

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**SIMULAÇÃO DE TRANSIENTE HIDRÁULICO E COMBINAÇÃO
ECONÔMICA DA ADUTORA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO
DO MUNICÍPIO DE TORRINHA - SP**

MARCOS JORGE ASSUMPÇÃO SCHIMIDT

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP

Maio – 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**SIMULAÇÃO DE TRANSIENTE HIDRÁULICO E COMBINAÇÃO
ECONÔMICA DA ADUTORA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO
DO MUNICÍPIO DE TORRINHA - SP**

MARCOS JORGE ASSUMPÇÃO SCHIMIDT

Orientador: Prof. Dr. João Luis Zocoler

Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP

Maio – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO- BOTUCATU (SP)

S354s Schimidt, Marcos Jorge Assumpção, 1959-
Simulação de transiente hidráulico e combinação econômica da adutora para abastecimento público do município de Torrinha - SP / Marcos Jorge Assumpção Schimidt. - Botucatu : [s.n.], 2016
x, 82 f.: ils. color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2016
Orientador: João Luis Zocoler
Coorientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román
Inclui bibliografia

1. Abastecimento de água nas cidades - Torrinha - SP.
2. Bombeamento de água - Torrinha - SP - Projetos - Avaliação. 3. Recursos d'água - Desenvolvimento - Custo - benefício. 4. Tubulações - Viabilidade econômica. 5. Escoamento urbano. I. Zocoler, João Luis. II. Sánchez Román, Rodrigo Máximo. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

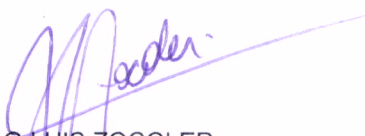
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SIMULAÇÃO DE TRANSIENTE HIDRÁULICO E COMBINAÇÃO
ECONÔMICA DA ADUTORA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO DO
MUNICÍPIO DE TORRINHA - SP

AUTOR: MARCOS JORGE ASSUMPÇÃO SCHIMIDT

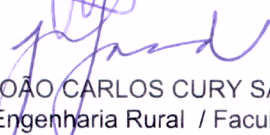
ORIENTADOR: JOAO LUIS ZOCOLER

CO-ORIENTADOR: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA
(IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO LUIS ZOCOLER

Depto de Engenharia Rural / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD

Depto de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP


Prof. Dr. MARCONI BATISTA TEIXEIRA

Depto de Agronomia / Instituto Federal Goiano - Câmpus Rio Verde

Botucatu, 02 de maio de 2016

Dedico,
A minha esposa Lucelena
e aos meus filhos Ana Paula e Marcos Felipe.

AGRADECIMENTOS

A minha amada família sempre presente, me dando todo amor e apoio.

Aos meus orientadores, Professor Doutor João Luiz Zocoler e Professor Doutor Rodrigo Máximo Sánchez Román, pelo incentivo, atenção e dedicação.

A SABESP na pessoa do Engenheiro Mário Eduardo Affonseca Pardini que proporcionou a realização desse projeto, permitindo o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos amigos que fiz durante o curso e que me apoiaram durante todas as etapas dessa fase.

A Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu e ao Programa de Pós-graduação em Irrigação e Drenagem pelo sistema de ensino de excelente qualidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
4.1 Abastecimento de água	8
4.2 Transiente hidráulico	11
4.3 Principais consequências dos transientes.....	17
4.3.1 Pressão máxima e pressão mínima no sistema.....	17
4.3.2 Condições de Vácuo.....	17
4.3.3 Cavitação	19
4.3.4 Separação da Coluna Líquida.....	19
4.3.5 Vibrações.....	20
4.3.6 Qualidade da Água	23
4.4 Equações para o cálculo do transiente hidráulico	23
4.5 Estudo dos transientes hidráulicos no saneamento	25
4.6 Regime permanente	26
4.7 Regime transitório	26
4.8 Método das características	27
4.8.1 Equação do movimento	28
4.8.2 Equação da continuidade	29
4.9 Dispositivo de proteção – RHO	35
5 MATERIAL E MÉTODOS	42
5.1 Localização	42
5.2 Caracterização do sistema de captação.....	42
5.3 Programa Allievi.....	49
5.4 Simulação	51
5.4.1 Tempo de simulação para determinação dos transientes mínimo e máximo.	52
5.4.2 Celeridade.....	52
5.4.3 Conjunto moto bomba.....	54

5.4.4 Dispositivo de proteção	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
6.1. Simulação 2 –S2	61
6.2. Simulação 3 –S3	64
6.3. Simulação 4 –S4	65
6.4. Simulação 5 –S5	67
7 CONCLUSÕES	79
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes de um sistema de abastecimento de água.	9
Figura 2. Representação das etapas físicas do processo de tratamento de água para consumo público.	11
Figura 3. Representação do transiente decorrente do fechamento de uma válvula em um ponto X à montante da mesma.	14
Figura 4. Fases do golpe de aríete provocado por fechamento instantâneo de uma válvula em um sistema formado por um reservatório, tubo e válvula, a partir de um regime permanente inicial.	16
Figura 5. Resultado de golpe de aríete na tubulação de recalque da bomba bipartida.	18
Figura 6. Resultado de golpe de aríete com subpressão na tubulação de aço, Índia.	18
Figura 7. Resultado de golpe de aríete com subpressão na linha de adução.	19
Figura 8. Resultado de golpe de aríete devido à vibração da tubulação em contato com a parede da casa de bombas.	20
Figura 9. Registro de parada de ferro fundido, diâmetro 400 mm com vazamento após golpe.	21
Figura 10. Detalhe 1: trinca registro de parada.	21
Figura 11. Detalhe 2: trinca registro de parada.	22
Figura 12. Detalhe 3: trinca bloco de ancoragem do registro de parada.	22
Figura 13. Detalhe 4: Trinca no bloco de ancoragem e vazamento no flange do registro de parada.	23
Figura 14. Diagrama do sistema para dedução da equação do movimento.	28
Figura 15. Diagrama do sistema para dedução da equação da continuidade.	30
Figura 16. Malha de cálculo para o método das características.	33
Figura 17. Componentes de um reservatório hidropneumático com bexiga (RHO).	36
Figura 18. Componentes de um reservatório hidropneumático com bexiga (RHO) para esgotos. Fonte ARI.	37
Figura 19. Operação do RHO com bexiga.	38
Figura 20. Comparação de RHO tradicional e com bexiga.	39
Figura 21. Operação do RHO do fabricante BERMAD.	39
Figura 22. Operação do RHO do fabricante A.R.I.	40
Figura 23. Detalhe: bexiga não inflada no interior do RHO.	40
Figura 24. Detalhe da bexiga inflada.	41
Figura 25. Detalhe do modelo de RHO Hydroball.	41
Figura 26. Esquemático da estação elevatória de água tipo “Q”, padrão SABESP.	43

Figura 27. Caminhamento da adutora, sendo GMB – grupo moto bomba; A.A.B. –	43
Figura 28. Perfil do caminhamento da adutora (alto recalque).	44
Figura 29. Curva da bomba.	45
Figura 30. Perfil linearizado do caminhamento feito no programa Allievi: i) Poço sucção – elemento reservatório que no caso é de montante; ii) CR – elemento reservatório de jusante; iii) Ni – elemento nó, o qual o programa atribui uma determinada denominação e interliga dois outros elementos e também determina os pontos de inflexão da linha e mudança de material e diâmetro, quando for o caso; iv) Ti – elemento tubulação, define material, extensão, diâmetro e espessura; v) Bi – elemento estação de bombeamento (GMB); vi) Ci – elemento reservatório hidropneumático.	47
Figura 31. Assistente para cálculo da celeridade para trecho com tubulação de ferro fundido diâmetro interno de 263 mm, espessura da parede de 5,5 mm.	54
Figura 32. Assistente para digitação ou cálculo do momento de inércia do GMB pelo programa.	55
Figura 33. Assistente para configuração de funcionamento do GMB.....	56
Figura 34. Assistente para configuração do elemento de proteção.	57
Figura 35. Assistente de cálculo da pressão inicial da bexiga do RHO.	58
Figura 36. Cota piezométrica no regime permanente.....	61
Figura 37. Comportamento do Grupo moto bomba (GMB): vazão e pressão ou altura manométrica (a); e potência e rotação (b).	62
Figura 38. Comportamento da vazão no reservatório de jusante.	63
Figura 39. Simulação 2: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.	63
Figura 40. Simulação 3: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.	65
Figura 41. Simulação 4: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.	66
Figura 42. Simulação 5: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.	68
Figura 43. Comportamento das variáveis água e ar no reservatório hidropneumático (RHO).	68
Figura 44. Variação do nível da linha d'água no reservatório hidropneumático (RHO)...	69
Figura 45. Comportamento da pressão no reservatório hidropneumático (RHO).	69
Figura 46. Comportamento da pressão no reservatório hidropneumático (RHO).	70
Figura 47. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 195 segundos.	70
Figura 48. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 500 segundos.	71
Figura 49. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 1.000 segundos.	71
Figura 50. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 2.000 segundos.	71
Figura 51. Partida do GMB.	72

