submetidos ao calor, diminuindo sua resistência e vida útil.

Os tubos mais comercializados são dimensionados para atender a Pressão Máxima de Serviço – PMS de 1,0 MPa ou 10 kgf/cm<sup>2</sup> ou 100 mca, a temperatura de 20°C, incluindo as eventuais sobrepressões dinâmicas proveniente dos transientes hidráulicos.

*Figura 71 - Tubo DEFOFO*



Fonte: Tigre (2011)

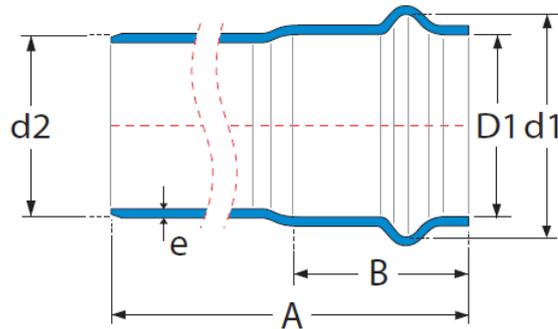
Caso a temperatura de serviço seja maior do que 20°C a Norma ABNT NBR 7665/07 apresenta um gráfico de regressão que relaciona a temperatura com a resistência do tubo. A figura 72 mostra o desenho da bolsa do tubo e a tabela 9 apresenta as dimensões.

*Tabela 9 - Dimensional tubo DEFOFO*

<b>Medidas</b>						
DN	D1	d1	d2	e	A	B
100	119,30	141	118	4,8	6000	117
150	171,55	196,5	170	6,8	6000	135
200	223,95	252,1	222'	8,9	6000	160
250	276,30	309,40	274	11,0	6000	175
300	328,55	363,10	326	13,10	6000	195
350	381	420,30	378	15,2	6000	205
400	432	475,10	429	17,2	6000	230
500	536	585,80	532	21,3	6000	250

Fonte: Tigre (2011)

Figura 72 - Características dimensionais tubo DEFOFO



Fonte: Tigre (2011)

Para assentar o tubo, o fundo da vala deve ser uniforme e regularizado. No caso de solo rochoso (rocha decomposta, pedras soltas e rocha viva) é necessário executar um leito de material isento de pedras, de no mínimo 15cm sob os tubos.

No caso de solo argiloso ou sem condições mecânicas mínimas para assentamento do tubo, deve-se executar uma base de cascalho ou concreto convenientemente estaqueado e a tubulação deve ser assentada e apoiada sobre o berço de areia.

Os tubos de PVC podem sofrer pequenas deflexões durante a instalação. As regiões de emenda deverão estar alinhadas e ancoradas. A deflexão para tubos de 6m de comprimento varia de acordo com o diâmetro nominal.

#### 5.6.4 PVC ORIENTADO – PVC-O

O tubo PVC-O – Policloreto de Vinila Orientado é fabricado de acordo com a NBR 15750 (ABNT, 2009), tem uma tensão admissível de trabalho de 28 MPa e uma tensão mínima a 50 anos de 45 MPa. A tensão admissível de trabalho é de 2,25 vezes superior e a tensão de ruptura é 1,8 vezes superior em comparação aos tubos em PVC-U (POLITEJO, 2014).

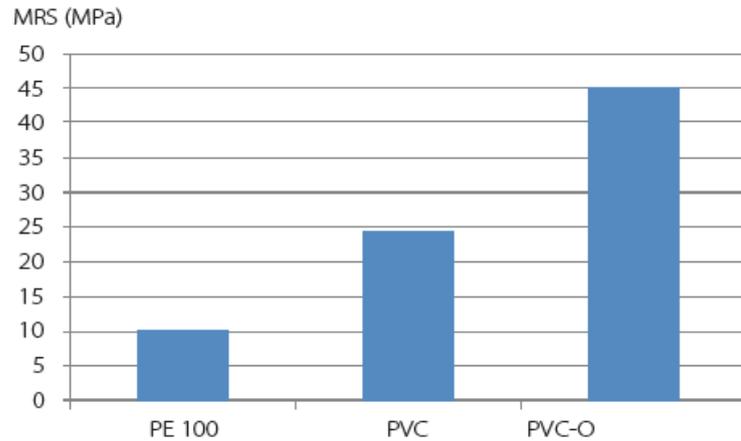
A resistência ao impacto é 2 vezes maior comparado ao tubo PVC-U. Sua estrutura molecular laminar impede a propagação de fissura ao longo da tubulação. A resistência ao Golpe de Aríete e fadiga cíclica, demonstra em ensaios, que os tubos PVC-O tem 2,5 vezes mais resistência em comparação ao tubo PVC-U. Em consequência da sua menor espessura de parede, os tubos apresentam em média, um diâmetro útil até 7% superior em comparação ao tubo PVC-U (POLITEJO, 2014).

Os tubos PVC-O são intercambiáveis com os tubos de ferro fundido e tubos de PVC DEFOFO. As conexões que compõem o sistema são de ferro fundido. A tecnologia de orientação molecular, tem com objetivo de obter tubos com melhorias notáveis em relação a resistência a tração, ductilidade, fadiga e tenacidade. Através do processo de bi-orientação as moléculas do material são orientadas no sentido dos principais esforços solicitantes: circunferencial e longitudinal.

Como consequência da orientação molecular a estrutura de parede passa a ser constituída por finas camadas (laminar). Com isto o tubo passa a ter uma excelente tenacidade, ou seja, resistência a transmissão da fissura por eventuais usos superficiais ou entales decorrentes do transporte, manuseio e instalação bem como elevada resistência a fadiga. A associação de alta resistência a tração e a tenacidade (resistência a transmissão da fissura lenta ou rápida) resulta em uma estrutura extremamente robusta.

O material dos tubos PVC-O apresenta resistência muito superior aos demais materiais termoplásticos disponíveis no mercado. O gráfico 73, abaixo compara os valores de MRS (“Minimum Required Strength”, ou seja, a Resistencia a longo prazo dos materiais - 50 anos a temperatura de 20°C):

*Figura 73 - Resistência do material a 50 anos a 20°C*



Fonte: Politejo (2014)

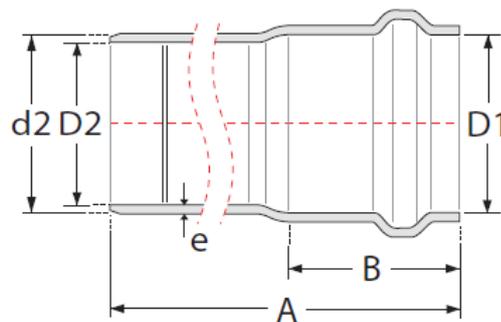
A tabela 10 apresenta informações dimensionais do tubo PVC-O e a figura 74 a localização das informações, no tubo.

*Tabela 10 - Informações dimensionais do tubo PVC-O*

DN	D1	D2	D3	e	A	B
100	119,0	111,4	118	3,2	5890	129,0
150	171,2	160,6	170	4,7	5910	148,4
200	223,4	209,6	222	6,2	5930	164,6
250	275,8	258,8	274	7,6	5960	188,4
300	328,2	308,0	326	9,0	5990	213,5

Fonte: Amanco (2014)

*Figura 74 - Localização das informações no tubo*



Fonte: Amanco (2014)

A grande ductibilidade (capacidade de deformação plástica), grande tenacidade (resistência à propagação de fissura) decorrente da constituição estrutural da parede, em camadas moleculares e grande resistência a tração.

O principal esforço que age sobre uma tubulação conduzindo água sob pressão, é a pressão hidrostática interna. Ela gera uma tensão circunferencial na parede do tubo, que pode ser calculada por 132.

$$\sigma = p \cdot \frac{(de-e)}{(2 \cdot e)} \quad (132)$$

Onde:

$\sigma$  → tensão circunferencial admissível na parede do tubo em MPa;

$p$  → pressão hidrostática interna em MPa;

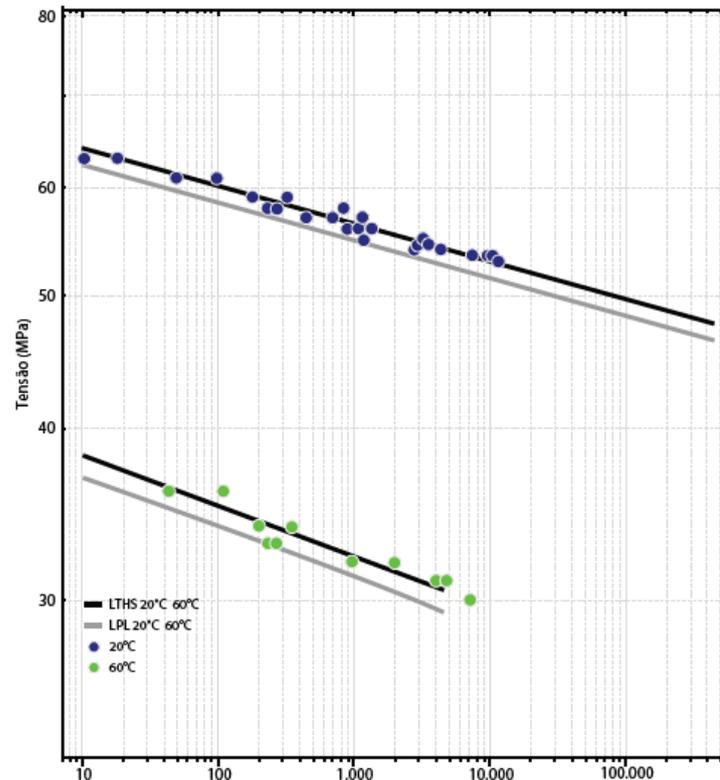
$de$  → diâmetro externo médio do tubo em mm;

$e$  → espessura de parede mínima em mm.

Para que o tubo trabalhe adequadamente, a tensão circunferencial atuando em sua parede, não deverá exceder a resistência do material, ou seja, a sua tensão admissível.

A resistência dos materiais plásticos depende do tempo e da temperatura. Para os tubos PVC-O a resistência é determinada para um tempo de ruptura estimado de 5-anos a uma temperatura de 20°C. Esta resistência hidrostática é o  $\sigma_{LPL}$  que é obtido através do ajuste de uma reta em um gráfico log x log de tensão e tempo, figura 75. Esta reta é obtida através dos valores de tensão de ruptura em tempos previamente estabelecidos até 10.000hh ou 1,14 anos e é extrapolada até 50 anos. O  $\sigma_{LPL}$  é a quantidade em MPa de tensão, representando 97,5% do limite de confiança inferior da resistência hidrostática estimada na temperatura de 20°C, que para o PVC-O  $\sigma_{LPL} = 46,46$  MPa. Este valor está na tabela 1 da ISO 12162, ou seja, MRS = 45 MPa (AMANCO, 2014).

Figura 75 - Curva de regressão



Fonte: Amanco (2014)

Obs.:

1. LTHS → tensão hidrostática de longa duração do material do tubo (long-term hydrostatic strengt). O LTHS é determinado através da análise dos dados da relação tensão circunferencial x tempo de falha, em um período de pelo menos 10 000 horas de ensaio. Os dados são analisados estatisticamente, sendo que a tensão a 100 000 horas é determinada por extrapolação (LTHS). O valor resultante do LTHS determina a categoria de HDB (tensão base de projeto) para o tubo analisado.
2. LPL → Limite menor de confiança

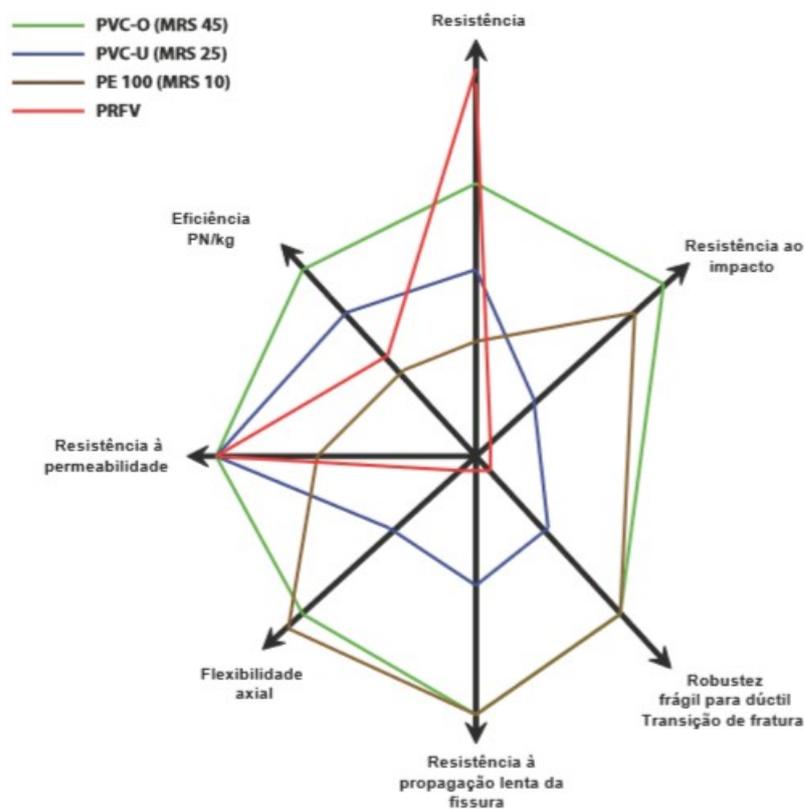
A partir do gráfico, o valor da tensão circunferencial admissível na parede do tubo e dado 133.

$$\log \sigma = -0,27 \cdot \log t + 1,80618 \quad (133)$$

O conceito de fabricação dos tubos PVC-O aumenta significativamente a resistência mecânica, resistência a tração, a tenacidade e a ductibilidade. A figura 76 demonstra as características de diferentes tubos termoplásticos.

Quando os transientes hidráulicos, em vez de ser esporádico, assumem um caráter repetitivo, com determinada frequência, é chamado de variação cíclica da pressão ou carregamento cíclico. Os materiais, de modo geral, tendem a romper com tensões mais baixas do que o seu limite de resistência, quando submetidos a carregamentos desta natureza. Se faz necessário uma verificação da resistência à fadiga da tubulação.

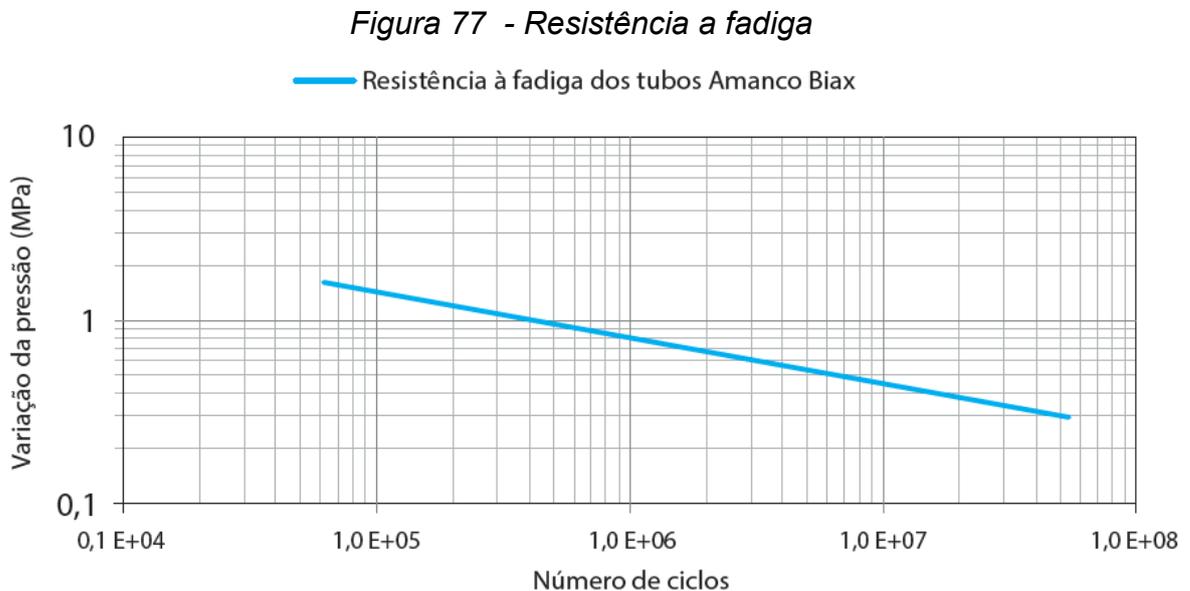
*Figura 76 - Características dos tubos termoplásticos*



Fonte: Amanco (2014)

O número de ciclos que uma tubuação pode resistir sob a ação de uma pressão variável depende muito mais da variação da pressão (diferença entre a pressão máxima e a pressão mínima) do que do valor médio das pressões atuantes.

A figura 77 apresenta a resistência a fadiga do tubos PVC-O.