Figura 52. Pressão máxima no regime permanente (linha verde).	73
Figura 53. Pressão de trabalho no regime permanente estabilizada (linha azul).....	73
Figura 54. Início do transiente com o desligamento do GMB, queda da linha azul.	74
Figura 55. Linha de pressão 950 milésimos de segundos após o início do transiente.	74
Figura 56. Linha de pressão 2 segundos após o início do transiente (linha azul).	75
Figura 57. Linha de pressão 3 segundos após o início do transiente.....	75
Figura 58. Linha de pressão 6,500 segundos após o início do transiente chegando ao final da adutora.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados operacionais do grupo motobomba.....	44
Tabela 2. Comparativo de custos entre 4 diâmetros possíveis para a tubulação de recalque.	46
Tabela 3. Dados topográficos e da adutora utilizados nas simulações.	48
Tabela 4. Materiais das tubulações e parâmetros para cálculo da Celeridade (a).	54
Tabela 5. Cota do terreno (CT), carga piezométrica (CP) e pressão em cada Nó.	60
Tabela 6. Vazão (Q), velocidade (V), fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach (f) e perda distribuída na tubulação (h) nas tubulações.....	60
Tabela 7. Vazão (Q), altura manométrica (H), potência e rendimento do GMB.	61
Tabela 8. Simulação 2 - Pressões máximas e mínimas com tubos de ferro fundido sem elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.	62
Tabela 9. Simulação 3 - Pressões máximas e mínimas com tubos de PVC-O sem elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.	64
Tabela 10. Simulação 4 - Pressões máximas e mínimas com tubos de PVC-O com RHO como elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.	66
Tabela 11. Simulação 5 - Pressões máximas e mínimas com tubos de Ferro fundido e PVC 12 DeFoFo com RHO como elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.....	67
Tabela 12. Comparação de pressões máximas e mínimas entre as opções de formatação da linha de tubos.....	77
Tabela 13. Preço da tubulação.	77
Tabela 14. Comparativo de investimento da tubulação conforme as simulações propostas.	77

1 RESUMO

O abastecimento público é um dos grandes desafios das autoridades em prover a sociedade com água de qualidade e em quantidade. O aumento da demanda por este recurso natural exige projetos de captação e transporte cada vez maiores e mais complexos. Um projeto hidráulico deve ser concebido para operar sob condições normais de escoamento e também sob condições extremas, causadas por agentes externos que possam gerar pressões muito maiores ou muito menores às condições ideais de funcionamento.

Este trabalho teve por objetivos definir o desenho de bombeamento público para o abastecimento da cidade de Torrinha, município do Estado de São Paulo; determinar qual alternativa de combinação de tubulações é a melhor solução hidráulica e econômica; e verificar a necessidade e definir a proteção contra transiente hidráulico. Utilizou-se o programa Allievi para realizar as cinco simulações propostas: Simulação 1 (S1): regime permanente; Simulação 2 (S2): linha com tubos de ferro fundido sem proteção; Simulação 3 (S3): linha com tubos de PVC-O sem proteção; Simulação 4 (S4):

linha com tubos de PVC-O com proteção; Simulação 5 (S5): linha com tubos de ferro fundido e de PVC-12 DeFoFo com proteção.

A partir dos resultados concluiu-se que na simulação 5 obteve-se a melhor opção econômica e hidráulica, consistindo em construir a linha com os primeiros 3391,79 metros de tubos de ferro fundido, ponta bolsa, K7 e 3297,33 metros restantes com tubos de PVC 12 DeFoFo; e a utilização do dispositivo RHO com bexiga de 1,5 m³ de capacidade para proteção contra transiente hidráulico. As simulações S2 e S3 evidenciaram um ganho de rendimento do grupo motobomba e a opção S1 é a que mostrou a melhor combinação vazão-altura.

Palavras chaves: Transiente hidráulico, sistema de adução, projeto de bombeamento, análise econômica

TRANSIENT SIMULATION AND ECONOMIC COMBINATION OF THE PUBLIC WATER SUPPLY PIPELINE SYSTEM OF CITY OF TORRINHA - SP. Botucatu, 2016. 57 p. Master's Dissertation in Agronomy/ Irrigation and Drainage) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARCOS JORGE ASSUMPÇÃO SCHIMIDT

Supervisor: DR. JOÃO LUÍS ZOCOLER

Cosupervisor: DR. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ RÓMAN

2 SUMMARY

Provide good quality water besides following the public demand is one of the biggest challenges faced for the authorities these days, the increasing demand for this natural resource requires larger and more complexes abduction systems and distribution networks. Moreover, hydraulics projects should be projected to work at normal flow conditions but also at extreme conditions caused by external agents whom can produce much bigger or much lower pressures comparing with a ideal operation condition.

The current research aim to define a pumping project for the public supply of the city of Torrinhas in estate of São Paulo, establishing the most efficient combination of pipelines to attend the economic and hydraulics necessities, besides define the necessity and the protection against the hydraulics transient.

The research was conducted using the Allievi software to simulate five proposed settings: Simulation 1 (S1): Steady state; Simulation 2 (S2): Pipeline with cast iron pipes without protection; Simulation 3 (S3): Pipeline with PVC-O pipes without protection; Simulation 4 (S4): pipeline with PVC-O pipes with protection; Simulation 5 (S5): pipeline with cast iron and PVC-12 DeFoFo pipes with protection.

Therefore, with the present results was possible to conclude that the best economic and hydraulic option is to use cast iron hub pipes K7 in the first 3391.79

meters, and use PVC 12 DeFoFo pipes in the others 3297.33 meters, and also the utilization of the Balloon Hydro pneumatic Accumulator device with 1,5m³ of capability to guard the system against the hydraulic transient.

The settings S2 and S3 showed gains in the pump group yield while the setting S1 had the best relation between flow rate and elevation.

Keywords: Water hammer, pipelines system, pumping project, economic analysis

3 INTRODUÇÃO

O abastecimento público é um dos grandes desafios das autoridades no que tange a prover a sociedade com água de qualidade e quantidade. Com o aumento da demanda a captação de água está sendo feita cada vez mais distante dos centros urbanos.

A deterioração da qualidade da água diminui sua disponibilidade e produz efeitos negativos na economia e na saúde pública e, por isso, tem sido destacada como um dos grandes problemas a serem enfrentados no século XXI.

No Brasil, grande parte dos problemas da qualidade d'água vem da falta de saneamento básico. Somente 30% dos esgotos são tratados, impedindo o reuso e aumentando a deterioração dos recursos hídricos. Os problemas se agravam pela poluição química que adiciona metais pesados e substâncias tóxicas às águas das represas, rios e águas de abastecimento aumentando o grau de dificuldade para o tratamento e posterior consumo humano.

Não se atentou para o fato de que um manancial protegido por vegetação nativa produz água de excelente qualidade e com custo de tratamento bastante baixo (R\$ 1,00 a R\$ 3,00 por 1.000m³), especialmente se comparado com o custo de tratamento da água de mananciais deteriorados (R\$ 200,00 a R\$ 300,00 por 1.000m³) (TUNDISI, 2015).

Nos países desenvolvidos, a pesquisa científica nas universidades e institutos de pesquisa foi aplicada rapidamente para solucionar os problemas da contaminação.

No Brasil ainda são adotadas apenas as técnicas tradicionais de tratamento e há muito tempo é negligenciada a questão da qualidade da água. Quando as fontes e os mananciais de água mais próximos se deterioraram, ao invés de se investir em pesquisa e conhecimento científico para tratar, recuperar e reutilizar a água de fontes contaminadas adota-se a solução de trazer água de fontes menos poluídas, frequentemente mais distantes, exigindo investimentos em energia e infraestrutura para seu transporte (TUNDISI, 2015).

Mesmo sistemas de pequeno porte têm apresentado soluções de captações com grandes extensões de adutoras e alto desnível geométrico. O abastecimento pode ser feito por meio de captações superficiais (rios, lagos, etc.) ou captação de águas subterrâneas.

A cidade de Torrinha no Estado de São Paulo tem como operadora do sistema de abastecimento de água a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, que abastece a cidade através da captação superficial no ribeirão Pinheirinho.

A SABESP prevê novo abastecimento da cidade através de captação da água de aquíferos, para tanto perfurou um poço profundo que apresenta vazão suficiente para a desativação da captação superficial devido ao alto custo operacional do tratamento convencional podendo, contudo, tal estação ficar em estado de prontidão caso se faça necessário.

A nova captação apesar de ser subterrânea, não eliminou a necessidade de projetar e implantar um sistema adutor de porte relativamente robusto, necessitando análise do aríete hidráulico (transiente hidráulico), conforme o recomendado pela NBR 12.215.

OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve por objetivos definir o desenho de bombeamento público para o abastecimento da cidade de Torrinha, município do Estado de São Paulo; selecionar a alternativa de combinação de tubulações que apresente a melhor solução

hidráulica e econômica; e verificar a necessidade e porte do sistema de proteção contra transiente hidráulico.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Selecionar a melhor solução hidráulica e combinação de tubulações para o sistema entre 4 condições pré-estabelecidas;
- Selecionar a combinação de materiais e diâmetros para a melhor solução econômica;
- Avaliar o transiente hidráulico e verificar se o dispositivo de proteção contra o transiente (reservatório hidropneumático com bexiga) consegue atenuar os esforços, sendo utilizado para tal o programa computacional Allievi.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Abastecimento de água

Sistema de Abastecimento de Água para consumo humano é uma das ações do saneamento ambiental que, conforme a Portaria nº 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde, é constituído por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinada à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição, sob a responsabilidade do poder público, mesmo que administrada em regime de concessão ou permissão.

As primeiras obras de abastecimento de água foram feitas na Mesopotâmia e no Egito para atender as necessidades das populações e também da irrigação.

No Brasil, a cidade do Rio de Janeiro foi a primeira a ter um sistema de abastecimento de água com o primeiro poço escavado em 1591 e em 1673 com as obras de adução de água para a cidade. Em 1842 foi elaborado o primeiro projeto de adução e distribuição de água na cidade de São Paulo. (AZEVEDO NETTO, 1998).

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, em 2013 havia no Brasil 49.635.400 ligações de água, em

571.433 km de rede de água atendendo uma população de 159.964.320 habitantes. (SNIS, 2014)

São muitos os benefícios gerados por sistemas de abastecimento de água, dentre eles: controle e prevenção de doenças; implantação de hábitos higiênicos na população; facilitação da limpeza pública; facilitação das práticas desportivas; proporciona conforto, bem-estar e segurança; aumenta a esperança de vida da população; facilita a instalação de indústrias, inclusive a de turismo, e conseqüentemente ao maior progresso das comunidades (TSUTIYA, 2006).

Um sistema público de abastecimento de água pode ser dividido nas seguintes partes: manancial ou curso de água, captação, estação elevatória, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição (Figura 1).

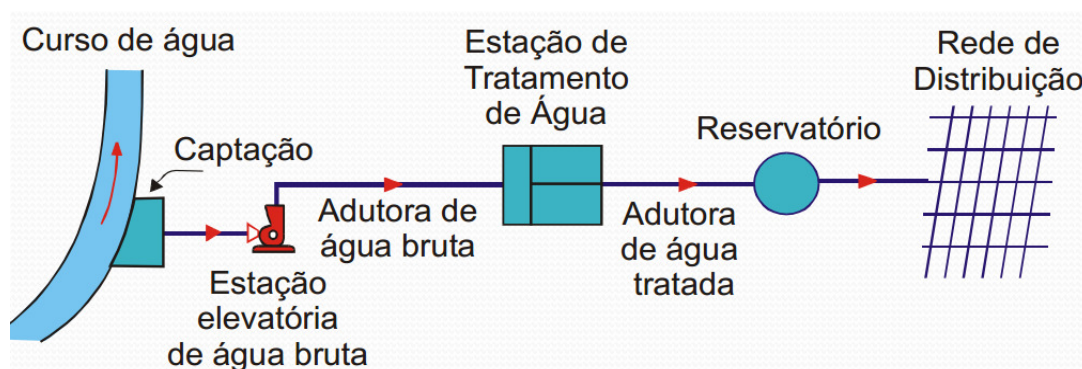


Figura 1. Partes de um sistema de abastecimento de água.

Fonte: TSUTIYA, 2006.

Manancial é o corpo de água superficial ou subterrâneo, de onde será feita a retirada de água. Quarenta e sete por cento dos municípios brasileiros são abastecidos exclusivamente por mananciais superficiais, trinta e nove por cento por águas subterrâneas e catorze por cento pelos dois tipos de mananciais (abastecimento misto) (ANA 2010).

A captação compreende o conjunto de estruturas e dispositivos construídos para retirada de água do manancial. Na estação elevatória se tem um conjunto de obras e equipamentos (bombas e tubulações) com a finalidade de recalcar a água para um ou vários pontos de consumo. É comum a existência de estações elevatórias para recalcar até o consumidor final.

Em sistemas de abastecimento de água pública a adutora recebe diferentes classificações de acordo com a qualidade do líquido recalcado, pode ser de água

bruta, água não tratada ou de água tratada. Quando o líquido é captado de rios, córregos é necessário que haja uma adequação para o consumo humano, isso se dá em um local chamado estação de tratamento de água.

Esse tratamento é feito em oito etapas: Na primeira etapa é adicionado o cloro na água para facilitar a retirada de matéria orgânica e metais. Essa etapa é denominada de pré-cloração.

Na segunda etapa haverá o ajuste do pH (potencial hidrogeniônico) adicionando cal ou soda, essa fase é denominada de pré-alkalinização.

Na terceira etapa, são adicionados sulfato de alumínio, cloreto férrico ou outro coagulante, com o objetivo de desestabilização elétrica das partículas de sujeira isso acontece com uma violenta agitação da água facilitando assim sua agregação, etapa denominada coagulação.

A quarta etapa denominada floculação ocorre quando os produtos fazem com que as impurezas se aglutinem formando flocos para facilitar a sua remoção.

Na etapa cinco ocorre a Decantação, a sujeira é mais pesada que a água e se depositam no fundo do decantador.

Na etapa seis a água é filtrada retirando suas impurezas menores por camadas filtrantes de areias e antracito, essa fase é denominada filtração.

Etapa sete é a cloração, onde é aplicado cloro numa quantidade que garanta a destruição de micro-organismos e que a água contenha um certo teor desse elemento após deixar a estação.

A etapa oito é a fluoretação, processo esse que se dá por meio da aplicação do elemento químico flúor que tem por objetivo a prevenção da incidência de cárie dentária na população.