Fonte: Amanco (2014)

#### 5.6.5 Polietileno de Alta Densidade – PEAD

A escolha do material para uma determinada tubulação deve levar em consideração diversos fatores, sendo:

- Condições de Operação:
  - Resistência a pressão de operação, para temperatura e vida útil esperadas;
  - Resistência físico-química ao fluido e ao ambiente;
  - Resistência a abrasão;
  - Flexibilidade ou rigidez necessárias;
  - Toxicidade e/ou propriedades organolépticas;
- Métodos de Instalação e União definidos
- Fatores Econômico e Comercial
  - Relação Custo x Benefício
  - Disponibilidade no Mercado

A resistência a pressão interna do tubo depende da tensão circunferencial do material na temperatura e vida útil projetada. Para os materiais plásticos, esses valores são

definidos e os materiais classificados através de curvas de regressão levantadas a várias temperaturas de operação.

Os materiais são classificados pela Mínima Resistência Requerida (MRS – Minimum Required Strength) assim determinada em MPa, para uma vida útil mínima de 50 anos a 20°C.

A tabela 11 apresenta o MRS para as tubulações poliolefínicas. Em adução de água são utilizados o PE 80 e o PE 100

*Tabela 11 - MRS (Minimum Required Streght) para cada tipo de tubulação*

<b>Material</b>	<b>Símbolo</b>	<b>MRS</b>
Polietileno PE 80 (PEAD e PEMD)	PE 80	8
Polietileno PE 100 (PEAD)	PE 100	10
Polietileno Reticulado	PEX	8
Polipropileno copolímero em bloco	PPB-80	8
Polipropileno copolímero randômico	PPR-80	8
Polipropileno homopolímero	PPH-100	10
Polibutileno	PB	14
Polietileno RT (temperatura elevada) tipo 1 e 2	PE-RT	8
PEAD sem classificação p/tubos sem pressão	PE	-

Fonte: ABPE (2013)

A Pressão Nominal (PN) em bar do tubo é definida em função do MRS (MPa) e suas dimensões, conforme 134

$$PN = \frac{20 \cdot MRS}{C \cdot (SDR - 1)} \quad (134)$$

Onde:

C → Fator de segurança aplicado (normalmente 1,25).

SDR → Relação padronizada (DE/e), Diâmetro Externo Nominal / espessura mínima de parede.

A Máxima Pressão de Operação é dada por 135.

$$MPO = PN \cdot f_T \quad (135)$$

Onde:

MPO → Máxima Pressão de Operação

PN → Pressão Nominal

$f_T$  → Fator de redução de pressão em função da temperatura de operação, de acordo com a tabela 13.

A tabela 12 apresenta o SDR de acordo com o MRS

*Tabela 12 - Relação DE / e*

SDR = RELAÇÃO DE / e									
MRS	PN 4	PN 5	PN 6	PN 8	PN 10	PN 12,5	PN 16	PN 20	PN 25
8	32,35	26	21	17	13,6	11	9	7,25	6
10	nd	32,35	26	21	17	13,6	11	9	7,25

Fonte: ABPE (2013)

*Tabela 13 - Fator de redução de pressão em função da temperatura de operação*

Composto	Temperatura °C						
	25	27,5	30	35	40	45*	50*
PE 80	1,0	0,90	0,87	0,80	0,74	0,67	0,61
PE 100	1,0	0,86	0,81	0,72	0,62	0,52	0,43

Nota: \* limitado a vida útil máxima de 15 anos

Fonte: ABPE (2013)

Os tubos são designados pelo seu Diâmetro Externo Nominal (DE) e seu SDR e/ou Classe de Pressão (PN) e espessura mínima (e).

- SDR (*Standard Dimension Ratio*) = DE/e
- PN (Pressão Nominal) em bar

Por recomendação da ABPE, no seu Manual de Boas práticas, quando houver a existência dos transientes hidráulicos o cálculo da celeridade da onda para tubos PEAD é dado por 136 e 137, dependendo do tipo de tubo utilizado.

$$\text{Para PE 80} \rightarrow c = \frac{1035}{\sqrt{SDR-1}} \quad (136)$$

$$\text{Para PE 100} \rightarrow c = \frac{1280}{\sqrt{SDR-1}} \quad (137)$$

A sobrepressão máxima admissível devido a ocorrência de transientes hidráulicos (PSO) é dada por 138

$$PSO = 1,5 \cdot MPO \quad (138)$$

A ABPE recomenda que para PSO até  $1,5 \cdot MPO$  não há necessidade de aumentar a classe de pressão do tubo.

A Subpressão Máxima Admissível devido aos transientes hidráulicos obedece o seguinte: para tubos  $SDR \leq 17$  (SDR 17 e 11) a máxima subpressão admissível para o tubo supera as pressões negativas práticas encontradas em rede. Não se faz necessário cuidados especiais.

## 5.7. Principais tipos de dispositivos utilizados para minimizar os efeitos do Golpe e Aríete

Existem atualmente diversos tipos de dispositivos para proteção do Golpe de Aríete. Podem ser agrupados em duas importantes categorias:

Dispositivos de proteção com capacidade de armazenar energia:

- Reservatório hidropneumático (com membrana ou com compressor)
  - Armazenam ar comprimido e sua capacidade de proteção é proporcional ao seu volume. Podem eliminar completamente as pressões negativas e positivas resultantes de qualquer evento gerador de um transientes hidráulico.
  - Os reservatórios hidropneumáticos com membrana (tecnologia mais moderna) não necessitam compressores, são mais econômicos a longo prazo e não requerem manutenção.
- Reservatório hidropneumático com tubo de imersão
  - Armazenam ar comprimido e sua capacidade de proteção é proporcional ao seu volume. Podem eliminar completamente as pressões negativas e positivas resultantes de qualquer evento gerador de um transientes hidráulico. Por não possuir membrana ou compressor, deve ocorrer ao menos uma parada de bombas ao dia para renovação do ar no interior do reservatório, devido a dissolução do ar no líquido, ideal para bombeamento de esgoto.
  - Possuem um tubo de imersão e uma válvula flutuadora para permitir o ingresso do ar externo e posterior pressurização pela ação da pressão na linha.
- Tanque unidirecional e chaminé de equilíbrio
  - Utilizam a energia gravitacional, portanto sua capacidade de proteção é limitada. Grande custo de fabricação, livre de manutenção. Em alguns casos são utilizados combinados com reservatórios hidropneumáticos para obtenção de soluções economicamente mais viáveis.
- Volante de inércia

- Dispõe de energia da inércia, que é uma propriedade geral da matéria, tecnologia antiga, capacidade limitada de proteção. Ultimamente em desuso.

#### Dispositivos de proteção sem capacidade de armazenar energia

- Ventosas ou válvulas de ar
  - Utilizam a pressão atmosférica como fonte de energia, evitam pressões negativas somente nas proximidades de sua localização devido a entrada de ar na tubulação. Possuem capacidade limitada de proteção, seu tempo de resposta não é imediato, requerem manutenção constante e não é possível monitorar seu funcionamento. As versões "ante Golpe de Aríete" evitam o golpe do flutuador interno da ventosa quando fecha.
- Válvula antecipadora de onda
  - Evita as pressões positivas nas imediações de sua instalação na estação de bombeamento ao liberar o fluido no meio ambiente. Somente são efetivas em bombeamentos curtos com importantes diferenciais de altura. Não fazem efeito nas pressões negativas. No geral não proporcionam proteção aos sistemas de transporte de fluidos.

#### 5.7.1 Ventosa

As ventosas são dispositivos de funcionamento automático para admissão e expulsão de ar de tubulações pressurizadas (pequenas ou grandes quantidades) e sua necessidade é reconhecida para as operações de enchimento e esvaziamento das tubulações para evitar colapso e ruptura das mesmas.

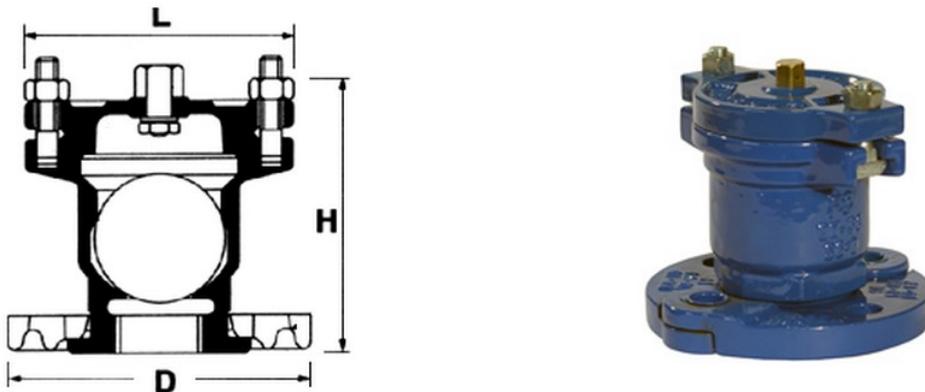
A Norma NBR 12215 (ABNT, 2017), diz que deverão ser previstos dispositivos de admissão e descarga de ar em trechos das adutoras suscetíveis de acumulação de ar (trechos muito longos) e em trechos altos (inclinação positiva), imediatamente antes e logo após as descargas de água da adutora. Esta norma também propõe a utilização de pontos intermediários de admissão de ar quando a linha piezométrica correspondente à descarga de um trecho de adutora estiver abaixo desta, contudo, não apresenta metodologias de cálculo para a definição desses pontos.

Tanto a admissão quanto a expulsão de ar pode ser em pequena ou grande quantidade, no Brasil não dispomos de Norma Nacional, como documento de referência utilizamos a Norma da AWWA - C512. Além da Norma Americana algumas companhias de saneamento no Brasil editaram as suas próprias Normas Internas.

Para o dimensionamento das ventosas, é necessário saber a vazão de enchimento da tubulação, a vazão de entrada e a geometria da válvula de cada fabricante além de escolher o tipo correto de ventosa para a operação da tubulação. Os tipos de ventosa são: admissão de ar (automática simples), expulsão de ar (cinética) ou a combinação das duas (tríplice função).

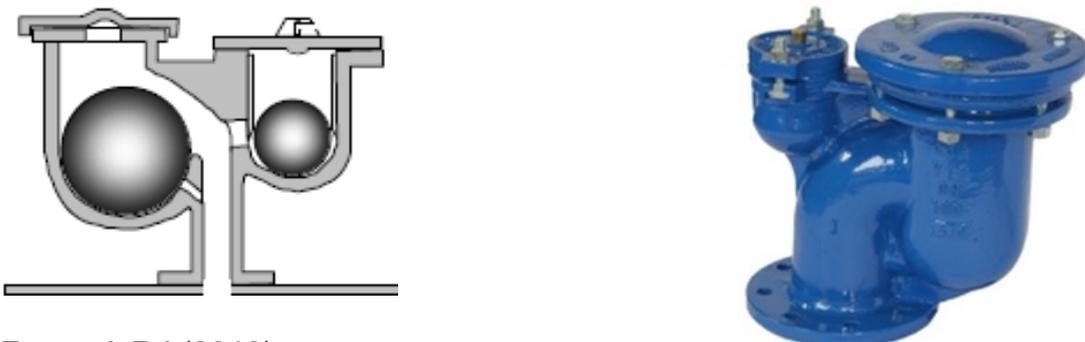
A figura 78 mostra a ventosa automática simples, a figura 79 a ventosa combinada e a figura 80 a ventosa cinética.

*Figura 78 - Ventosa automática simples*



Fonte: A.R.I (2018)

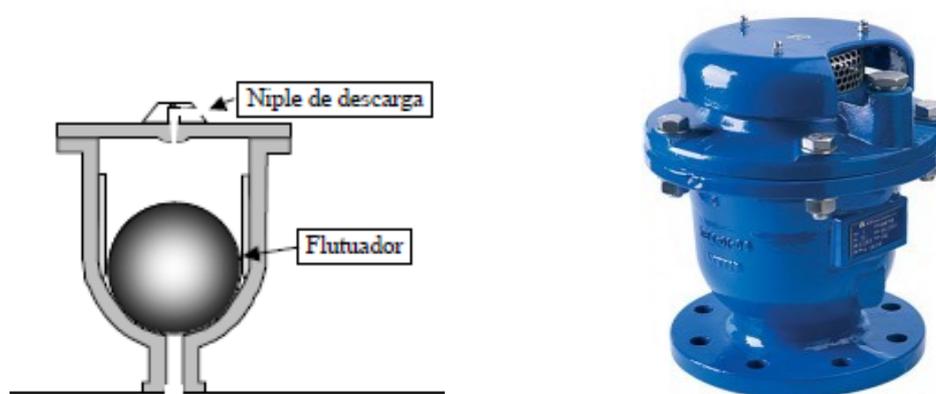
*Figura 79 - Ventosa combinada*



Fonte: A.R.I (2018)

Válvulas de ar (ventosas) estão sendo usadas no EUA por mais de um século em sistemas de tubulação de abastecimento de água e águas residuais. A operação delas vem proporcionando uma segura e eficiente operação dos sistemas hidráulicos. As funções delas incluem: a) liberação automática de pequenas quantidades de ar acumulado e gases dissolvidos e b) admissão ou expulsão grande quantidade de ar durante o procedimento de esvaziamento do sistema de abastecimento. A seguir são apresentados os três tipos básicos de válvula de ar (AWWA, 2007).

*Figura 80 - Ventosa cinética*



Fonte: A.R.I (2018)

Válvula de expulsão de ar, também chamada de válvula de pequeno orifício, foi projetada para automaticamente expulsar pequenas quantidades de ar acumulado ou gases dissolvidos dentro da rede de adução e/ou distribuição enquanto o sistema trabalha com pressões maiores do que a atmosférica.

Válvula de ar ou de vácuo, também com Válvulas de ar (ventosas) estão sendo usadas no EUA por mais de um século em sistemas de tubulação de abastecimento de água e águas residuais. A operação delas vem proporcionando uma segura e eficiente operação dos sistemas hidráulicos. As funções delas incluem: a) liberação automática de pequenas quantidades de ar acumulado e gases dissolvidos e b) admissão ou expulsão grande quantidade de ar durante o procedimento de esvaziamento do sistema de abastecimento.

Válvula de expulsão de ar, também chamada de válvula de pequeno orifício, foi projetada para automaticamente expulsar pequenas quantidades de ar acumulado ou gases dissolvidos dentro da rede de adução e/ou distribuição enquanto o sistema trabalha com pressões maiores do que a atmosférica.

A observação das condições de funcionamento de diversas tubulações, respaldada por comprovações de laboratórios de hidráulica, também verificou que dentro de determinados limites de declividades, ascendentes/descendentes (declividades críticas), e em função da velocidade de operação, o ar não fica retido em certos pontos altos, sendo carregado pela massa líquida e, portanto, dispensando a instalação de ventosas de expulsão (NETTO, 2015).

O carregamento do ar pelo fluxo numa tubulação é calculado por 139

$$V_c = 1,36 \cdot \sqrt{g \cdot D \cdot \sin \beta} \quad (139)$$

Onde:

$V_c$  → Velocidade crítica de arraste do ar (m/s)

$D$  → Diâmetro do tubo (m)

$g$  → Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$\beta$  → ângulo de inclinação do trecho descendente (graus)

A inclinação do trecho descendente da tubulação para o carregamento das bolhas de ar deve ser menor ou igual a inclinação crítica, apresentada em 140:

$$S_c = \tan \beta \quad (140)$$

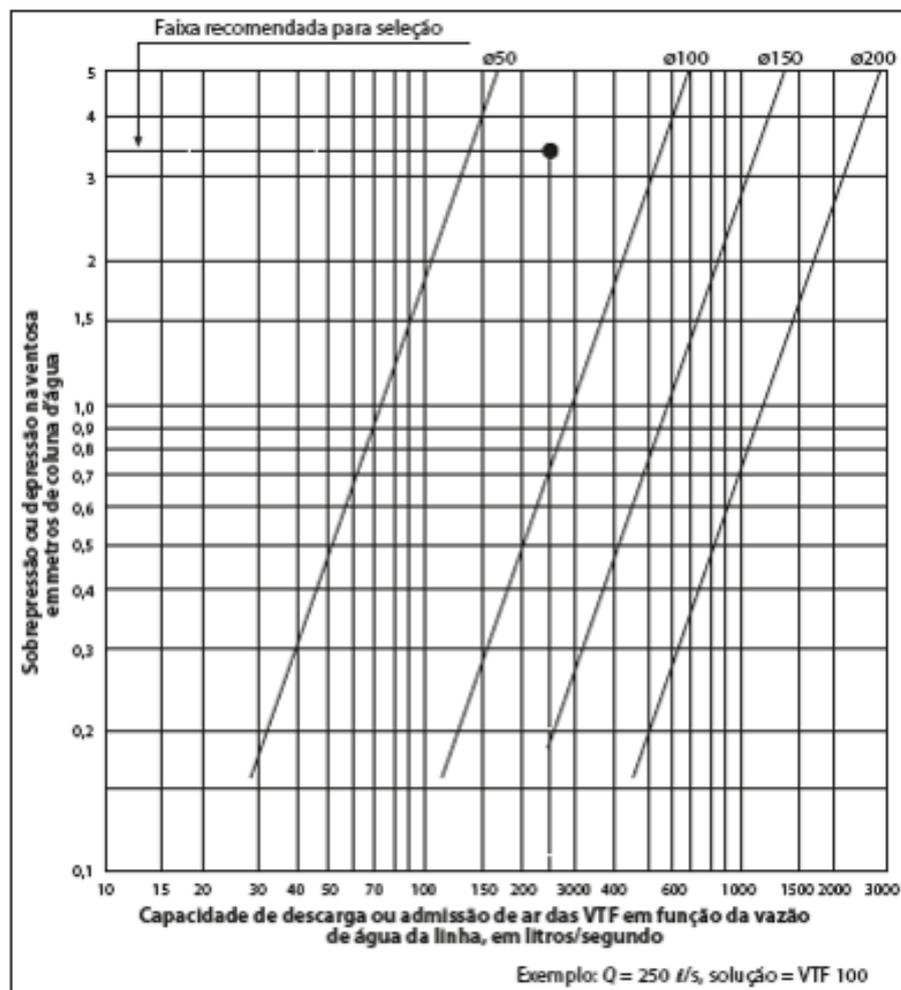
Onde:

$S_c$  → É a inclinação crítica para o carreamento do ar (m/m) pelo fluxo de água.