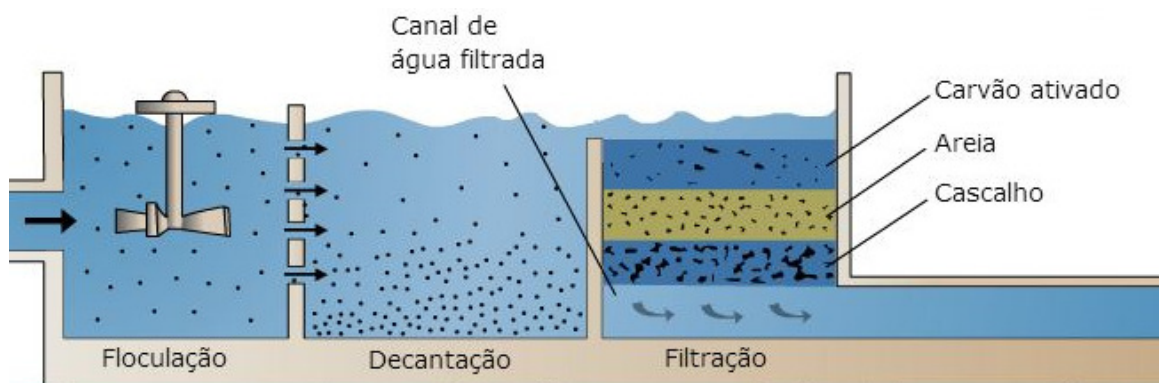


Figura 2. Representação das etapas físicas do processo de tratamento de água para consumo público.

Fonte: SABESP.

O reservatório é o elemento que permite armazenar a água possibilitando a regularização entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição.

A rede de distribuição é formada por tubulações e acessórios que tem por finalidade disponibilizar a água aos consumidores finais de forma contínua, em quantidade adequada e pressão suficiente.

Projetos de sistemas de abastecimento devem ser dimensionados com base em muito estudo, uma vez que envolvem muitos aspectos e se mal projetados e/ou operados podem causar prejuízos incalculáveis. Atualmente os recursos da informática, de modelos matemáticos e equipamentos de controle somados à mão de obra capacitada têm facilitado e melhorado o trabalho dos projetistas.

4.2 Transiente hidráulico

Transiente hidráulico (popularmente chamado de golpe de aríete) pode ser definido como fenômeno correspondente à variação de velocidade e de pressão de um fluido que ocorre dentro de tubulações, quando as condições de escoamento são alteradas pela variação da descarga e é caracterizado por ocorrer entre dois regimes de escoamento permanentes (WYLIE; STREETER, 1979).

Em sistemas de captação e distribuição de água é comum a utilização de sistemas de controle de fluxo, tais como a abertura e fechamento de válvulas

ou partidas e paradas de bombas. Quando essas operações são realizadas de maneira incorreta podem gerar os transientes hidráulicos (AMOA; ELBASHIR, 2007).

Pode-se examinar o fenômeno do transiente hidráulico a partir de um sistema simples, composto por uma caixa d'água à montante, com uma determinada elevação a sua jusante no qual existe uma válvula de saída, à medida que a válvula vai sendo fechada irá ocorrer um aumento de pressão sobre a mesma até que essa esteja totalmente fechada e nesse instante a porção de fluido próxima à válvula estará parada. Porém, devido às compressibilidades do fluido e dilatações da tubulação existirá ainda uma movimentação desse fluido desde à montante até que a pressão atinja seu ápice e todo o fluido esteja totalmente comprimido na tubulação e essa totalmente dilatada. A partir desse instante todo o fluxo e energia acumulada são novamente convertidos em movimento e o fluxo se dá no sentido oposto agora com direção à montante, sendo que a pressão dentro da tubulação é a mais baixa possível, ocasionando na maioria das vezes o esmagamento da tubulação. O fenômeno então se repete, comprimindo novamente toda a linha até a válvula, provocando um movimento oscilatório até que todas as dissipações de energia amortecem essa movimentação e o fluido esteja completamente parado.

O fechamento rápido de uma válvula converte a energia cinética de um fluido em movimento no sentido contrário ao movimento inicial se transformando em energia de pressão que provoca “deformação” nas paredes dos tubos, gerando um “pulso de onda” de pressão anormal que viaja a partir do ponto de fechamento. O som que algumas vezes é gerado pelo fenômeno (golpe de aríete) indica que a energia cinética originária do movimento do fluido não é convertida somente em energia de deformação, como também em energia sonora. Esta energia sonora, bem como outras fontes de perda de energia (inclusive perdas por atrito), faz com que as ondas de pressão dos transientes gradualmente diminuam até que se atinjam novas condições de escoamento em estado permanente (BOULOS et al., 2005).

O termo “golpe de aríete” é usado como sinônimo do transiente hidráulico quando se consideram, no equacionamento do fenômeno, a elasticidade da tubulação e a compressibilidade do líquido. Quando estes dois fatores são desprezados diz-se que situação transitória corresponde a uma oscilação de massa (KOELLE, 1992). Para o caso do fechamento de válvulas, quando a alteração é gradual, a análise pode ser feita da mesma maneira que para oscilações de massa, admitidos o líquido incompressível e o conduto rígido (WYLIE; STREETER, 1979). Neste caso, a onda de alta pressão ao atingir

a extremidade do conduto é defletida e quando retorna cancela a onda subsequente que se move em sentido contrário, conforme explica Tsutiya (2006).

Este processo de fechamento da válvula é chamado de manobra lenta. Por outro lado, quando ocorre uma mudança brusca na abertura da válvula, a vazão também sofre alteração repentina, ocasionando uma onda de pressão que se propaga na tubulação à montante da válvula, e esta onda de pressão atua de forma a reduzir a velocidade do escoamento.

Analogamente, à jusante do local da manobra ocorre uma redução de pressão, que também reduz a velocidade do escoamento. Segundo Streeter (1979), para ambos os casos, a onda de pressão propaga-se com celeridade “a” (velocidade de onda sonora). Quando se trata de sistemas de água, normalmente denominam-se os fenômenos transientes de golpes de aríete, devido ao som de pancadas que se pode ouvir na tubulação por conta das elevações de pressão e, para sua análise, são consideradas a compressibilidade do líquido e a deformação da tubulação (WYLIE; STREETER, 1979).

Portanto, toda vez que eventos que alterarem o fluxo de um fluido, ou seja, sua vazão e pressão, como por exemplo, o fechamento de uma válvula, variações de vazão ou desligamento de uma bomba, haverá alteração na sua energia cinética, gerando um fenômeno transiente, como resultado desse fenômeno, se tem uma força de pressão que, por sua vez, realiza trabalho, que comprime o fluido e por fim deforma a tubulação e outros componentes presentes no sistema que são atingidas pela onda de choque. (DECKERT; MENEZES, 2013).

Para Camargo (1991), as ondas de choque geradas por esse fenômeno de transiente hidráulico em função do tempo, tendem a ser amortecidas devido ao atrito interno contra a parede do tubo. Essa pressão pode atingir níveis indesejáveis e causar danos ao duto e aos dispositivos nele instalados.

Boulos et al. (2005) explicam que as ondas de pressão criadas no momento de mudança do regime de escoamento viajam na velocidade do som, que dependerá das propriedades elásticas da água e da tubulação, como por exemplo o material do qual a tubulação é feita e a espessura das paredes. De acordo com Tsutiya (2006), estas ondas de pressão e as variações de vazão se propagam ao longo da tubulação, desde seu ponto de origem. Como uma onda de choque e seus efeitos são, via de regra, tão mais pronunciados quanto mais rápidas sejam estas variações.

A Figura 3 mostra a evolução da pressão ao longo do tempo a partir do fechamento de uma válvula com intervalo de operação Δt . Em um ponto X à montante da válvula é representada a variação de pressão P ao longo do tempo t , sendo P_i a pressão inicial e P_f a pressão ao final do fenômeno transiente. Observa-se também a variação entre as pressões mínimas e máximas representadas por P_{max} e P_{min} .

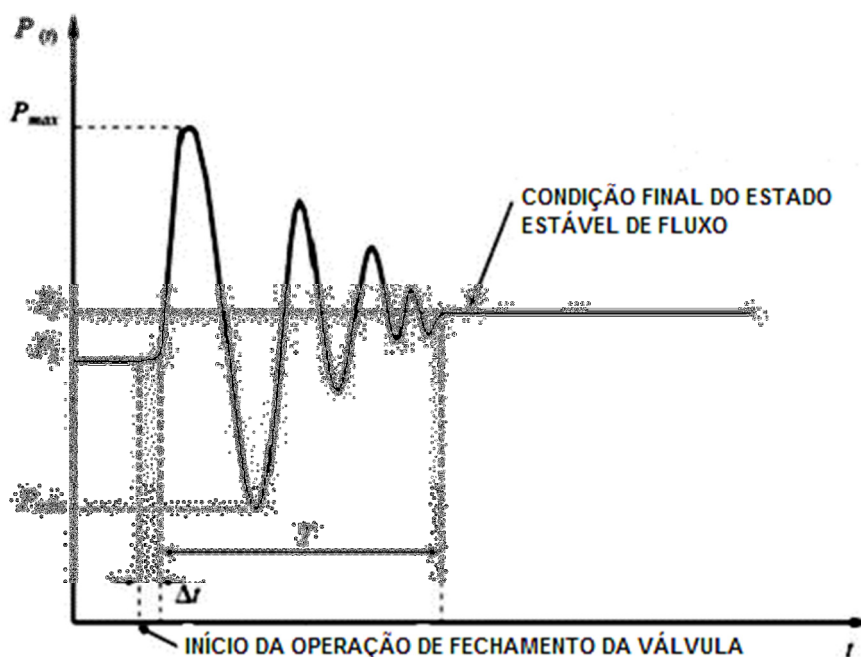


Figura 3. Representação do transiente decorrente do fechamento de uma válvula em um ponto X à montante da mesma.

Fonte: Amoah e Elbashir (2007) modificado pelo autor.

Os transientes em sistemas de distribuição de água são inevitáveis e de ocorrência natural. Porém, podem também ser muitos severos gerando cargas de pressão que podem ultrapassar as pressões de projeto, colocando em risco a estabilidade da instalação hidráulica e causar sérias consequências se não avaliados com cautela. Existem numerosos casos de rompimento de tubulações que resultaram em significativas perdas nos sistemas e até de vidas humanas (FRANÇA, 2006; BOULOS et al., 2005; MARTIN, 1999).

Para melhor se entender o fenômeno pode-se descrever os eventos que ocorrem com o fechamento de uma válvula de acordo com o mostrado por Tsutiya (2006) na Figura 4. Considerando o caso para qual há uma tubulação que sai de um reservatório e desprezando-se o atrito, no instante em que a válvula é fechada (em $t = 0$), o fluido próximo à válvula é desacelerado e comprimido, causando uma deformação na

parede da tubulação. Em seguida, todo o fluxo no interior do tubo é anulado, causando uma elevação da pressão em toda sua extensão e conseqüentemente, deformação do conduto. Conforme o fluxo é interrompido, a onda de alta pressão move-se para montante com celeridade da onda (a), atingindo a extremidade da tubulação em $t = L/a$. Neste momento toda a tubulação encontra-se sob pressão $\Delta H + H$ (onde H é a carga hidráulica no reservatório).

Como a pressão na tubulação é maior que no reservatório, há então fluxo da tubulação para o reservatório até que haja equilíbrio das pressões. Este escoamento alivia a pressão até que em $t = 2L/a$, as pressões são idênticas às originais e a velocidade é a mesma que a inicial, apenas no sentido contrário (da válvula para o reservatório) e por inércia o líquido tende a manter seu movimento. Com o abaixamento da pressão a deformação da tubulação deixa de existir neste mesmo instante. Como não há fluido disponível para o escoamento, uma baixa pressão (negativa) toma lugar avançando no sentido da válvula para o reservatório. Neste momento, se a parede do tubo não for suficientemente resistente ela pode contrair-se podendo ser achatada.

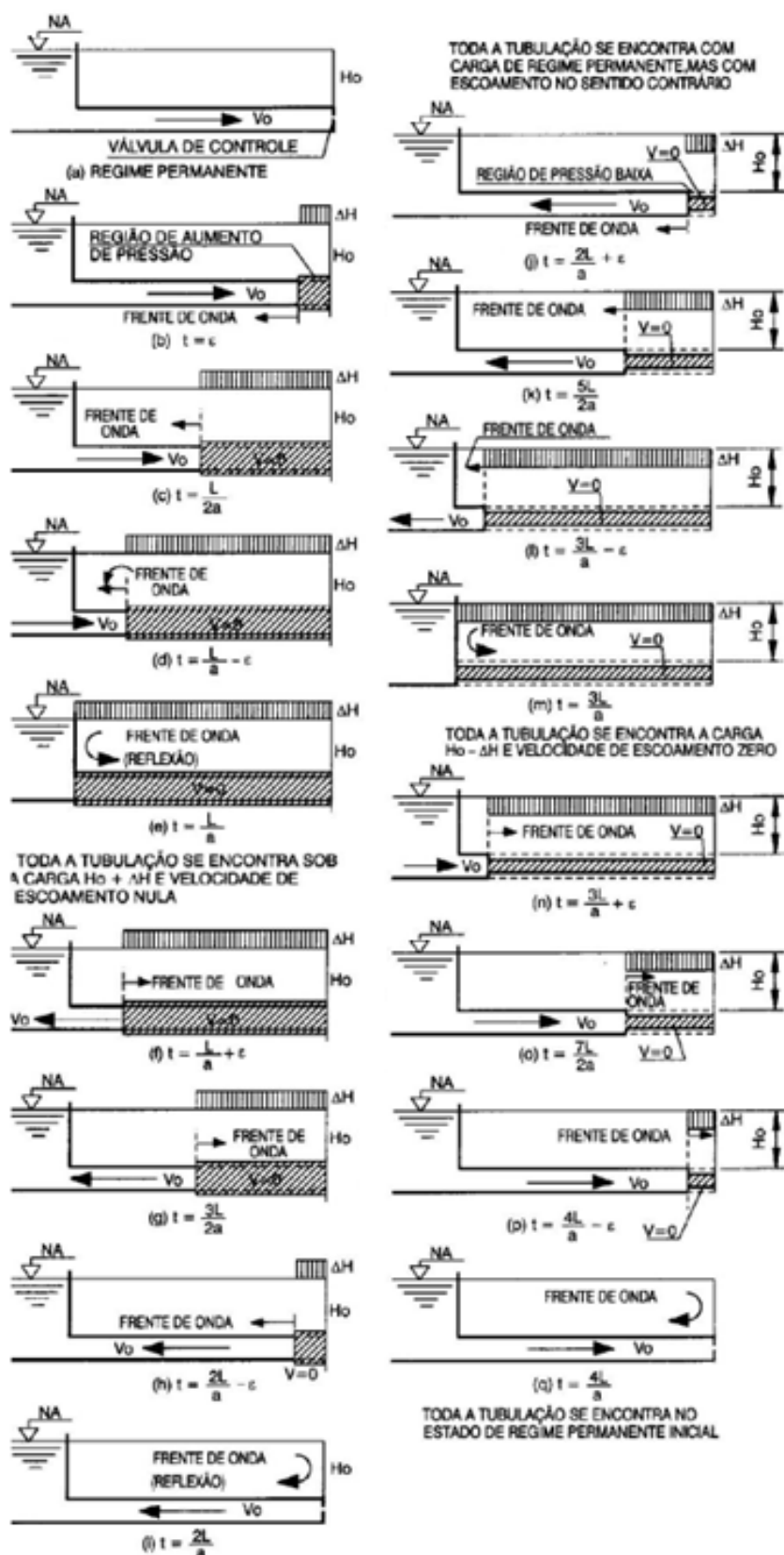


Figura 4. Fases do golpe de aríete provocado por fechamento instantâneo de uma válvula em um sistema formado por um reservatório, tubo e válvula, a partir de um regime permanente inicial.
Fonte: TSUTIYA (2006).

4.3 Principais consequências dos transientes

Um projeto hidráulico deve ser concebido para trabalhar sob condições normais de escoamento e, também, sob condições extremas causadas por agentes externos que possam gerar pressões muito maiores ou muito menores às condições ideais de funcionamento. Problemas gerados por transientes hidráulicos e suas possíveis consequências são listados a seguir, podendo também ser observadas nas Figuras 5, 6, 7.