#### 5.7.1.1 Seleção do tamanho de uma ventosa

Conhecida a vazão da linha e adotado um valor para o diferencial de pressão entre o interior da ventosa e a atmosfera no momento do enchimento ou esvaziamento (adota-se  $3,5 \text{ mca} = 0,0035 \text{ MPa}$ ), obtém-se um ponto na figura 81 que indicará o tamanho da ventosa a ser escolhida.

Figura 81 - Gráfico para escolha da ventosa



Fonte: Netto (2015)

O dimensionamento das ventosas é feito em função da vazão de ar a ser expulsa ou admitida em determinado tempo e sob determinada pressão ou subpressão em relação a pressão atmosférica local. Portanto, os elementos básicos são a vazão de enchimento da tubulação para as ventosas de expulsão (ou o tempo de enchimento desejado) e a vazão de entrada, além da geometria da válvula de cada fabricante, logo, cada uma tem sua curva (NETTO, 2015).

Note-se que em pressões negativas, acima de 4,9 mca (0,049 MPa), o ar penetra na tubulação com a velocidade do som, que é a velocidade limite para o fluido ar. Portanto, embora alguns catálogos de fabricantes indiquem pressões abaixo dessa, não devem ser consideradas.

#### 5.7.2 Tanque hidropneumático ou Reservatório de Ar Comprimido

Uma opção de dispositivo para reduzir os efeitos dos transientes hidráulicos é o Tanque hidropneumático ou Reservatório Hidropneumático (RHO). Basicamente, é um reservatório metálico com água e ar, com pressão acumulada no seu interior, ligado à tubulação de recalque, logo após a válvula de retenção. É um dispositivo que é fabricado por encomenda, ou seja, para cada necessidade será calculado.

A figura 82 mostra três tanques hidropneumáticos, todo são pressurizados por compressor. A pressão do ar no reservatório, em condições normais de funcionamento, equilibra a pressão na adutora no ponto onde está se acha ligada ao reservatório. Com a interrupção do fornecimento de energia, uma parte da água contida no reservatório vai para a adutora quando a pressão no seu interior é inferior à pressão no reservatório (subpressão). De modo contrário, quando a onda de sobrepressão passa pela entrada do reservatório, esta comprime o ar, havendo redução da energia do sistema.

É um dispositivo muito utilizado para evitar a cavitação tubulação, ou seja, para uma depressão demasiado elevada, reduzindo a pressão do tubo abaixo de zero, para o zero absoluto (LOPES, 2016).

Em regime permanente, o RHO está em equilíbrio sob a ação do ar e da pressão no tubo. Quando ocorre o regime variável, acontecendo normalmente, devido à interrupção do grupo elevatório, a pressão baixa e a tubulação passa a ser alimentada pelo tanque. O volume de ar aumenta e diminui a pressão, para valores inferiores, correspondentes ao regime permanente, até um mínimo. Inicia-se uma nova fase, onde a vazão no tubo se inverte, diminuindo o volume do ar e aumentando a pressão para um valor máximo. O processo repete-se com uma série de oscilações, até atingir o equilíbrio, ou seja, estabelecendo um regime permanente (LOPES, 2016).

*Figura 82 - Tanque hidropneumático, 70m<sup>3</sup> cada*



Fonte: autor

Tratando-se da parada da bomba, a capacidade do RHO, para reduzir a depressão máxima resulta de tornar possível uma variação mais lenta do regime transitório. De fato, a capacidade de alimentação do tubo, resultante da água armazenada, impede uma queda brusca da grandeza da vazão na mesma, enquanto a energia potencial de

pressão acumulada é transferida para o escoamento, atenuando, desta forma, a diminuição de energia fornecida pela bomba (LOPES, 2016).

No tubo de ligação entre a adutora e o RAC, é comum a presença de uma redução. A sua finalidade é de produzir uma perda de carga, durante as transferências de água entre o RHO e a adutora. O amortecimento das variações extremas de pressão, não é só verificado pelo RHO mas também pelas perdas de carga adicionais.

Quando ocorre a entrada de serviço da bomba, realiza-se um procedimento análogo, onde o início se caracteriza pelo aumento da pressão na conduta, a jusante da bomba, assim como pela absorção, pelo RHO, de parte da vazão. No que diz respeito ao sistema elevatório, normalmente são equipamentos que introduzem ar na tubulação, devido à forte pressão que é dissolvida em água e transportada para o sistema.

O RHO pode ser basicamente de dois tipos, com compressor ou com bexiga. O primeiro tipo é o mais complexo para se operar, pois todo o sistema deve estar funcionando corretamente (compressor, equipamentos de medição e de segurança, parte elétrica e de alarme). O local de instalação deve ter energia disponível 24h por dia, 7 dias por semana, além de um gerador reserva, com toda essa complexidade muitas vezes o local de instalação não comporta tantas exigências técnicas.

Quando é utilizado o reservatório com bexiga de borracha não é necessária muito espaço para instalação nem tantas exigências técnicas. O ar e a água são separados pela bexiga, a água fica totalmente dentro da bexiga e com isso não há corrosão.

Do ponto de vista da engenharia mecânica, o Tanque Hidropneumático é um vaso de pressão, sua construção é bem complexa e exige muita experiência do fabricante. As fotos 83 e 84 mostram algumas etapas da construção e o produto acabado e a 85 um tanque hidropneumático horizontal.

*Figura 83 - Fabricação do corpo do Tanque hidropneumático*



Fonte: A.R.I (2018)

*Figura 84 - Teste de estanqueidade da bexiga*



Fonte: A.R.I. (2018)

Figura 85 - Reservatório hidropneumático pronto para ser usado



Fonte: A.R.I (2108)

### 5.7.3 Válvula antecipadora de onda

A válvula Antecipadora de Onda (VAO), figura 86, é um dispositivo de controle hidráulico auto operado, acionada por diafragma, unidirecional, instalado em derivação da linha a ser controlada, tem a função de proteger a rede contra ondas de pressão ou transientes hidráulicos provenientes do desligamento do conjunto motor-bomba. Pode ser utilizado para velocidades de fluxo máximo de 15 m/s.

A válvula inicia a sua abertura quando a pressão da rede atingir um ponto mais baixo do que a regulagem do piloto da válvula, antecipando a chegada da onda de sobrepressão. Desta forma, a válvula principal inicia a abertura antes da onda de sobrepressão, eliminando transientes hidráulicos.

A VAO deverá ser instalada em derivação da rede principal, próximo das válvulas de bloqueio e retenção do conjunto motor-bomba, como ilustra a figura 87. O diagrama de montagem está apresentado na figura 88 e a descrição de cada componente e sua função está na tabela 14.

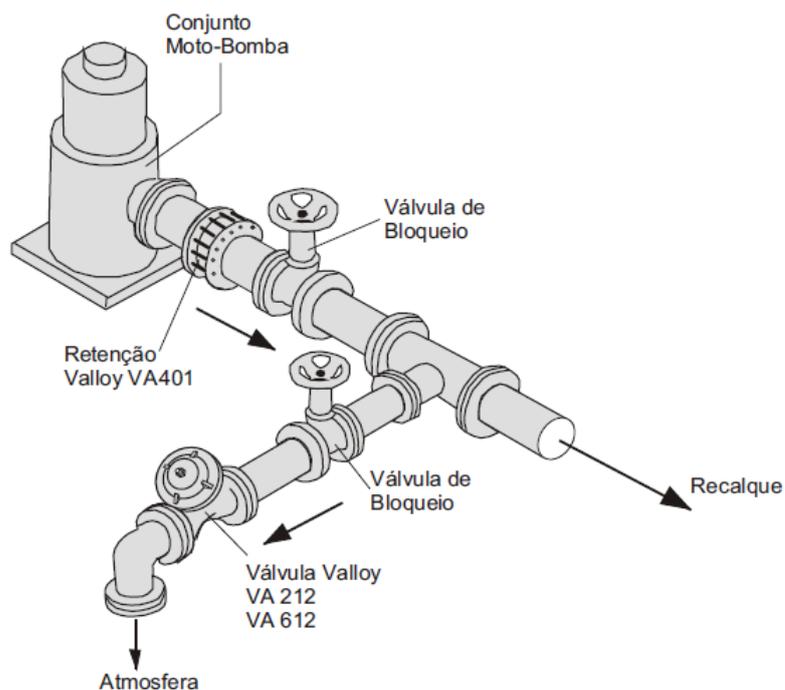
Figura 86 - Válvula antecipadora de onda



Fonte: Valloy (2018)

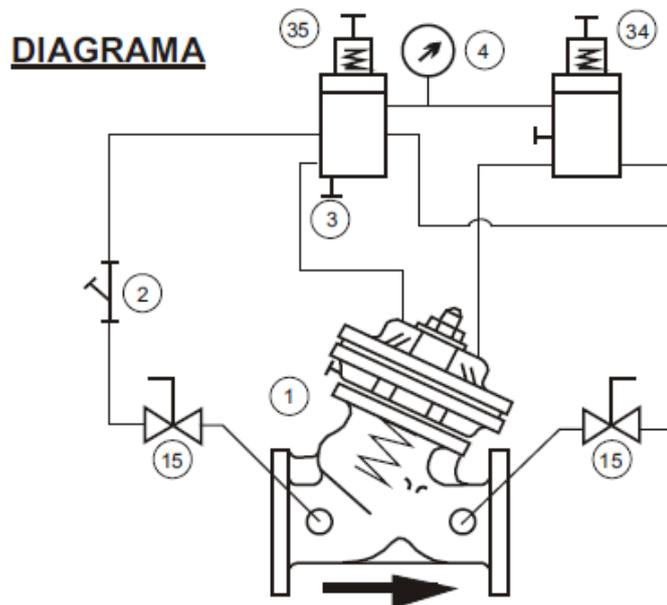
Em caso de sobrepressão súbita, a válvula procede a função de alívio, descarregando para a atmosfera o excesso de pressão até que a mesma se estabilize de acordo com a regulagem do piloto de controle.

Figura 87 - Instalação da Válvula Antecipadora de Onda



Fonte: Valloy (2018)

Figura 88 - Diagrama de montagem da VAO



Fonte: Valloy (2018)

Tabela 14 - Componentes para montagem da VAO

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	OBJETIVO	REGULAGEM
1	Válvula principal	Proporcionar o controle desejado por intermédio de um conjunto auto operado composto de um diafragma ligado a um obturador.	Válvula auto operada .
2	Filtro	Impedir o ingresso de partículas estranhas no circuito de controle.	Sem regulagem. Proceder limpeza periódica.
3	Válvula de agulha	Incorporada no piloto, controla a velocidade de fechamento da válvula principal.	Com o auxílio de uma chave de fenda gire o parafuso 1/4 de volta de cada vez até atingir a velocidade de fechamento ideal. (No sentido anti-horário a válvula fecha mais rápido)

4	Manômetro	Indicar a pressão de ajuste do funcionamento ou controle	Sem regulagem. Proceder aferição periódica.
15	Válvula de bloqueio	Isolar o circuito de controle quando na manutenção e, auxiliar o início da partida do equipamento.	Válvula de esfera comandada por alavanca, abrindo e fechando com 1/4 de volta.
34	Piloto - antecipadora	Comandar a abertura da válvula principal quando a pressão da rede estiver abaixo da regulagem do piloto.	Girando o parafuso no sentido horário, eleva-se o ponto de regulagem de abertura e vice-versa.
35	Piloto - alívio	Comandar a abertura da válvula principal quando a pressão da rede estiver acima da regulagem do piloto.	Girando o parafuso no sentido horário, eleva-se o ponto de regulagem de abertura e vice-versa.

Fonte: Valloy (2018)

Para início da operação alguns ajustes são necessários, a saber:

- Ajusta da função alívio
  - Fechar a válvula de bloqueio de jusante item 15
  - Colocar a válvula principal em contato com a pressão da rede, abrindo a válvula de bloqueio da rede em 1/4 de volta, aguardando alguns minutos a pressurização das câmaras de controle.
  - Abrir a válvula de bloqueio de jusante item 15. Se a válvula principal não abrir, gire o parafuso de regulagem do piloto item 35 no sentido horário pausadamente.
  - Quando a válvula principal item 1 estiver totalmente fechada, gire o parafuso de regulagem do piloto item 35 no sentido anti-horário lentamente até que a válvula principal inicie a sua abertura.

Obs.: Esta situação coloca a válvula regulada para uma pressão de alívio quando a adutora estiver com pressão acima daquela que foi regulada.

Obs. 2: Para uma regulagem confiável, é importante que na ocasião, o sistema esteja nas condições normais de operação.

- Ajusta da função antecipadora
  - Com a função de alívio regulada, proceder o desligamento do conjunto motor-bomba, verificando se as condições de abertura na baixa pressão (antecipadora) está satisfatório e, quando a onda de sobrepressão atingir o piloto de alívio (35) a válvula principal deverá se manter aberta. Caso as regulagens da função antecipadora e alívio não estiverem satisfatórias, regular um piloto de cada vez da seguinte forma: Girar o parafuso de regulagem do piloto (34) no sentido horário, a pressão da função antecipadora aumenta. Girar o parafuso de regulagem do piloto (35) no sentido horário, a pressão de alívio aumenta.
  - Lembrar que os pilotos foram regulados na fábrica conforme mencionado acima, e, se houver necessidade de uma regulagem mais fina, girar sempre 1/4 de volta o parafuso e operar o conjunto desligando a bomba, verificando no manômetro o resultado da regulagem. Se a válvula principal não fechar, atuar no fecho mecânico no sentido horário, limitando a abertura da válvula principal.e adequando-a à vazão do sistema.
- Ajuste do tempo de fechamento
  - Se houver necessidade de diminuir o tempo de fechamento da válvula, atuar no parafuso de regulagem (3) no sentido anti-horário. Esta regulagem deve ser feita lentamente. A cada 1/4 de volta proceder uma operação do conjunto para verificar se o tempo de fechamento da válvula principal (1) está satisfatório.

Observações importantes:

- Nunca operar o conjunto com a agulha (3) totalmente aberta, com o risco da válvula principal (1) não abrir nas pressões reguladas.
- Verificar se as válvulas de bloqueio (15) de montante e jusante estão abertas, com o risco da válvula principal (1) não abrir nas pressões reguladas.

Mais informações sobre modelagem computacional da VAO ler o Artigo publicado na RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, *Volume 19 n.2 –Abr/Jun 2014, 101-114*, com o título Modelagem Computacional da Válvula Antecipadora de Onda como Mecanismo de Alívio para o Golpe de Aríete, dos autores João Marcelo Costa Barbosa e Marco Aurélio Holanda de Castro.