4.3.1 Pressão máxima e pressão mínima no sistema

Pressões máximas durante regimes transientes podem destruir tubulações, túneis, válvulas ou outros componentes, causando estragos consideráveis e algumas vezes perdas de vidas humanas. Pressões elevadas podem ainda gerar pequenas fissuras nas paredes das tubulações, romper conexões entre seções da tubulação e destruir ou causar deformações em equipamentos como válvulas e outros dispositivos de proteção das tubulações.

Muitas vezes os prejuízos não são percebidos no momento da ocorrência dos fenômenos de sobrepressão, mas resultam em vazamentos e podem facilitar a corrosão, que após certo período pode reduzir significativamente a resistência da tubulação e, quando combinada com novos e repetidos transientes, pode gerar o rompimento dos condutos.

Por outro lado, pressões abaixo dos níveis de pressão atmosférica podem fazer com que as tubulações entrem em colapso (WYLIE; STREETER, 1979). Pressões excessivamente baixas podem resultar em implosão e achatamento das tubulações e derramamentos nas juntas dos tubos.

As pressões negativas ocorrem normalmente à jusante de uma válvula. Estas pressões aumentam também os riscos de cavitação (AMOA; ELBASHIR, 2007).

4.3.2 Condições de Vácuo

As condições de vácuo devem ser evitadas porque elas podem criar deformações muito maiores que as que ocorrem tipicamente sob condições normais de

funcionamento. Condições de vácuo podem gerar o rompimento de paredes das tubulações e blocos de ancoragem, especialmente se o sistema não foi concebido para suportar tais deformações (BOULOS et al., 2005).

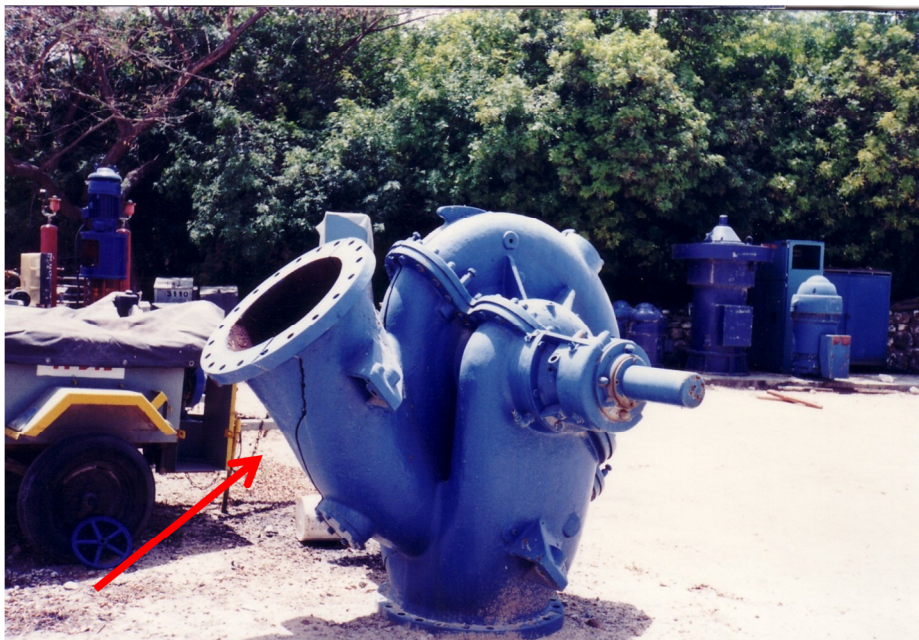


Figura 5. Resultado de golpe de aríete na tubulação de recalque da bomba bipartida.
Fonte: Saint-Gobain Canalização.



Figura 6. Resultado de golpe de aríete com subpressão na tubulação de aço, Índia.
Fonte: A.R.I.



Figura 7. Resultado de golpe de aríete com subpressão na linha de adução.
Fonte: Haper International.

4.3.3 Cavitação

A cavitação ocorre quando a pressão é reduzida ao valor da pressão de vapor à temperatura ambiente. Nessa pressão, o gás dissolvido na água é gradualmente liberado ou a água começa a se vaporizar (BOULOS et al., 2005).

Existem dois tipos distintos de cavitação, a cavitação gasosa e a cavitação de vapor (AMOAHA; ELBASHIR, 2007). Na cavitação gasosa há a formação de bolhas pelo ar dissolvido devido à redução da pressão abaixo da pressão de saturação. Já na cavitação por vapor ocorre a formação e destruição de bolsas de vapor, ou cavidades preenchidas com vapor. A colisão e o rompimento destas bolsas de vapor podem resultar em vibrações e pressões que podem causar ruptura ou flambagem na tubulação.

4.3.4 Separação da Coluna Líquida

Este fenômeno é muito semelhante à cavitação, ou seja, quando há queda de pressão, e esta atinge valores inferiores à pressão de vapor, ocorre a formação de cavidades de vapor no interior da tubulação.

Segundo Tsutiya e Alem Sobrinho (1999) estas cavidades podem atingir dimensões que podem ocupar toda seção da tubulação, ocorrendo então a chamada separação de colunas.

A separação de colunas ocorre em pontos de cotas elevadas ou convexas no perfil da tubulação durante a passagem de ondas negativas. Ocorre então a

reflexão das ondas de pressão negativa que se torna positiva e, quando da passagem destas ondas de pressão positivas nestes pontos, as colunas separadas se juntam novamente, causando uma onda de choque frontal entre elas com pressões suficientes para romper as paredes da tubulação. Outra possível consequência é o colapso da tubulação durante a separação das colunas, com implosão da tubulação caso as paredes dos tubos apresentem pequena espessura (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 1999).

4.3.5 Vibrações

Fortes vibrações hidráulicas podem danificar tubulações, equipamentos de controle e até o concreto usado nos blocos de ancoragem. Em longo prazo vibrações moderadas podem induzir à fadiga de peças e tubulações (MARTIN, 1999). Na Figura 8 é mostrado o dano causado na parede da casa de bombas devido à vibração da tubulação de recalque.



Figura 8. Resultado de golpe de aríete devido à vibração da tubulação em contato com a parede da casa de bombas.
Fonte: SABESP.

As Figuras 9 a 13 mostram os danos devido a vibrações no bloco de ancoragem do registro de parada e no próprio registro instalado a jusante do grupo

bombeador e a montante do elemento de proteção da linha de adução de água bruta na cidade de Tatuí, SP, vibração gerada por transiente hidráulico. O incidente ocorreu junho de 2012.



Figura 9. Registro de parada de ferro fundido, diâmetro 400 mm com vazamento após golpe.
Fonte: SABESP.



Figura 10. Detalhe 1: trinca registro de parada.
Fonte: SABESP.



Figura 11. Detalhe 2: trinca registro de parada.
Fonte: SABESP.



Figura 12. Detalhe 3: trinca bloco de ancoragem do registro de parada.
Fonte: SABESP.



Figura 13. Detalhe 4: Trinca no bloco de ancoragem e vazamento no flange do registro de parada.
Fonte: SABESP.

4.3.6 Qualidade da Água

A ocorrência de transientes pode causar a ressuspensão de partículas precipitadas, o desprendimento de biofilme das paredes da tubulação e ainda a intrusão de água subterrânea contaminada por juntas mal executadas ou trechos danificados da tubulação, além da entrada de gases que possibilitam a corrosão da tubulação (BOULOS et al., 2005).

4.4 Equações para o cálculo do transiente hidráulico

Segundo Camargo (1991), teria sido Michaud, no século XIX quem primeiro realizou estudos sobre o fenômeno do transiente hidráulico, posteriormente ainda no mesmo século, Joukowsky também deu importantes contribuições ao desenvolvimento do transiente, Allievi em 1902 apresentou a fundamentação teórica das perturbações de fluxo de água em tubos.

As análises criadas por Joukowski e Allievi constituem as bases da teoria clássica do golpe de aríete onde a carga máxima (H) em uma tubulação pode ser calculada por:

$$H = \frac{aV}{g} \quad (1)$$

Sendo: H : carga máxima (m)

a : celeridade (m s^{-1})

V : velocidade média do fluído na seção (m s^{-1})

g : aceleração da gravidade ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Entretanto, Michaud (1878) apresentou um tratado sobre transientes hidráulicos estudando a influência do fechamento de válvulas com o cálculo da carga hidráulica consistindo em:

$$H = \frac{2VX}{gt} \quad (2)$$

Sendo: X : comprimento da tubulação (m)

t : tempo de fechamento das válvulas (s)

As teorias de Michaud foram posteriormente adaptadas por Allievi em 1902. Após as publicações de Allievi em 1902, Strickler conduziu com sucesso experimentos no cálculo dos transientes hidráulicos em 1913. Ele analisou a influência da variação da seção de saída de uma tubulação, concluindo que as perdas de carga e a influência do atrito eram insignificantes para aplicações técnicas da fórmula de Allievi.

Em 1930, Schnyder desenvolveu um método para o cálculo dos transientes hidráulicos. Este método foi chamado de Schnyder-Bergeron em 1932 e constitui um método gráfico para solução dos transientes conhecendo-se algumas condições de um sistema (CAMARGO, 1991). Assim, poder-se-ia calcular a pressão e a velocidade em um sistema, a partir de um gráfico, conhecendo-se as posições iniciais e determinando as posições em estudo. Este método tornou-se bastante popular e foi o principal método de cálculo dos transientes hidráulicos até o advento dos computadores.

A partir da popularização do uso dos computadores na década de 70 o método gráfico de Schnyder-Bergeron foi substituído por outros métodos, como o das características, e ter antes negligenciado o fator de atrito e a compressibilidade do fluido foram inseridos no cálculo melhorando os resultados.

Como visto, numa análise histórica do estudo dos transientes hidráulicos, estes fenômenos resultantes das variações de escoamento estão geralmente relacionados às manobras com válvulas hidráulicas, mas podem também ocorrer por operações com bombas, mudanças bruscas de demandas, mudanças nas condições de transmissão, preenchimento ou esvaziamento de tubulações, mudanças de pressões em reservatórios, entre outros casos, que ocasionam a mudança de um estado permanente de escoamento para outro estado permanente (BOULOS et al., 2005).

4.5 Estudo dos transientes hidráulicos no saneamento

Muitos trabalhos têm sido publicados nos últimos anos tratando dos fenômenos dos transientes e suas consequências para sistemas de saneamento, principalmente em sistemas de abastecimento de água.

Castro e Santos (2002) desenvolveram um programa computacional para a análise do golpe de aríete em adutoras utilizando o Método das Características (MOC), procurando desenvolver um programa onde se pudesse verificar a influência de diversos dispositivos utilizados no controle dos transientes em sistemas de abastecimento de água, simulando o desligamento de conjuntos moto-bombas. Com a realização deste trabalho, os autores concluíram que a elaboração de programas para simulação de transitórios hidráulicos pelo método das características apresenta resultados satisfatórios e é de extrema importância o conhecimento das condições de contorno dos equipamentos do sistema.

França (2006) procurou comparar a utilização do esquema numérico de MacCormack à utilização do método das características. Segundo as conclusões deste autor, as simulações feitas com o esquema numérico de MacCormack apresentam bons resultados frente às mesmas simulações realizadas utilizando-se o método das características. Segundo o mesmo autor, ambas as simulações rodaram de forma rápida embora o método de MacCormack tenha um tempo computacional ligeiramente maior. Entretanto, apesar de possuir um tempo computacional maior, o autor conclui que este se apresenta como uma alternativa viável para o cálculo dos transientes hidráulicos.

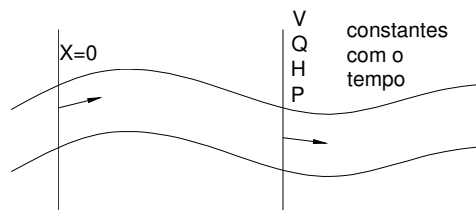
Vasconcelos (2007) apresentou um modelo matemático para simulação de enchimento de adutora de água, atividade muito comum na operação de sistemas de abastecimento quando da necessidade de manutenção nos condutos. Quando as

adutoras são preenchidas de forma rápida, existe a possibilidade de que haja danos à adutora decorrentes de pressões transientes bastante elevadas. Estas pressões são decorrentes de bolsões de ar que ficam presos na tubulação durante seu enchimento e podem gerar pressões tão elevadas que tornam possível o rompimento. Para se evitar a formação desses bolsões são utilizadas válvulas de ventilação que devem ser adequadamente localizadas. Para tanto, o autor criou um modelo numérico computacional que simula as etapas transientes no enchimento dos condutos de forma a indicar os pontos onde há tendência de formação de bolsões de ar.

Outro trabalho que pode ser citado na investigação dos transientes é o apresentado por Lambert et al. (2005), que estudaram os efeitos de obstruções parciais nos transientes para tubulações utilizando uma equação de orifício. A análise realizada indica que o atrito nas paredes da tubulação e obstruções parciais induz às vibrações por transientes. Desta forma, busca-se um novo método de detecção de obstruções que indica o tamanho das mesmas utilizando diferentes condições de vibração, o qual obteve sucesso em experimentos de laboratório.

4.6 Regime permanente

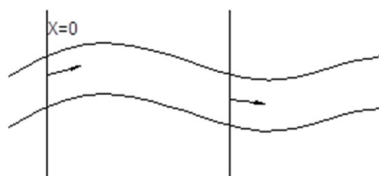
No regime permanente em conduto forçado, velocidade, vazão, pressão e carga numa seção não variam com o tempo em cada seção.



$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \rightarrow x = cte; \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \rightarrow x = cte; \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \rightarrow x = cte; \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \rightarrow x = cte \quad (3)$$

4.7 Regime transitório

No regime transitório em conduto forçado, a velocidade, vazão, carga e pressão numa seção variam com o tempo em cada seção.



$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 \rightarrow x = cte; \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \rightarrow x = cte; \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \rightarrow x = cte; \frac{\partial H}{\partial t} \neq 0 \rightarrow x = cte \quad (4)$$

4.8 Método das características

O método das características para sistemas de tubulações pressurizadas é o mais utilizado para a simulação hidráulica de transientes, e tem sua origem em um procedimento gráfico criado por Monge em 1789 para a integração de equações diferenciais parciais (EDPs).

Segundo Chaudhry (1993), tornou-se um método padrão para a análise de transientes em condutos fechados. O conceito de curvas características é importante para a compreensão da propagação de ondas.

Segundo Wylie e Streeter (1993), o método é uma forma particular de resolver duas equações diferenciais parciais convertendo em quatro equações diferenciais ordinárias (EDOs) que possuem solução analítica.

Segundo WYLIE e STREETER (1979) e ALMEIDA E KOELLE (1992, apud FRANÇA 2006) as principais vantagens deste método é que possui critérios de estabilidade bem definidos, as condições de contorno podem ser programadas bem facilmente, termos menos importantes podem ser omitidos, pode modelar com facilidade sistemas complexos, possui melhor acuracidade entre os métodos de diferenças finitas, sua conceituação e fundamentação exprimem bem a natureza real do escoamento transiente sob pressão e historicamente é a técnica mais utilizada nestes problemas.

Alguns programas de análise de transiente utilizam esse método como o Hammer (Bentley), WHAMO (US army Corp of Engineers), Surge (KYPipe) e o Allievi (Universidade de Valência) o qual será utilizado nessa análise.

A seguir são apresentadas equações para os fenômenos dos transientes apresentado por Streeter e Wylie (1979).

4.8.1 Equação do movimento

Na Figura 14 estão representadas as forças que atuam num elemento infinitesimal de dimensões $A\delta x$ e massa $m = \rho A\delta x$ em uma linha de fluxo na direção x . A segunda lei de Newton estabelece que $\sum F = m a$.