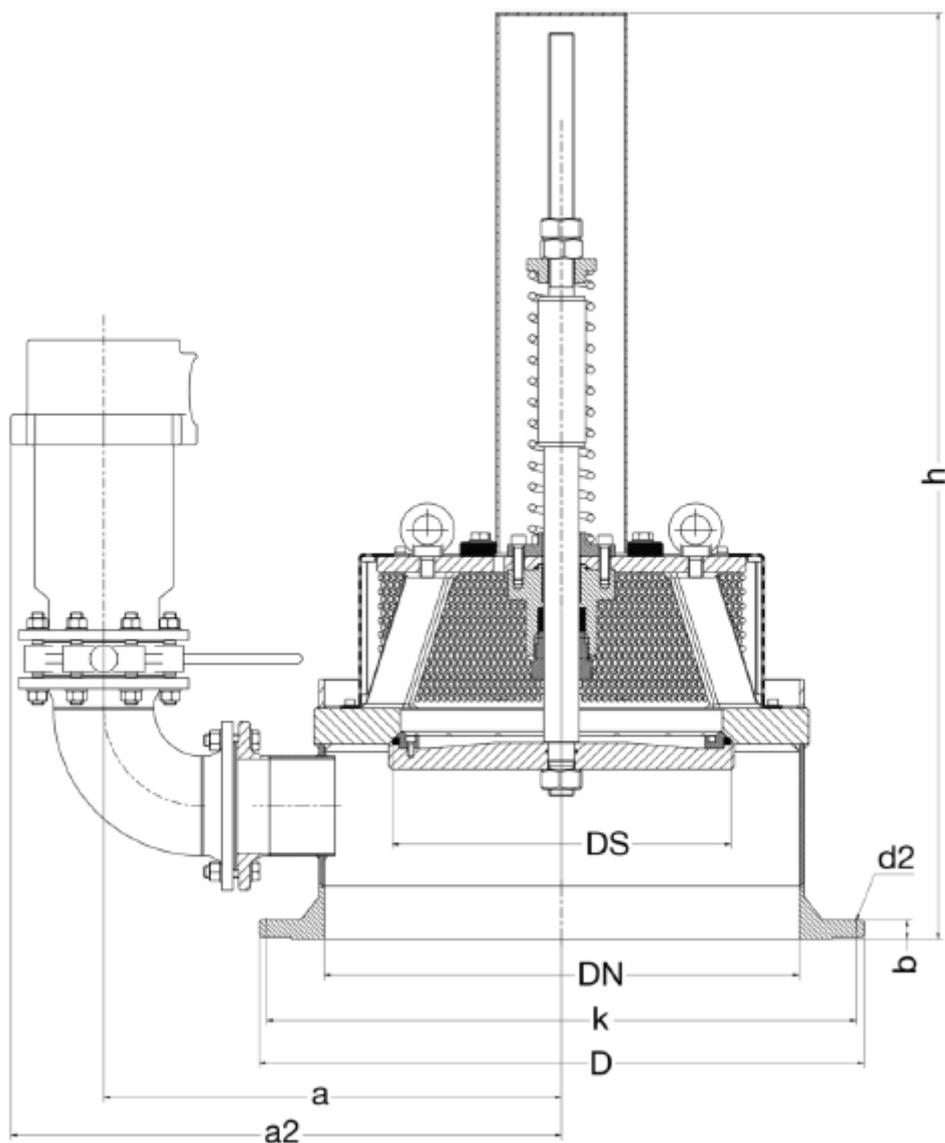
#### 5.7.4 Válvula quebra vácuo

A válvula quebra vácuo, figura 89, foi projetada para descarregar automaticamente ou admitir grandes volumes de ar durante o enchimento ou drenagem de uma tubulação. Esta válvula abrirá para aliviar a pressão negativa sempre que a separação da coluna de água ocorrer. O uso deste tipo de válvula é indicado para circunstâncias fora do padrão:

- encanamentos de água com condições de surgimento de transientes hidráulicos;
- nos pontos mais alto das tubulações de água com encostas íngremes;
- encanamentos de água onde ocorre a separação da coluna de água;
- sistemas de água com demandas de alta pressão.

A válvula quebra vácuo descarrega ar a altas taxas de vazão durante o enchimento do sistema e admite o ar em altas taxas de fluxo durante esvaziamento, parada de bomba ou na separação da coluna da água. A qualquer momento durante a operação do sistema, se a pressão interna cair abaixo da pressão atmosférica, o ar entrará no sistema. A descarga suave de ar impede que os picos de pressão e outros fenômenos destrutivos aconteçam. A ingestão de ar em resposta à pressão negativa protege o sistema das condições de vácuo destrutivas e evita danos causados pela separação da coluna da água. Entrada de ar é essencial para esvaziamento eficiente da tubulação.

Figura 89 - Válvula quebra vácuo VAG



Fonte: VAG (2015)

Como o sistema cheio e com muita pressão (sobrepessão), a válvula de ar funciona nas seguintes etapas:

1. o ar é descarregado pela válvula.
2. o líquido entra na válvula, levantando o flutuador que empurra a selagem para a sua posição de vedação.

As tabelas 15, 16 e 17 a seguir informam as dimensões da válvula em relação a pressão de serviço.

Tabela 15 – Dimensional válvula quebra vácuo VAG para PN 25

<b>PN 25</b>	<b>DN</b>	<b>300</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>800</b>
	D (mm)	485	730	845	1085
	DS (mm)	200	300	450	550
	a (mm)	425	575	650	770
	a2 (mm)	550	700	800	950
	b	28	37	42	51
	d2 (mm)	30	36	39	48
	h (mm)	850	1065	1500	1650
	k (mm)	430	660	770	990
	Número de furos	16	20	20	24
	Peso aproximado (kg)	125	250	400	700
	Volume aproximado (m <sup>3</sup> )	0,4	0,8	1,7	2,8

Fonte: VAG (2015)

Tabela 16 - Dimensional válvula quebra vácuo VAG para PN 16

<b>PN 16</b>	<b>DN</b>	<b>300</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>800</b>
	D (mm)	460	715	840	1025
	DS (mm)	200	300	450	550
	a (mm)	425	575	650	770
	a2 (mm)	550	700	800	950
	b	28	32	36	38
	d2 (mm)	26	33	36	39
	h (mm)	850	1065	1500	1650
	k (mm)	410	650	770	950
	Número de furos	12	20	20	24
	Peso aproximado (kg)	125	250	400	700
	Volume aproximado (m <sup>3</sup> )	0,4	0,8	1,7	2,8

Fonte: VAG (2015)

Tabela 17 - Dimensional válvula quebra vácuo VAG para PN 10

<b>PN 10</b>	<b>DN</b>	<b>300</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>800</b>
	D (mm)	445	670	820	1015
	DS (mm)	200	300	450	550
	a (mm)	425	575	650	770
	a2 (mm)	550	700	800	950
	b	26	28	28	32
	d2 (mm)	22	26	30	33
	h (mm)	850	1025	1500	1650
	k (mm)	400	620	725	950
	Número de furos	12	20	20	24
	Peso aproximado (kg)	125	250	400	700
	Volume aproximado (m <sup>3</sup> )	0,4	0,8	1,7	2,8

Fonte: VAG (2015)

Quando a pressão interna cai abaixo da pressão atmosférica (pressão negativa):

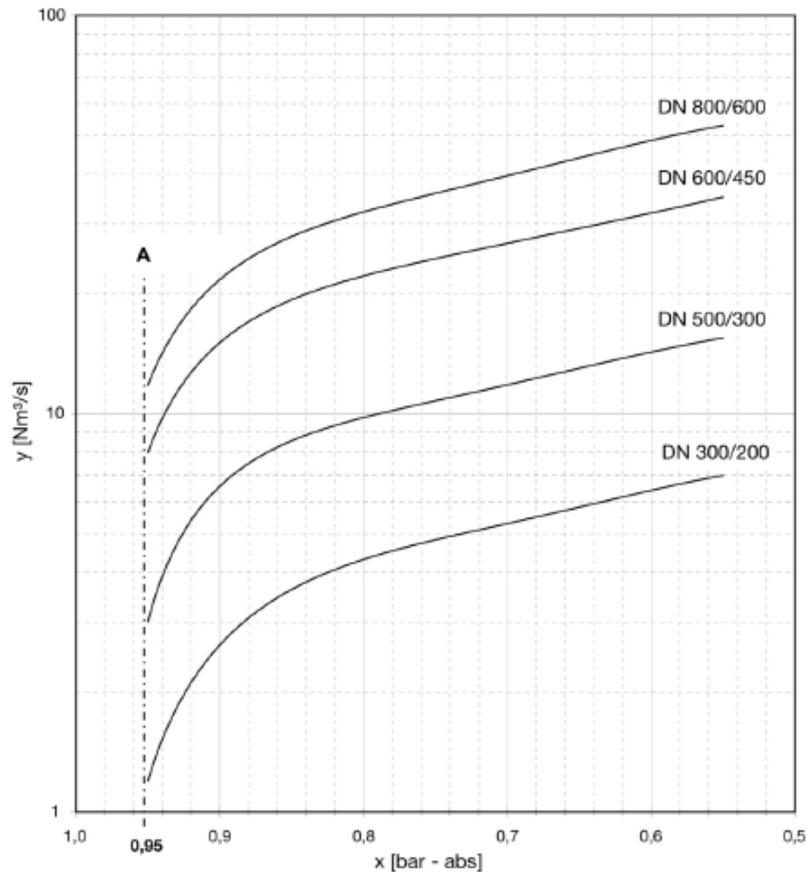
1. o flutuador deixará cair para baixo, abrindo imediatamente a admissão de ar
2. o ar entrará no sistema.

A válvula quebra vácuo é uma válvula de segurança controlada por baixas pressões nas adutoras/tubulações e pode abrir a qualquer momento. A pressão admissível na tubulação para operar deve ser 0,55 bar absoluto ou -0,45 bar em relação a pressão atmosférica, pode variar de modelo a modelo e de fabricante a fabricante. A velocidade de entrada de ar pode ser de aproximadamente 200 m/s.

A pressão mínima para vedação da sede na exaustão de ar é de 0.3 bar. O disco maior da válvula é utilizado para entrada de grandes quantidades de ar e com altas velocidades por desligamento dos conjuntos de bombeamentos inesperados, queda de energia elétrica, dreno rápido ou rompimento de adutora.

A figura 90 é um diagrama de vazão de entrada de ar em relação a pressão interna da adutora e diferentes diâmetros nominais.

Figura 90 - Taxa de entrada de ar



Fonte: VAG (2015)

Onde:

Eixo X → pressão interna (p) absoluta (bar)

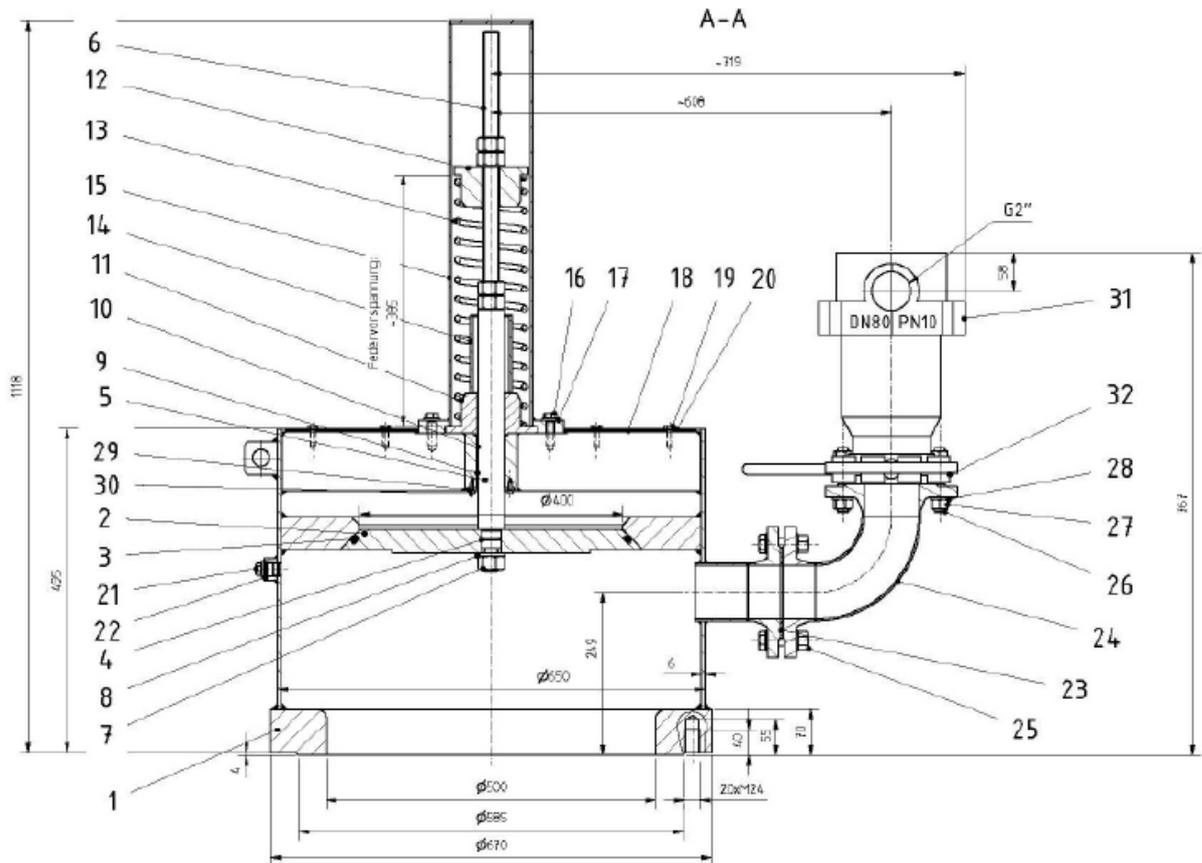
Eixo Y → taxa de admissão de ar (Q) (Nm³/s)

A → início da abertura

Para manutenção é recomendado instalar uma válvula de bloqueio antes da quebra vácuo, válvula borboleta, desta forma habilita o operador em realizar a manutenção na válvula com segurança. Antes de colocar a válvula em operação, uma inspeção visual de todas as partes funcionais é obrigatória. Checar se todas as conexões estão apertadas apropriadamente. A inspeção deve ser na posição aberta. A princípio a válvula deve ser operada para abrir e fechar pelo menos uma vez para verificar o movimento.

Todas as peças da válvula quebra vácuo da VAG estão descritas na figura 91 e na tabela 18.

Figura 91 - Projeto da válvula quebra vácuo VAG



Fonte: VAG (2015)

Tabela 18 - Descrição peças válvula quebra vácuo VAG

POS	DESCRIÇÃO	POS	DESCRIÇÃO
1	Corpo	17	Arruela
2	Disco	18	Gaiola de proteção
3	Anel de vedação	21	Bujão de dreno
4	O-ring	22	Anel de vedação
5	Haste principal	23	Junta plana
6	Haste	24	Curva
7	Porca sextavada	26	Prisioneiro
9	Bucha de rolamento	27	Porca sextavada
10	Bucha de rolamento	28	Arruela
11	Flange inferior	29	Suporte da arruela
12	Flange superior	30	Parafuso cilíndrico
13	Mola	31	Ventosa tríplice função
15	Tampa da mola	32	Válvula borboleta
16	Parafuso cabeça sext.		

Fonte: VAG (2015)

## 6 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será abordado o estudo de caso de uma adutora que faz a ligação entre a Estação de Tratamento de Água -ETA e os três Reservatórios Apoiados – RAP's do município de Limoeiro/PE.

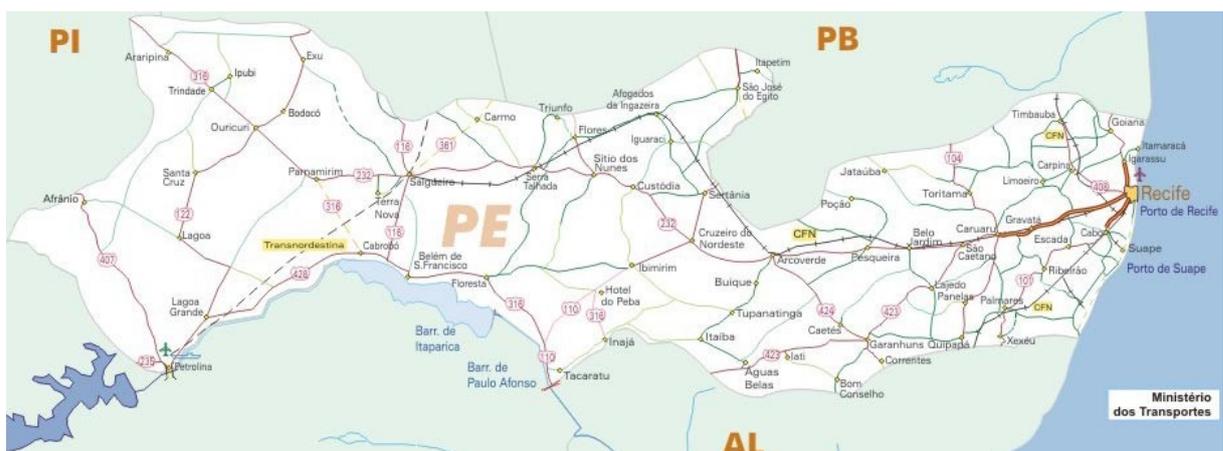
### 6.1 Dados da localidade

Limoeiro situa-se na Mesorregião do Agreste de Pernambuco, Microrregião do Médio Capibaribe, no Agreste do Estado de Pernambuco. A sede do município está situada na bacia do Capibaribe e dista a 77 quilômetros da capital do Estado. As rodovias PE 90 e BR 408 ligam Limoeiro à capital do Estado de Pernambuco, Recife (IBGE, 2018).

#### 6.1.1 Mapa de situação

As figuras 92 e 93 mostram o mapa do Estado de Pernambuco e a distância relativa entre o município de Limoeiro e a capital pernambucana.

*Figura 92 - Mapa de Pernambuco*



Fonte: mapas-brasil (2018)

Figura 93 - Posição relativa a Recife



Fonte: viagemdeferias (2018)

### 6.1.2 Aspectos fisiográficos – águas superficiais

O município de Limoeiro encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Seus principais tributários são os rios Capibaribe, Orobó, Cotunguba e Tracunhaém e os riachos: Marajó, Meu refúgio, Gabioá, das Areias, Ladeira Vermelha, da Mangueira, da Praça, Montado e da Serra. Os principais corpos de acumulação são: a Lagoa do Ouro e os açudes: Boa Viagem, Salgado, Três Lagoas, do Mari e Lasinha. Todos os cursos d'água no município têm regime de fluxo intermitente e o padrão de drenagem é o dendrítico (CPRM. 2005).

### 6.2 Estudo de caso: Adutora de Limoeiro/PE

A Companhia Pernambucana de Saneamento – Compesa, é a responsável pelo fornecimento e distribuição de água no município de Limoeiro, situado no estado de Pernambuco. No ano de 2009 a companhia juntamente com o Governo do Estado de Pernambuco iniciou o Programa para o fim do Racionamento e Redução de Perdas

no Interior - PRORED, e uma das cidades beneficiadas foi Limoeiro. Em 2010 as obras para melhorar o abastecimento de água iniciaram (MAGALHÃES, 2017).

Foram investidos 12 milhões de reais para melhoria da rede de distribuição e em controle operacional. Dentro das melhorias na rede de distribuição está incluída a construção de uma nova adutora que liga a Estação de Tratamento de Água – ETA aos Reservatórios Apoiados – RAP's (MAGALHÃES, 2017).

A nova ligação entre a ETA e os RAP's é em Ferro Fundido Dúctil – FOFO, K7 DN 250 com extensão aproximada de 515m com duas ventosas de alto desempenho e com desnível geométrico de 65m. No momento de projeto houve somente dimensionamento do diâmetro, da escolha do material e visita in loco para escolha do melhor local para colocação e instalação das ventosas (MAGALHÃES, 2017).

Quando o projeto foi elaborado em 2009-2010 ainda não se tinha no Brasil, tubos em Policloreto de Vinil Orientado - PVC-O, os únicos materiais para o diâmetro a ser usado era Ferro Fundido (FOFO) e o Policloreto de Vinil com Diâmetro Externo Equivalente ao Ferro Fundido - PVC DEFOFO. No dimensionamento hidráulico as pressões de trabalho ficaram acima do que o material polimérico resiste, restando somente uma opção que foi a metálica (MAGALHÃES, 2017).

Nos dias atuais, está disponível no mercado outro tubo polimérico, o PVC-O que em algumas condições de operação e diâmetro é uma opção ao Ferro Fundido, principalmente quando se trata de Golpe de aríete, transientes hidráulico, regime transitório de escoamento e resistência mecânica (MAGALHÃES, 2017).

No assentamento da tubulação no campo foram utilizados tubos de ferro fundido dúctil K7 DN 250, válvulas gaveta cunha emborrachada DN 250 e ventosas de auto rendimento DN 50. Em cada bolsa da tubulação há um bloco de ancoragem como pode ser visto na figura 94 (MAGALHÃES, 2017).

*Figura 94 - Vista parcial da adutora, blocos de ancoragem e acesso*



Fonte: autor

Um estudo detalhado referente a transientes hidráulico não foi realizado, a adutora chega aos RAP`s e antes de se ligar ao barrilete de entrada e logo após a saída da ETA há válvulas gavetas que são utilizadas para manutenção da adutora. O fechamento ou abertura de uma válvula provoca o surgimento de fenômenos hidráulicos que devem ser estudados, previstos e dimensionados a fim de não ocorrer rompimento na tubulação e deixar mais de 45mil pessoas sem abastecimento (MAGALHÃES, 2017).

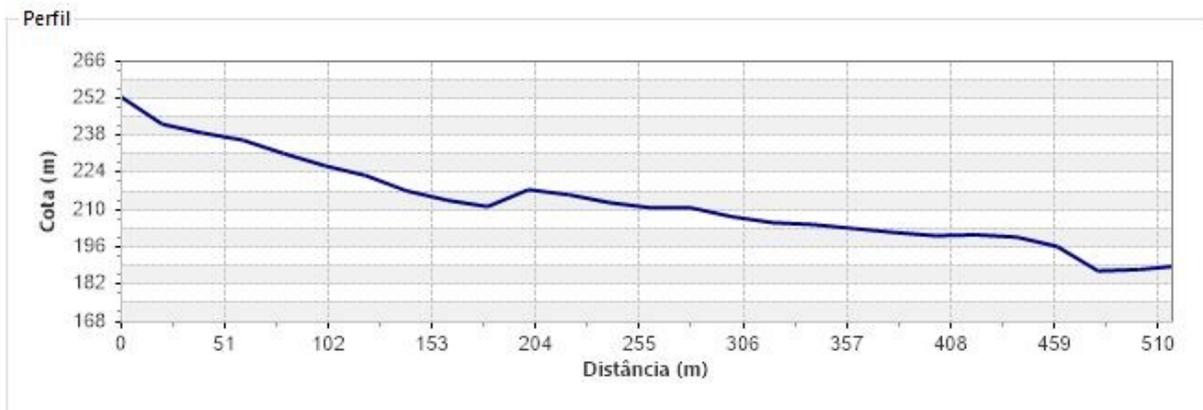
Foi simulado através do software gratuito Allievi, desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valencia (Espanha), o comportamento em regime transitório da adutora, incluindo a locação e dimensionamento das ventosas (MAGALHÃES, 2017).

A simulação computacional comparou o comportamento mecânico e hidráulico do tubo em FOFO frente ao tubo PVC-O. As variáveis estudadas foram a subpressão e a sobrepressão que são as mais importantes quando um fluido está em regime transitório (MAGALHÃES, 2017).

### 6.3 Condições de contorno

Para realizar a simulação computacional foi feito o levantamento topográfico do terreno onde passa a adutora, que consiste na apresentação planimétrica e altimétrica do terreno. Com o perfil longitudinal do terreno e da planta topográfica (planta baixa), dos pontos cotados, todas as informações dos pontos notáveis e acidentes geográficos são localizados, como por exemplo os locais altos e baixos para a instalação de ventosas, válvulas de descarga e desnível geométrico, na figura 95 vemos o perfil longitudinal do terreno.

*Figura 95 - Perfil longitudinal do terreno*



Fonte: autor

Na simulação do transientes hidráulicos a configuração de cálculo utilizada foi a padrão do Allievi. O aspecto visual dos elementos de projetos também foi o padrão do software.

Os objetos de desenhos utilizados na simulação foram: nó, válvula reguladora tipo gaveta e tubulação. As tubulações utilizadas foram de dois materiais, ferro fundido dúctil e PVC-O.

Na construção foram utilizadas ventosas de alto rendimento. As ventosas se instalam para evitar pressões negativas em uma tubulação, admitindo ar quando a pressão interna no ponto em que está instalada tende a ser menor do que a pressão atmosférica e expulsando o ar quando a pressão alcança valores superiores a atmosférica. No entanto, a admissão de ar na tubulação poderá em alguns casos criar mais problemas do que soluções e, a utilização de ventosas como sistema de proteção

para controlar os transitórios hidráulicos, se utiliza somente quando não há outro modo para evitar a ocorrência de pressões negativas.

Nesta simulação foi adotado Reservatórios de Grandes dimensões pois a adutora em estudo liga diretamente a ETA a um conjunto de RAP's sem derivação ou qualquer outra diminuição de vazão. Que tem as seguintes características: cota inicial de água (Z0): É a cota de água utilizada para calcular o regime permanente. Ao se tratar de um reservatório de grandes dimensões esta cota não se altera durante toda a simulação, independentemente das vazões de entrada e de saída que se estabelecem no processamento dos cálculos.

As figuras 96, 97, 98, 99, 101 e 102 mostram as condições de contorno e os parâmetros de entrada para realizar a simulação.

*Figura 96 - Nós e cotas*

Nós		
	Nome	Cota (m)
	N6	189
	N11	252,62
	N12	252,62

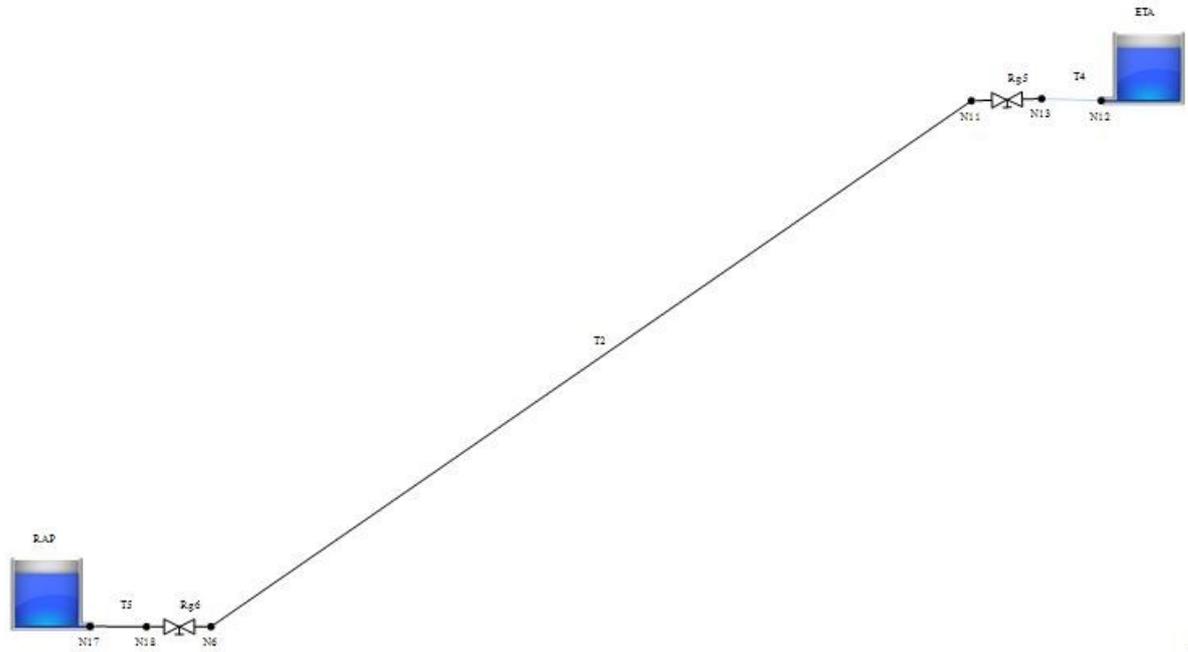
Fonte: autor

*Figura 97 - Reservatórios*

Reserv. - Dados Básicos							
Nome	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m <sup>2</sup> )	Z0 (m)	Zvar
ETA	N12	---	252,62	GD ▾		252,63	▾
RAP	---	N17	189	PD ▾	60	199	NO ▾

Fonte: autor

Figura 98 - Esquema geral da adutora simulada



Fonte: autor

Figura 99 - Tubos de ferro fundido dúctil

Tubos - Dados Básicos										
Nome	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Calc.	Perfil
T2	N11	252,62	N6	189	258	516,64	5,5	950,0723	Calc.	-^/\-/-
T4	N12	252,62	N13	252,62	258	95	5,5	950,0723	Calc.	----
T5	N18	189	N17	189	258	95	5,5	950,0723	Calc.	----

Perdas		Vazão nula	
Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
0,1	0	<input type="checkbox"/>	▼
0,1	0	<input type="checkbox"/>	▼
0,1	0	<input type="checkbox"/>	▼

Fonte: autor

Figura 100 - Dados gerais de cálculo

 Configuração de cálculo. Personalize seus parâmetros de simulação

**Cálculo do regime permanente**

Intervalo de tempo para o cálculo do regime permanente : (s)

Secção Reservatórios: (m<sup>2</sup>)

Velocidade inicial em tubulações: (m/s)

**Cálculo do regime transitório**

Intervalo de tempo para o cálculo em condutos forçados: (s)

Intervalo de tempo para o cálculo em canais: (s)

Tempo máximo de simulação: (s)

**Outras opções de cálculo**

Aceleração da gravidade: (m/s<sup>2</sup>)

Pressão atmosférica: (bar)

Cálculo com cavitação:  S  N

Tipo de fluido:  ...

Constante de gravação dos resultados em tubulações

Número máximo de iterações para resolução de sistemas:

Coefficiente de estabilidade de Courant:

Calado mínimo (lâmina livre): (mm)

Vazão mínima (lâmina livre): (l/s)

Fonte: autor

Figura 101 - Tubos em PVC-O

Tubos - Dados Básicos									
Nome	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil
T2	N11	252,62	N6	189	258,8	516,64	7,6	257,5288	Calc. 
T4	N12	252,62	N13	252,62	258,8	36	7,6	257,5288	Calc. 
T5	N18	189	N17	189	258,8	36	7,6	257,5288	Calc. 

Perdas		Vazão nula	
Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp 
0,003	0	<input type="checkbox"/>	
0,003	0	<input type="checkbox"/>	
0,003	0	<input type="checkbox"/>	

Fonte: autor

*Figura 102 - Válvulas gaveta*

Válvula regulação - Dados Básicos								Manobra
Nome	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo
Rg5	N13	N11	252,62	250	0,1	Comporta		Tabelada
Rg6	N6	N18	189	250	0,1	Comporta		Tabelada

Fonte: autor

#### 6.4 Materiais utilizados

Para a simulação computacional foi utilizado um Notebook Dell, processador Intel i7-65000, memória RAM 16Gb, Sistema Operacional Windows 10 de 64 bits e o software Allievi, versão 2.2.0.0 (MAGALHÃES, 2017).

O levantamento topográfico do encaminhamento da adutora foi realizado pelos seguintes equipamentos:

- Receptor GNSS L1/L2 X900+ CHC
- Estação Total precisão de 2" TKS 202 GOWIN.

#### 6.5 Simulação computacional

A adutora que liga a Estação de Tratamento de Água (ETA) aos Reservatórios Apoiados (RAP's) é toda por gravidade. Foram feitas quatro simulações ao todo, sendo duas para cada tipo de material, ou seja, duas para o Fero Fundido Dúctil e duas para o PVC-O. Todas as simulações levaram em conta a cavitação.

A simulação reproduziu o levantamento topográfico, reproduzindo o perfil longitudinal do terreno, as ventosas existentes, as válvulas do tipo gaveta, o DN e o material existentes da adutora, não foram colocadas descargas pois na execução da adutora não foram instaladas, pois a velocidade de escoamento está acima de 3,5 m/s e com isso não deixa resíduo na tubulação.

As simulações foram:

1. Adutora em ferro fundido dúctil com as válvulas a montante e a jusante sendo fechadas totalmente de acordo as equações do fabricante e com ventosas – adutora FOFO com proteção;
2. Adutora em ferro fundido dúctil com as válvulas a montante e a jusante sendo fechadas totalmente de acordo as equações do fabricante e em ventosas – adutora FOFO sem proteção;
3. Adutora em PVC-O com as válvulas a montante e a jusante sendo fechadas totalmente de acordo as equações do fabricante e com ventosas – adutora PVC-O com proteção;
4. Adutora em PVC-O com as válvulas a montante e a jusante sendo fechadas totalmente de acordo as equações do fabricante e sem ventosas – adutora PVC-O sem proteção.

#### 6.5.1 Tubo de Ferro Fundido Dúctil – K7 sem dispositivo de proteção

A figura 103 mostra as envoltórias das pressões máximas e mínimas da adutora quando o material utilizado é o Ferro Fundido Nodular. A adutora foi simulada com Tubo K7 DN 250 e sem nenhum dispositivo de proteção.

Figura 103 - Envoltória do tubo FOFO K7 DN 250 sem proteção

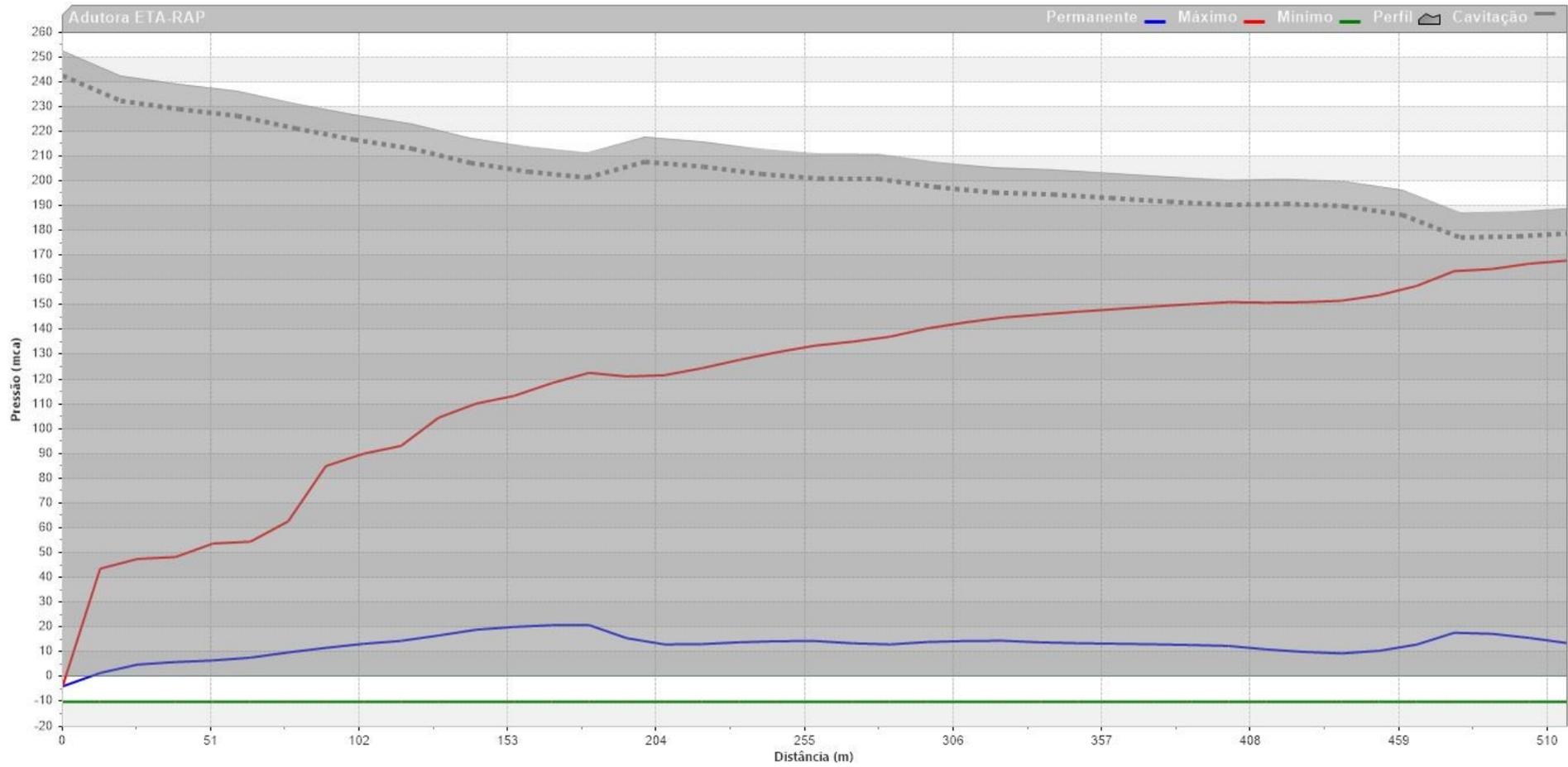


Fonte: autor

### 6.5.2. Tubo PVC-O sem dispositivo de proteção

A figura 104 mostra as envoltórias das pressões máximas e mínimas da adutora quando o material utilizado é o PVC-O. A adutora foi simulada com PVC-O DN 250 classe 16 e sem nenhum dispositivo de proteção.

Figura 104 - Envoltória do tubo PVC-O classe 16 DN 250 sem proteção



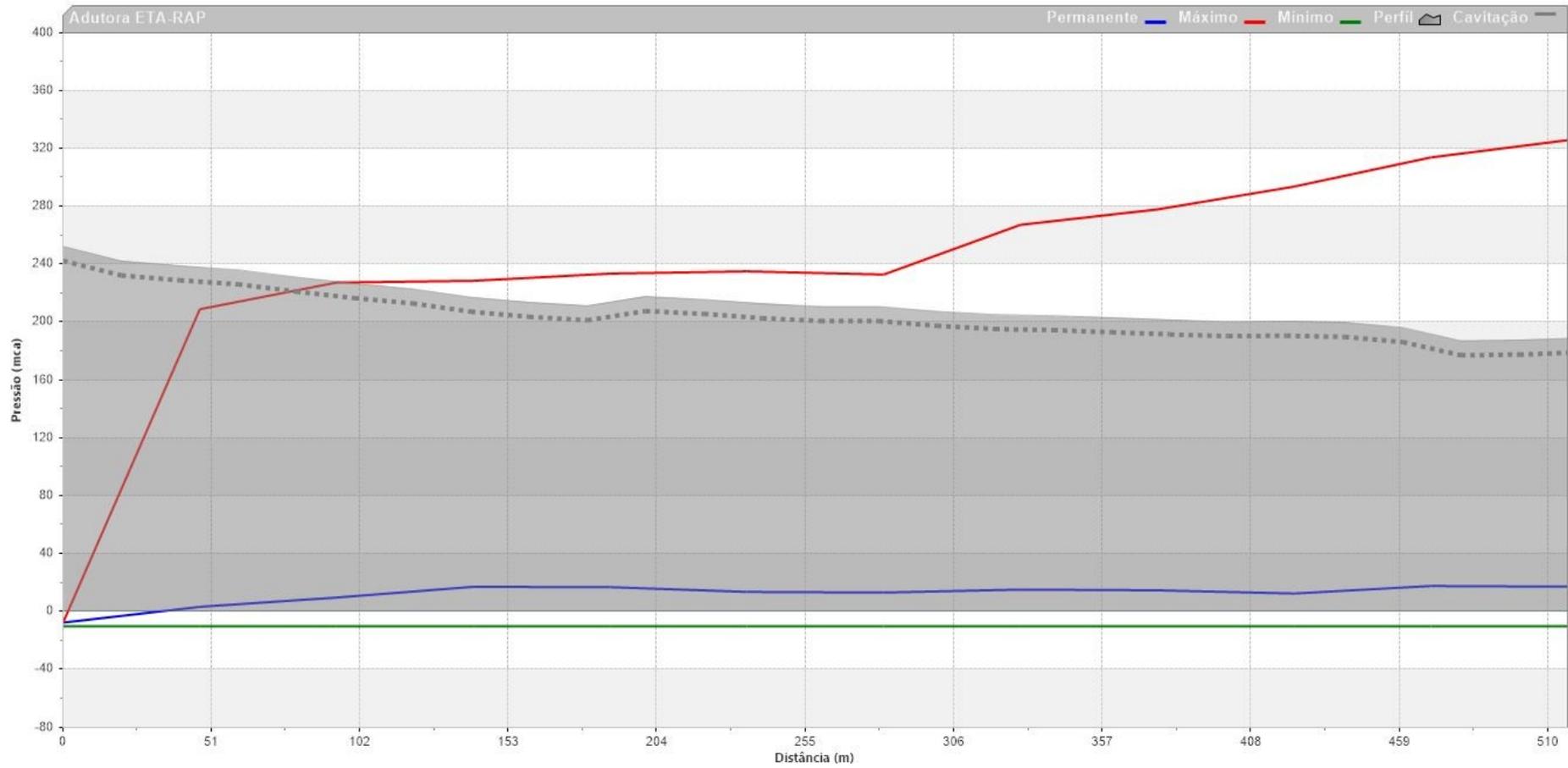
Fonte: autor

### 6.5.3 Tubo de Ferro Fundido Dúctil – K7 com dispositivo de proteção

A figura 105 mostra as envoltórias das pressões máximas e mínimas da adutora quando o material utilizado é o Ferro Fundido Nodular. A adutora foi simulada com Tubo K7 DN 250 e com duas ventosas como dispositivos de proteção.

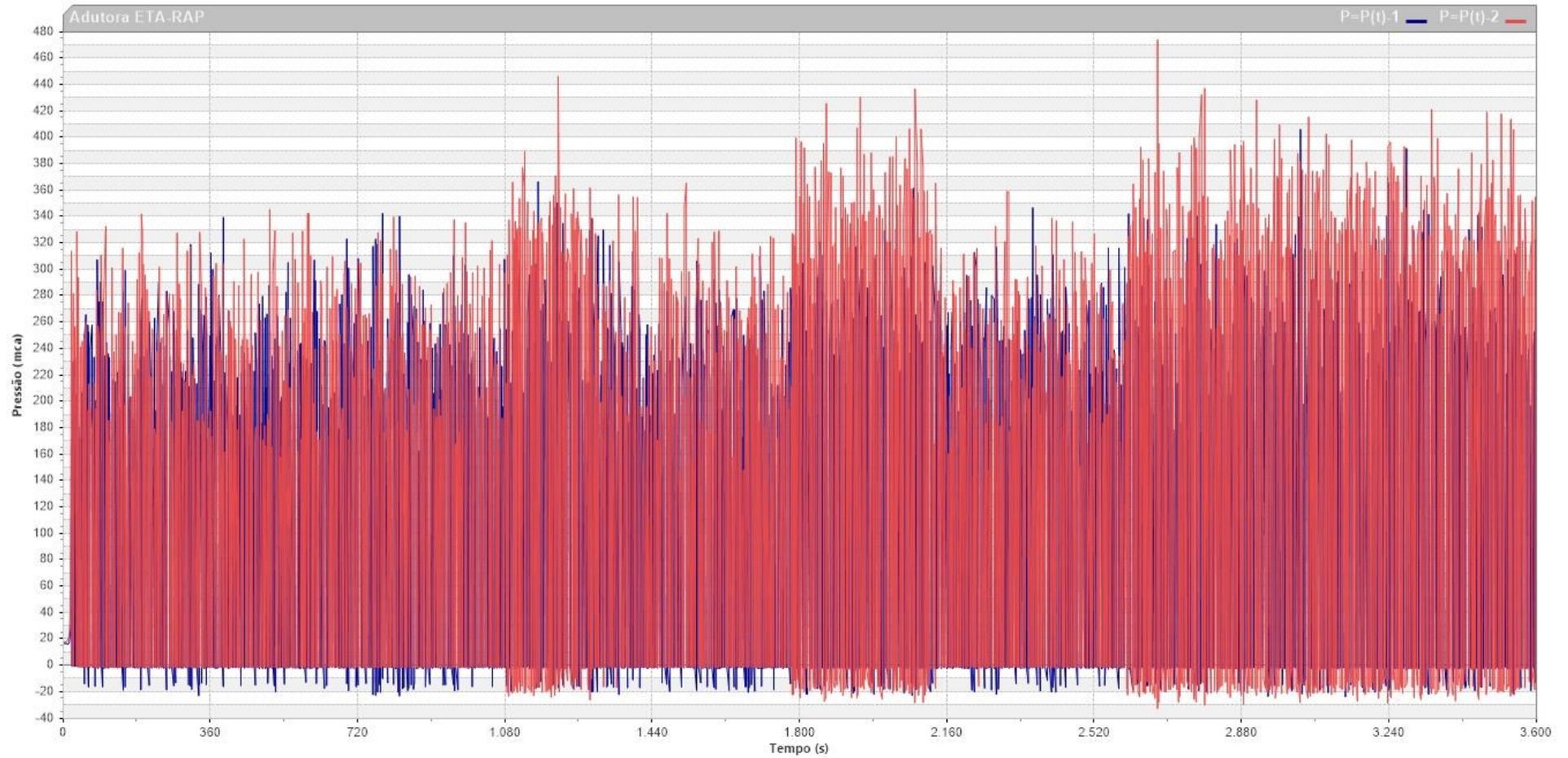
As figuras 106, 107 e 108 mostram o comportamento das ventosas em relação a pressão nas ventosas, admissão de ar, expulsão de ar respectivamente.

Figura 105 - Envoltória do tubo FOFO K7 DN 250 com proteção



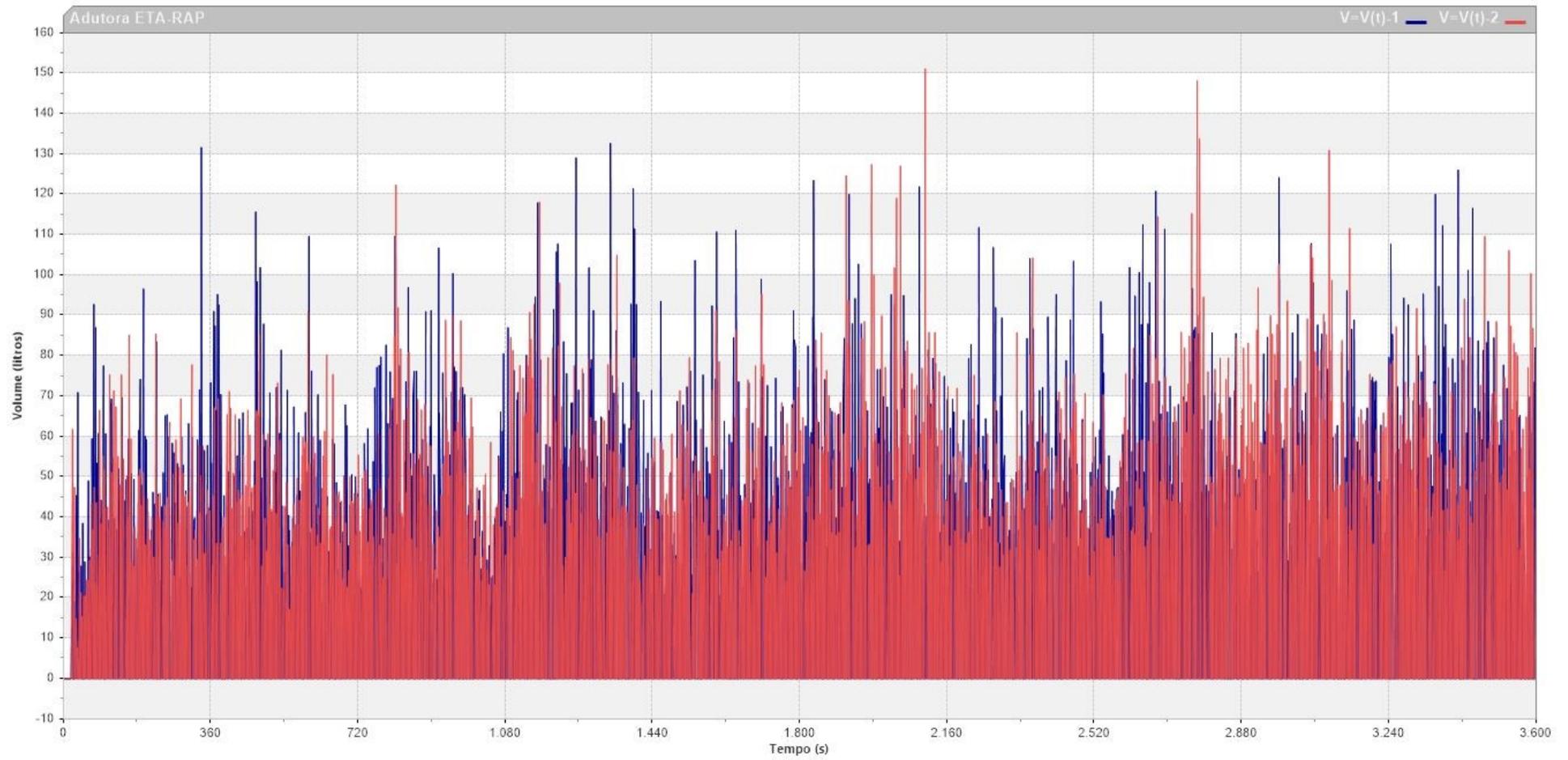
Fonte: autor

Figura 106 - Pressão nas ventosas V1 e V2



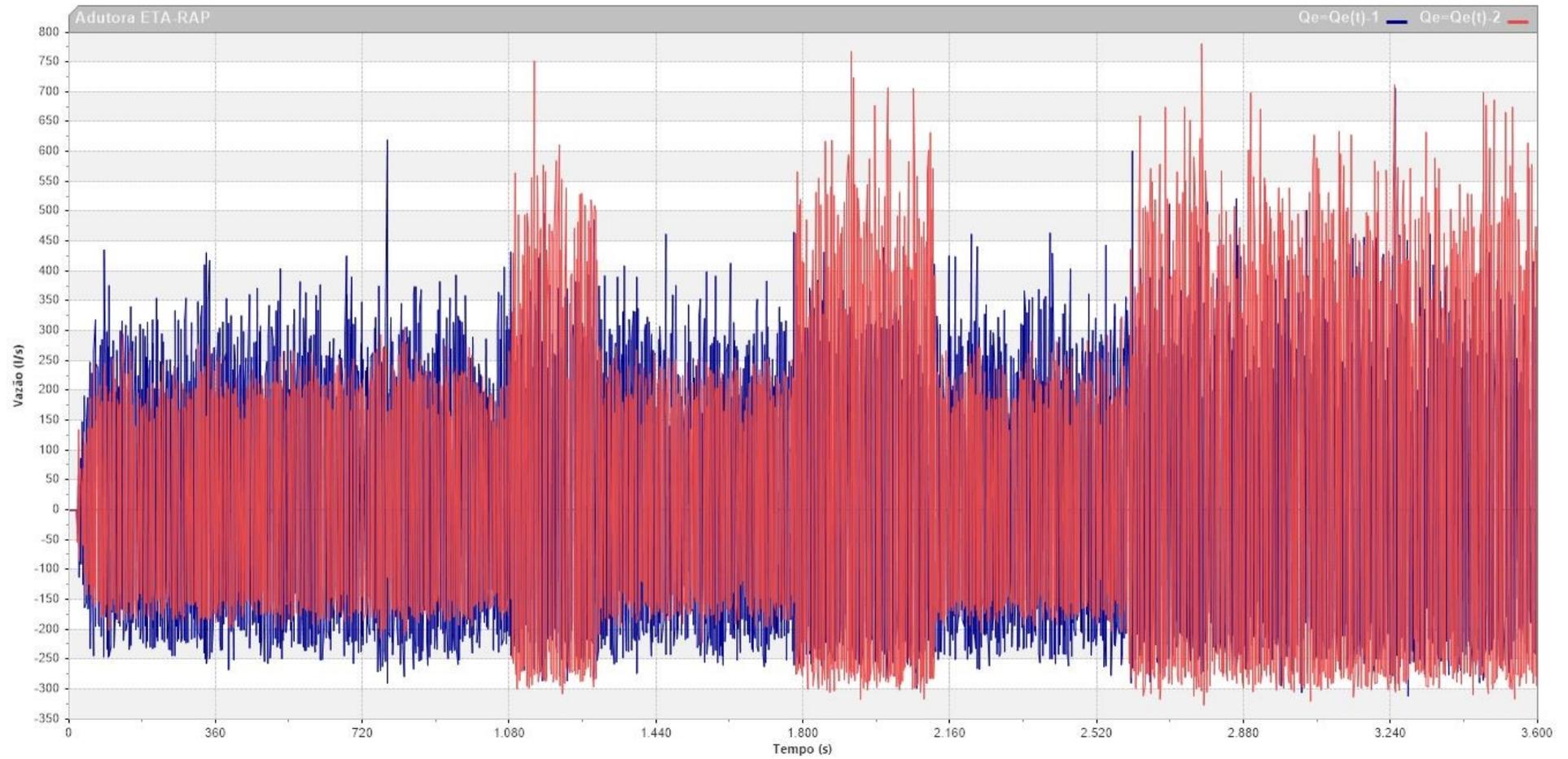
Fonte: autor

Figura 107 - Volume de ar admitido pelas ventosas V1 e V2



Fonte: autor

Figura 108 - Volume de ar expulso pelas ventosas V1 e V2



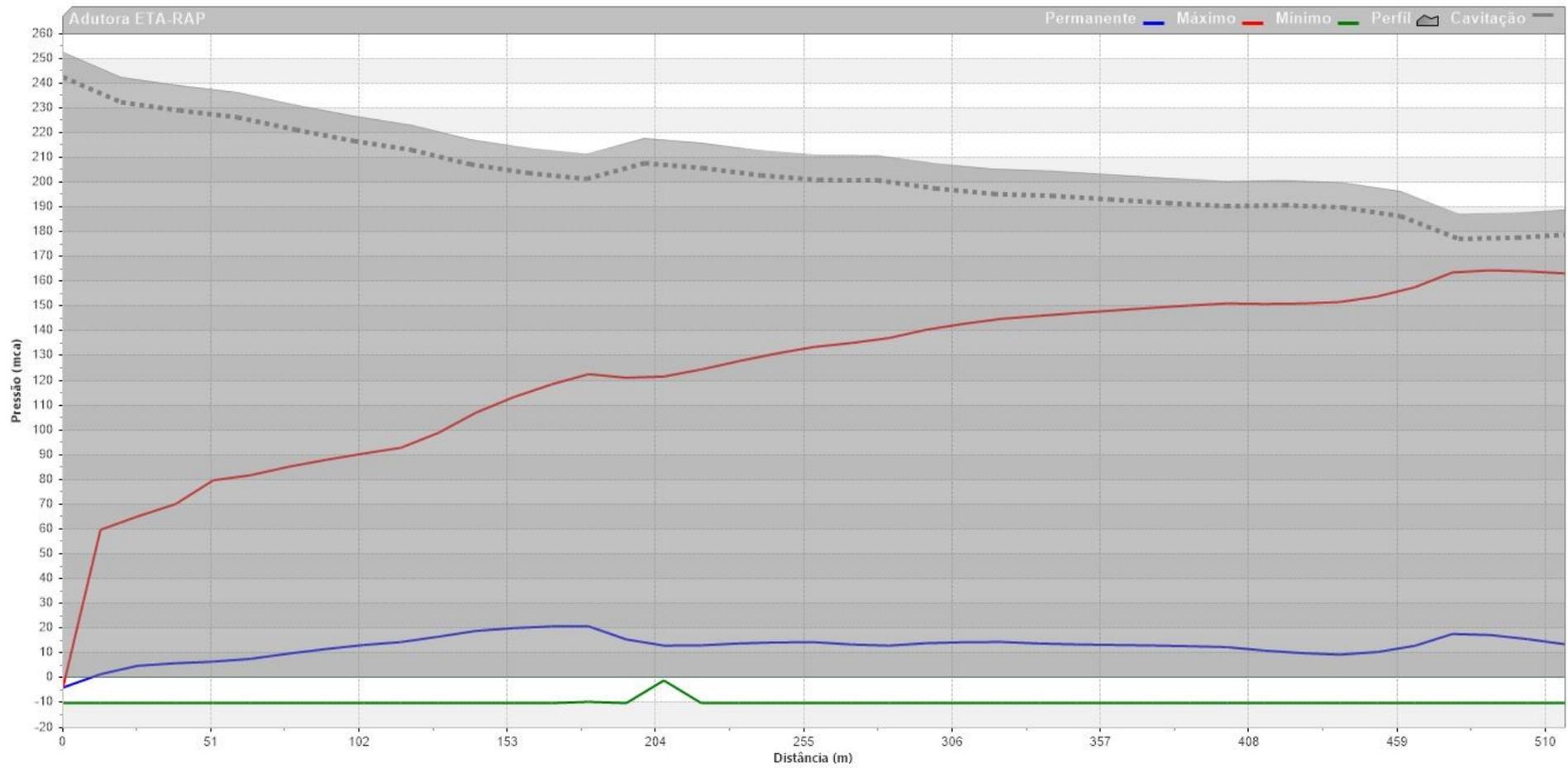
Fonte: autor

#### 6.5.4 Tubo PVC-O com dispositivo de proteção

A figura 109 mostra as envoltórias das pressões máximas e mínimas da adutora quando o material utilizado é o PVC-O. A adutora foi simulada com PVC-O DN 250 classe 16 e com um dispositivo de proteção.

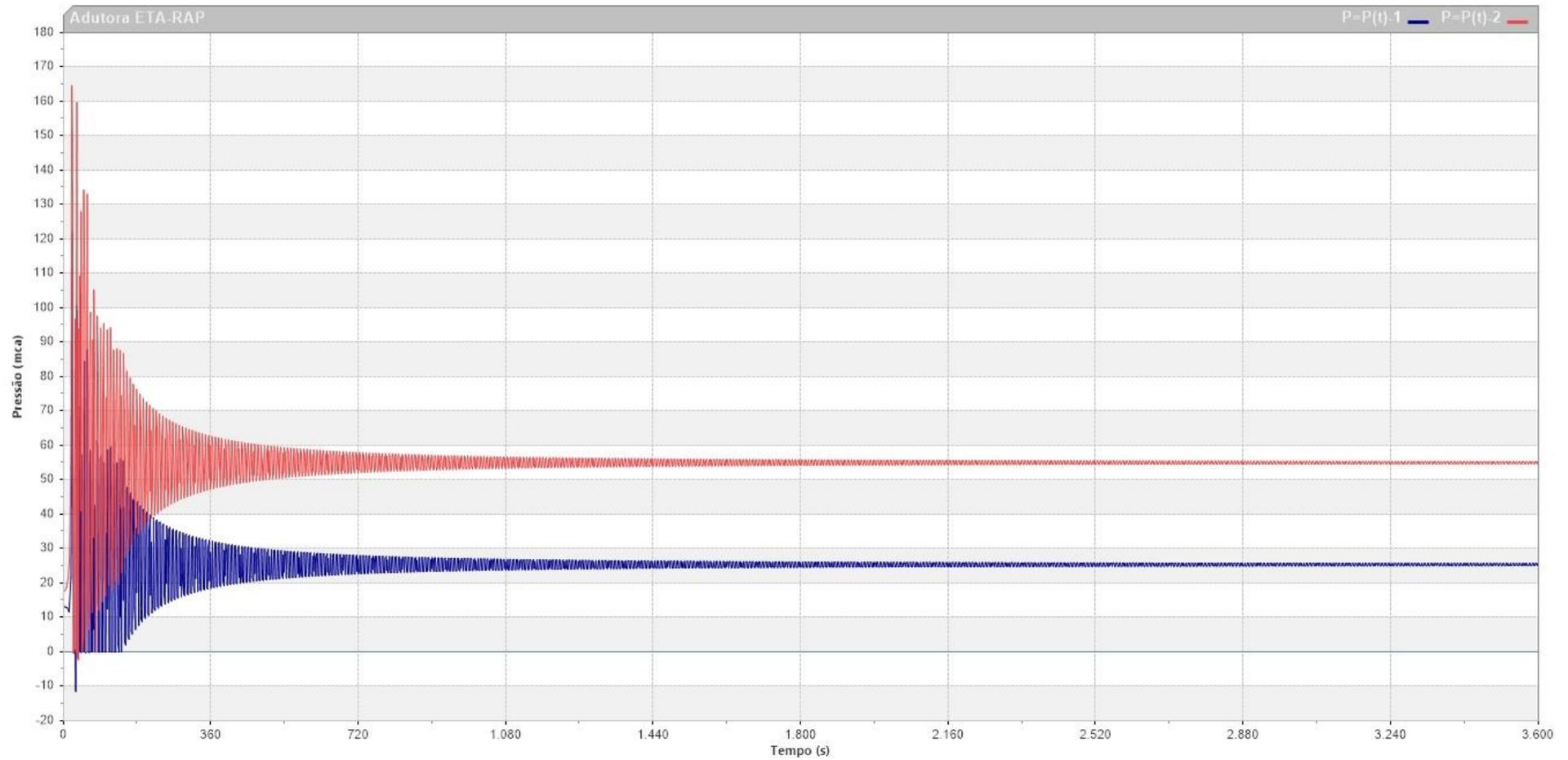
As figuras 110, 111 e 112 mostram o comportamento das ventosas em relação a pressão nas ventosas, admissão de ar, expulsão de ar respectivamente

Figura 109 - Envoltória do tubo PVC-O classe 16 DN 250 com proteção



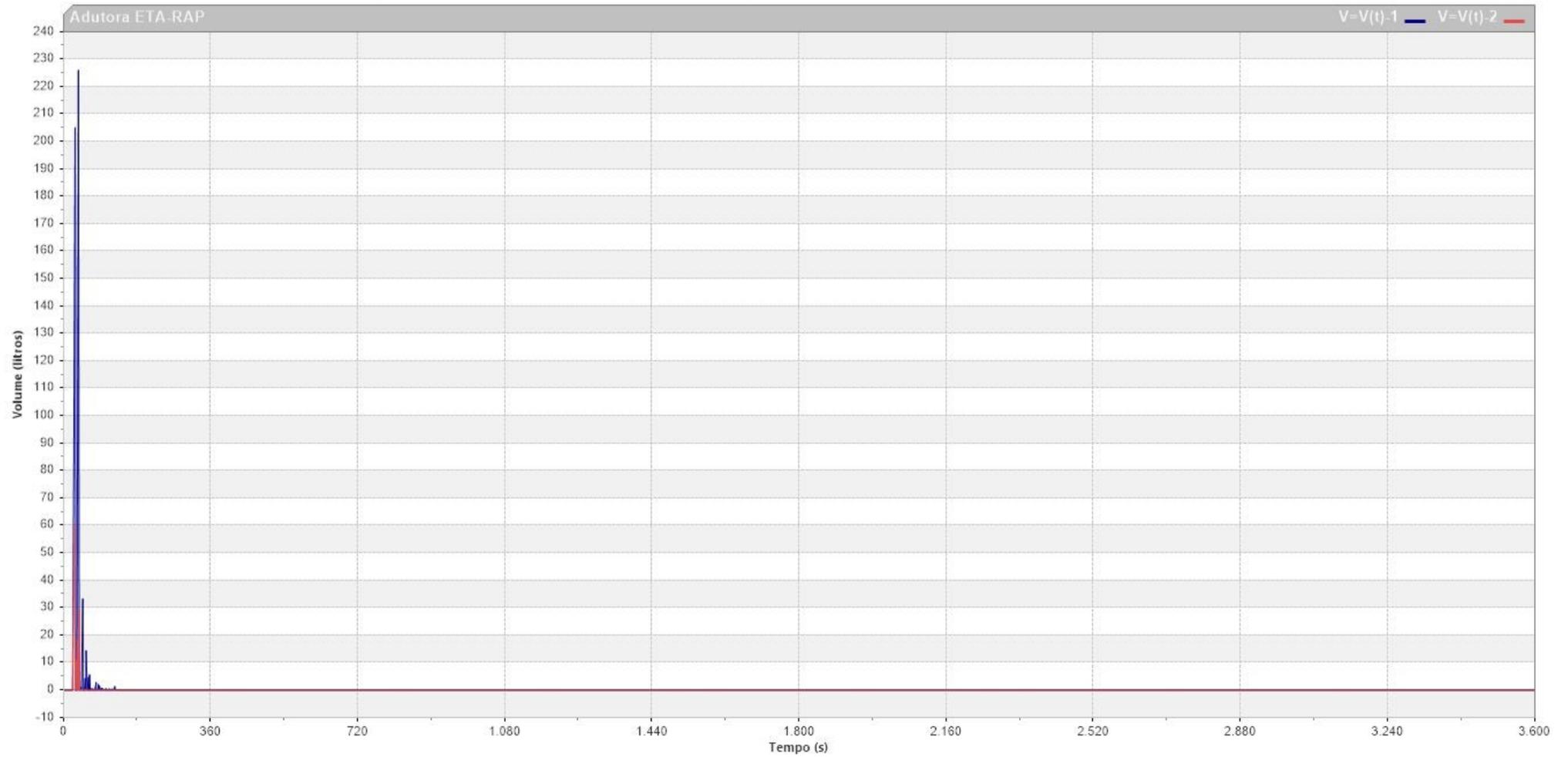
Fonte: autor

Figura 110 - Pressão nas ventosas V1 e V2 PVC-O

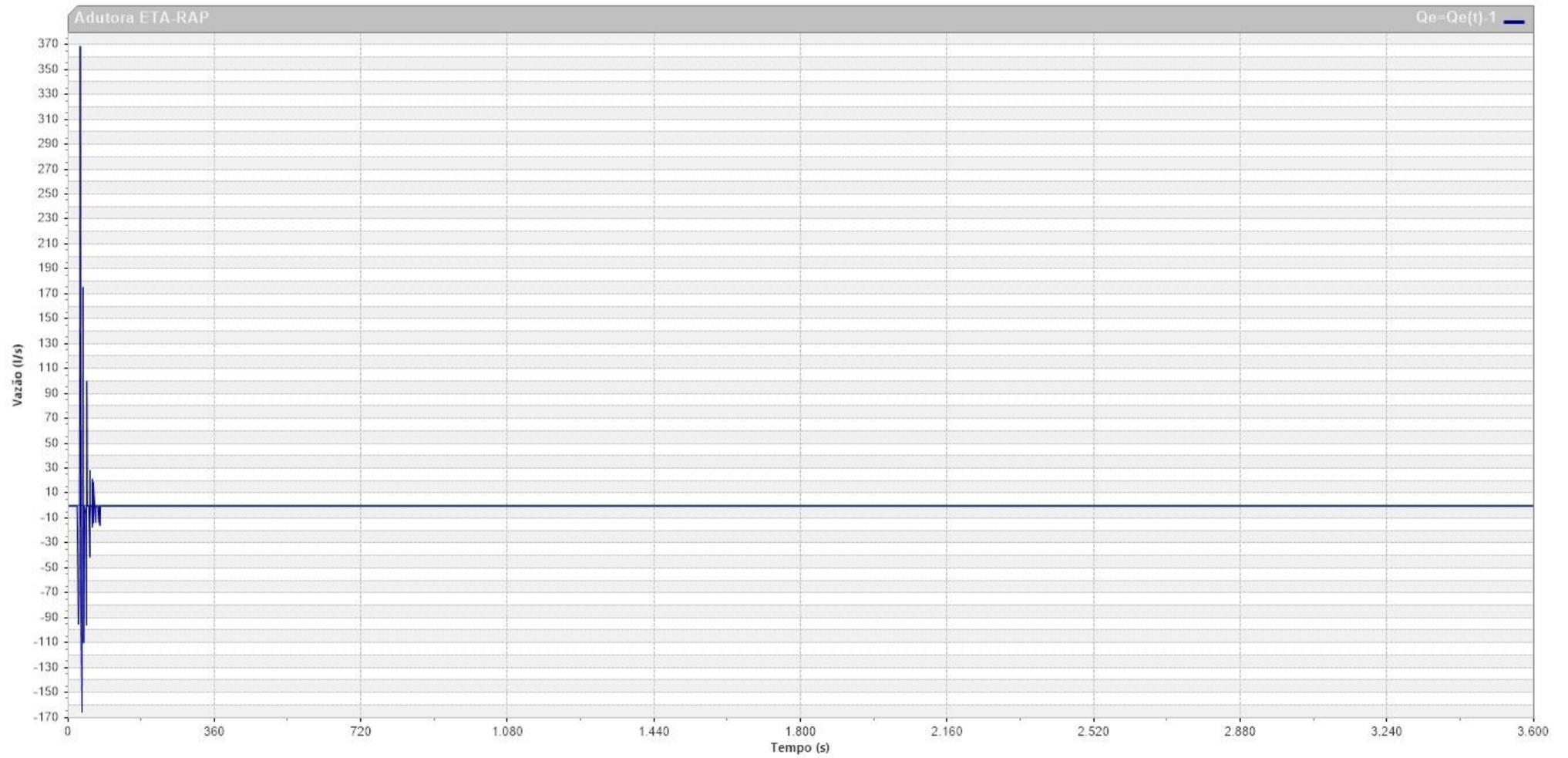


Fonte: autor

Figura 111 - Volume de ar admitido pelas ventosas V1 e V2 PVC-O



Fonte: autor

*Figura 112 - Volume de ar expulso pela ventosa V1*

Fonte: autor

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas simulações apresentadas, houve regime transitório, pois, ocorreu alteração do regime de escoamento quando a válvula gaveta foi fechada. Se o fechamento ocorrer após 60s mesmo tendo mudança de regime de escoamento provavelmente não haverá ruptura da tubulação de FOFO nem na tubulação de PVC-O, as duas instalações suportariam os transientes hidráulicos. Foram instaladas duas ventosas DN 50 de alto rendimento na tubulação de FOFO que está em operação até o momento, porém, na simulação com o tubo PVC-O não seria necessária a instalação de nenhuma ventosa, porém por segurança, foi adotada instalação de uma válvula de ar de alto rendimento para minimizar ainda mais os efeitos dos transientes hidráulicos.

A adutora em estudo foi executada em 2010, toda em Ferro Fundido mas se fosse feita hoje poderia ser executada toda em tubos PVC-O. Como mostrado na figura 94, a tubulação metálica foi assentada toda aérea, isso não é possível para tubulações em PVC pois o mesmo sofre degradação quando exposto ao Sol, para não sofrer oxidação a adutora em PVC-O poderia ser executada enterrada ou envelopada.

O tubo de ferro fundido dúctil e o tubo PVC-O possuem pontos em comum de trabalho, porém, em algumas situações somente o tubo metálico pode ser utilizando, na adutora em estudo o tubo PVC-O se existisse na época poderia ser utilizado se este fosse enterrado. Se o tubo polimérico fosse colocado hoje o custo da obra seria cerca de 10% menor.

A simulação computacional comparou o comportamento mecânico e hidráulico do tubo em FOFO frente ao tubo PVC-O. As variáveis estudadas foram a subpressão e a sobrepressão que são as mais importantes quando um fluido está em regime transitório e da ocorrência do Golpe de Aríete.

A simulação foi realizada levando em conta o fenômeno da cavitação, com isso está mais próxima da realidade da operação, que é o fluido bifásico (água e ar) sendo deslocado no interior da adutora. Nos gráficos 102, 103 e 104 que mostram a pressão nas ventosas, a admissão de ar e a expulsão de ar no dispositivo de proteção está muito bem representado que utilizando o material metálico nos tubos as ventosas

trabalham de forma constante e intensa, por outro lado, com o material polimérico o trabalho da ventosa ocorre praticamente no início do regime transitório.

Para o tubo FOFO K7 sem dispositivo de proteção, a sobrepressão máxima atingida na simulação é de 560 mca (5,49 MPa) que está acima da Pressão Serviço de Admissível (PSA) suportada pelo tubo K7 que é 5,2 MPa, porém está um pouco abaixo da Pressão de Teste Admissível (PTA) que é de 5,7 MPa. Como a pressão máxima simulada está um pouco abaixo da PTA, ou seja, trabalhando próximo ao seu limite de segurança muito provavelmente ocorrerá quebra da tubulação provocado por fadiga no material. A subpressão máxima atingida na simulação é de 25 mca (0,25 MPa) que está muito abaixo da Pressão Máxima de Serviço (PMS). Sendo 1 MPa igual a 101,97 mca.

Para o tubo PVC-O sem dispositivo de proteção, a sobrepressão máxima atingida na simulação é de 165 mca. (1,61 MPa) que está praticamente igual a Pressão Máxima de Serviço (PMS) suportada pelo tubo classe 16 que é 1,6 MPa. A subpressão máxima atingida na simulação é de 10 mca (0,098 MPa) que está muito abaixo da Pressão Máxima de Serviço (PMS) suportada pelo tubo classe 16 que é 1,6 MPa. Portanto, mesmo sem dispositivo e proteção o tubo PVC-O suporta a pressão provocada pelos transientes hidráulicos.

Para o tubo FOFO K7 com dispositivo de proteção, a sobrepressão máxima atingida na simulação é de 330 mca. (3,24 MPa) que não está acima da Pressão Máxima de Serviço (PMS) suportada pelo tubo K7 que é 5,2 MPa. Como a pressão máxima simulada está abaixo da PMS, ou seja, trabalhando com folga em relação ao limite de segurança muito provavelmente não ocorrerá quebra da tubulação por pressão excessiva nem por fadiga.

Alguns autores como Boulos *et al* (2005), Lee *et al* (2012) e Rezaei, Ryan e Stoianov (2015), estudaram a fadiga, a cavitação e a vibração em sistemas de distribuição de água, principalmente os provocados por transientes hidráulicos. Analisando suas causas, efeitos e consequências.

Para o tubo PVC-O com dispositivo de proteção, a sobrepressão máxima atingida na simulação é de 165 mca. (1,61 MPa) que está praticamente igual a Pressão Máxima de Serviço (PMS) suportada pelo tubo classe 16 que é 1,6 MPa. A subpressão máxima atingida na simulação é de 10 mca (0,098 MPa) que está muito abaixo da Pressão Máxima de Serviço (PMS) suportada pelo tubo classe 16 que é 1,6 MPa. Portanto, mesmo sem dispositivo de proteção o tubo PVC-O suporta a pressão provocada pelos transientes hidráulicos. Como não houve mudança na sobrepressão e sim na subpressão não é necessário instalar uma ventosa mas é recomendado pela boa prática de operação.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A adutora que está em operação desde 2010 toda em FOFO K7 DN 250 foi projetada hidráulicamente para atender a demanda da população do município de Limoeiro/PE, sem nenhuma análise para combater ou atenuar os transientes hidráulicos. A simulação para o regime transitório desta tubulação apresenta que a mesma não entraria em colapso por não ter nenhum dispositivo de segurança instalado, porém o fluido poderá ter um comportamento turbulento, com muito ar dissolvido e com isso poderá provocar cavitação e abrasão excessiva no revestimento interno e com isso uma diminuição da vida útil do material.

Mesmo a pressão de serviço simulada estando muito próxima da pressão de serviço do material, a tubulação está todo o tempo sendo exigida no seu limite mecânico, poderá romper por fadiga por stress.

O tubo PVC-O começou a ser comercializado no Brasil em 2014, na época do projeto e execução da adutora não era possível o seu emprego, sendo um material polimérico poderá ter um comportamento mecânico diferente de um material ferroso. Para se atestar esta possível diferença foi simulada a mesma adutora (perfil topográfico, vazão e diâmetro) neste material, para assim ser verificado o seu comportamento frente aos transitórios hidráulicos.

Após a simulação foi verificado que o escoamento muito provavelmente seria laminar pois não houve aumento considerável da pressão interna promovido pelo ar dissolvido. A pressão de trabalho ficou dentro do especificado para o material mesmo se houver o Golpe de Aríete. O comportamento hidráulico do PVC-O frente ao FOFO apresentou melhor resultado, principalmente a diminuição da pressão de operação e a abrasão a parte interna do tubo.

Foram realizadas 4 simulações, duas para o FOFO e duas para o PVC-O. Os tubos com e sem dispositivos de proteção, nesta simulação a ventosa foi o dispositivo utilizado pois é o de menor custo, menor manutenção e atendeu as exigências hidráulicas do regime transitório. A tubulação existente em FOFO com duas ventosas de alto rendimento foi simulada. Nos gráficos de admissão e expulsão de ar as duas

ventosas mesmo após o completo enchimento da adutora e após 3600s estariam trabalhando com pressões em volta de 40mca e com vazões de ar admitido ou expurgado na casa dos 100L/s e 250L/s respectivamente. A tubulação em PVC-O com uma ventosa de alto rendimento foi simulada. Nos gráficos de admissão e expulsão de ar o dispositivo de proteção opera somente no enchimento da adutora.

Os resultados das simulações mostram que o tubo polimérico poderia ser utilizado na adutora sem nenhum dispositivo de proteção, porém, como a boa prática da engenharia hidráulica recomenda, um ventosa de alto desempenho pode ser instalada na adutora no ponto de maior declividade, com isso diminuiria o custo de instalação.

Por ser um material que suporta maiores deformações elásticas, a adutora simulada em PVC-O tem uma celeridade de onda praticamente 3 vezes menor se comparada a adutora em ferro fundido dúctil, com isso, o próprio material do tubo absorve a propagação da onda de choque provocada pelos transientes hidráulicos. No regime transiente ocorre a mudança de energia, a cinética é transformada em sonora e elástica.

Tendo o tubo polimérico celeridade de onda 1/3 menor do que o tubo metálico e aquele tendo um coeficiente de elasticidade maior do que este, a energia cinética que pode ser menor, será transformada em energia elástica em um material cuja constante de elasticidade é muito maior, levando então a um comportamento mais de absorção de esforços do que de propagação, o que ocorre totalmente ao inverso no FOFO, pois a dureza do material, junto com sua rigidez o transforma praticamente em um condutor de vibração, esforços e ruído.

Todo projeto de adutora, seja por gravidade, seja por conjuntos elevatórios deve ser analisado e se possível simulado, é o que é exigido pela NBR12215/17 (ABNT, 2017) para prever e tentar diminuir os efeitos nocivos dos transientes hidráulicos, como ruptura das tubulações, desabastecimento, inundações e em alguns casos até perda de vidas humanas.

## REFERÊNCIAS

- A.R.I Air Valve, site [www.arivalve.com](http://www.arivalve.com), acessado em 26 de julho de 2018.
- Alvenius, Catálogo técnico. 2015.
- Amanco, Catálogo Técnico Biax, 2014.
- Anderson, A. Manabrea's Note on Waterhammer. Journal of the Hydraulics Division, 1976.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 15750 - Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro. 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12215/17 – Projeto de adutora de água, parte 1: conduto forçado. Rio de Janeiro: 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6916/81 – Ferro Fundido Nodular ou Ferro Fundido com Grafita Esferoidal. Rio de Janeiro. 1981.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9797/87 – Tubo de aço carbono eletricamente soldado para condução de água de abastecimento. Rio de Janeiro: 1987.
- AWWA - American Water Works Association C512-07 – Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves for Water and Wastewater Service. Denver/EUA. 2007.
- Barbosa, J. M. C. e Castro, M. A. H. C. Modelagem Computacional da Válvula Antecipadora de Onda como Mecanismo de Alívio. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 19 n.2 –Abr/Jun 2014, 101-114.
- Barbosa, J. M. C.; Castro, M. A. H. e Ferreira, F. E. F. R. Avaliação de modelos de atrito variável em transientes hidráulicos. Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, volume 36. 2015.

Boulos, P. F.; Karnet, B. W.; Lingireddy, S. Hydraulic Transient Guidelines for protecting water distribution systems. Journal AWWA. 2005. 12p.

Callister., W. D. Ciência e engenharia de materiais uma introdução. LTC. 7ª edição, 2007.

Camargo, L. A. O Golpe de Aríete em condutos. Análise pelo método das características. XVI Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica Tubos e Conexões Tigre S.A. Joinville. 1991. 44p.

Castro, M. A. H.; Santos, R. M. N. Modelagem Computacional do Golpe de Aríete em Adutoras. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, 16 p.

Chaudhry, M. H. Applied Hydraulic Transients. 3ª edição. New York, EUA. 2014.

Congresso ABES Fenasan. 2017.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Diagnóstico do Município de Limoeiro. 2005. 20p.

Danieletto, J. R. B. Manual de tubulações de polietileno e polipropileno. Ed. Linha Abert. 2ª edição. 2007.

Figueiredo, M. M. P.; Choque Hidráulico em condutas elevatórias. Proteção com reservatórios de ar comprimido. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1990.

IBGE. Site <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/limoeiro/panorama>, acessado em 20 de junho de 2018.

Instituto do PVC. <http://pvc.org.br> acessado em 05 de julho de 2018.

ITA – Instituto Tecnológico del Agua, Universitat Politècnica de València. Manual Técnico V 1.0.1. 2010. 108 p.

Jindal Saw, Catálogo técnico comercial. 2016.

Lee, J.; Lohani, V. K.; Dietrich, A. M.; Loganathan, G. V. Hydraulic transientes in plumbing systems. IWA - Water Science & Technology: water supply. 2012, 11p.

Lopes, R. B. V. Tese de doutorado Análise do fenômeno de choque hidráulico numa estação elevatória de águas residuais. Modelação e Análise de funcionamento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2016.

Magalhães, C. H. M. Estudo comparativo entre tubo de ferro fundido dúctil (FOFO) e de policloreto de vinila orientado (PVC-O). XII SRHNE (Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste). 2016.

Magalhães, C. H. M. Estudo de transientes hidráulico em uma adutora de Policloreto de vinila orientado (PVC-O). 13º Silusba 2017.

Manual de boas práticas da ABPE, 2013

Mapas do Brasil site <http://www.mapas-brasil.com/pernambuco.htm>, acessado em 28 de julho de 2018.

Netto, A.. Manual de Hidráulica. 9ª edição, Blucher. São Paulo/SP. 2015.

Norma Técnica Sabesp, NTS-042. Sabesp. São Paulo. 1999.

Politejo, Catálogo técnico Biomundial. 2014.

Porto, R. M. Hidráulica básica. 4ª edição. São Carlos/SP. 2006.

Rezaei, H.; Ryan. B. e Stoianov, I. Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015. 2015, 10p.

Rodolfo, A., Nunes, L. R. e Ormanji, W. Tecnologia do PVC. Braskem. São Paulo/SP. 2006.

Salete, E.; Notas de Aula. Disponível em [https://docs.google.com/presentation/d/1iv7c5gXjoU9c5MG9B67MiHkKXA0T6e\\_yI9zwzRNldA/htmipresent?hl=es](https://docs.google.com/presentation/d/1iv7c5gXjoU9c5MG9B67MiHkKXA0T6e_yI9zwzRNldA/htmipresent?hl=es). Acessado em 20 de junho 2018.

Santos, R. M. N. e Castro, M. A. H. Modelagem computacional de transientes hidráulicos em sistemas de recalque. 2018. 16p.

Silva, P. A. M.; França, A. G.; Pêpe, F. V. P. Análise comparativa entre materiais de tubulação para construção de redes adutoras de água. Congresso ABES – FENASAN. 2017.

Souza, N. S. Apostila de acionamentos elétricos. IFRN. 2009.

Streeter, V. L. e Wylie, E. B. Fluid Transientess. McGraw-Hill. 1978.

Telles, P. C. S. Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem. LTC. 10ª edição. 2012.

Tenaris CONFAB. Catálogo técnico comercial. 2003.

Tigre, Catálogo Infraestrutura. 2011.

VAG. Spring Loaded Air Valve 2015.13p

Valloy site [www.valloy.com.br](http://www.valloy.com.br) acessado em 26 de julho de 2018.

Viagem de férias site <http://www.viagemdeferias.com/mapa/pernambuco>, acessado em 28 de julho de 2018.

Vianna, M. R. e Neto, M. R. V. Emprego de tanques alimentadores bidirecionais (TAB) para atenuação das cargas transitórias em adutora por recalque composta por diversos trechos em série e em paralelo: estudo de caso. XVII Silubesa, 2016.

Vianna, M. R. e Neto, M. R. V. Reservatórios hidropneumáticos para a proteção de adutoras por recalque em sistemas de abastecimento de água: estudo de dois casos.

Wu, D.; YAng, S.; Wu, P.; Wang, L. MOC-CFD Coupled Approach for the Analysis of the Fluid Dynamic Interaction between Water Hammer and Pump. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 141, n. 6, Jun, 2015.