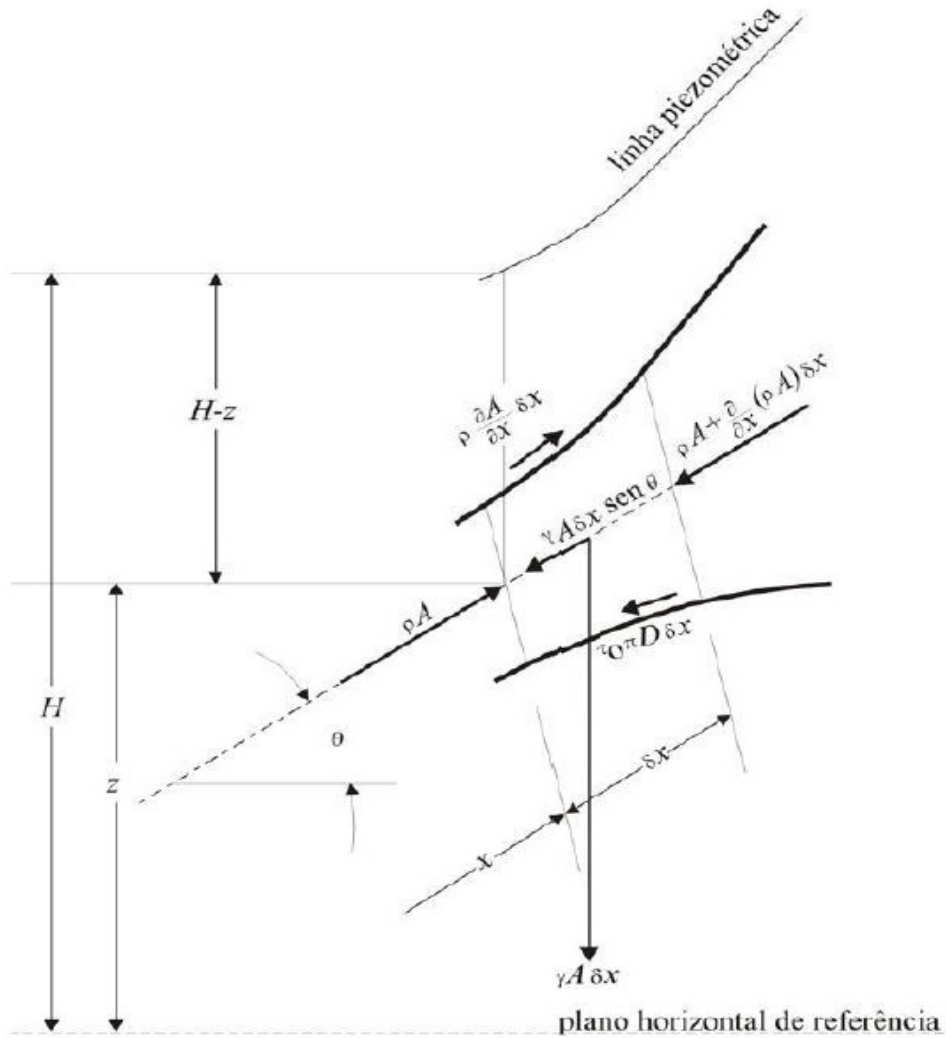


Figura 14. Diagrama do sistema para dedução da equação do movimento.

Fonte: França (2006).

Então:

$$PA - \left[PA + \frac{\partial}{\partial x} (PA) \delta x \right] + P \frac{\partial A}{\partial x} \delta x - \gamma A \delta x \sin \theta - \tau_0 \pi D \delta x = \rho A \delta x \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

Dividindo-se a equação 5 por $\rho A \delta x$ (a massa do elemento infinitesimal) e algum desenvolvimento tem-se:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - g \sin \theta - \frac{4\tau_0}{\rho D} = \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

Sabendo-se para regime permanente, $\tau_0 = \rho f V^2 / 8$ e considerando-se que o atrito para o regime variável é igual ao atrito para o regime permanente insere-se o atrito em 6.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - g \sin \theta - \frac{4\rho f V^2}{8\rho D} = \frac{dV}{dt}$$

e resolvendo:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (7)$$

Em que V^2 é representado por $V|V|$, pois a velocidade pode mudar de sentido durante a ocorrência do fenômeno, porque o atrito se opõe ao movimento do elemento.

Introduzindo o termo de aceleração $\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$ e como para as aplicações em regime variável de escoamento $V \frac{\partial V}{\partial x} \ll \frac{\partial V}{\partial t}$ este último poderá ser omitido da equação 7.

Deste modo:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 = L_1 \quad \text{equação do movimento} \quad (8)$$

4.8.2 Equação da continuidade

Analisando a Figura 15, pode-se perceber o princípio da conservação de massa ou da continuidade ao longo da tubulação, em que:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho A V) \delta x = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A \delta x) \quad (9)$$

Dividindo-se a equação 9 pela massa ($\rho A \delta x$) e desenvolvendo ter-se-á:

$$\left[\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} \right]_I + \left[\frac{V}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right]_{II} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

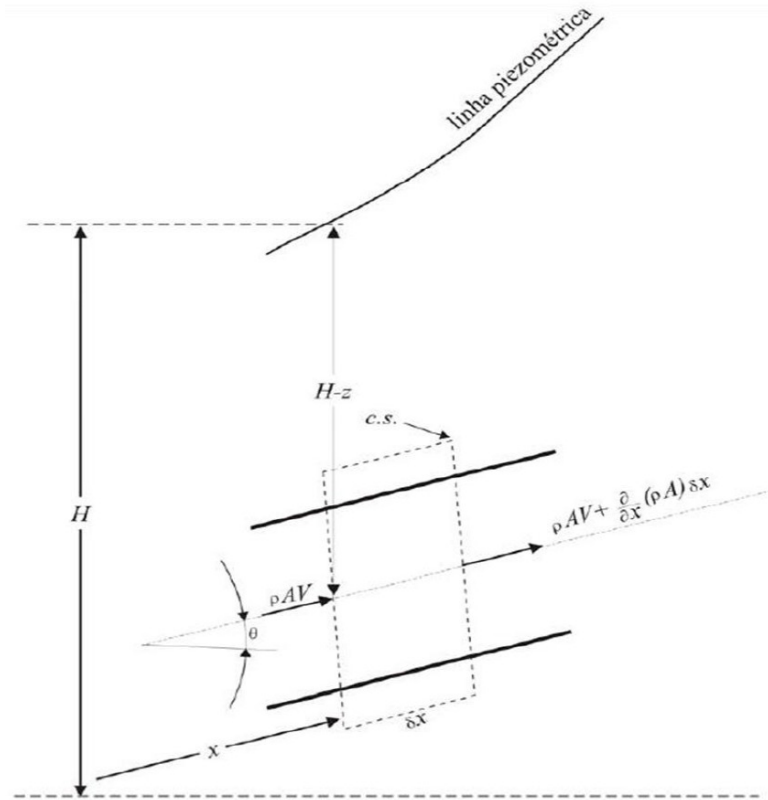


Figura 15. Diagrama do sistema para dedução da equação da continuidade.
Fonte: França (2006).

Percebe-se do cálculo que na equação 10 o termo I é igual à derivada total de $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$, e que o termo II derivada total de $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$.

Portanto

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

Neste caso, o primeiro termo da equação 11 refere-se à elasticidade do tubo, o segundo à compressibilidade do líquido e o terceiro à variação do volume.

Como a velocidade de alteração da força de tração por unidade de comprimento é $\left(\frac{D}{2}\right) \frac{d\rho}{dt}$, t' é a espessura da parede do tubo, a velocidade de alteração na tensão é $\left(\frac{D}{2t'}\right) \frac{d\rho}{dt}$, e a velocidade de aumento da elongação é $\left(\frac{D}{2t'E}\right) \frac{d\rho}{dt}$, então tem-se a velocidade de aumento da área:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{D}{2t'E} \frac{d\rho}{dt} \frac{D}{2} \pi \quad (12)$$

Usando-se a definição do módulo de elasticidade volumétrica do fluido e o produto da divisão da velocidade de alteração da massa específica, pela massa específica, obtemos:

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \left(1 + \frac{K}{E} \frac{D}{e} \right) + \frac{\delta V}{\delta X} = 0 \quad (13)$$

É conveniente que as constantes dessa equação sejam expressas sob a forma de:

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E} \right) \left(\frac{D}{e} \right) c_1} \quad (14)$$

na qual c_1 é a unidade para condutos com juntas de dilatação.

Assim a equação 12 torna se:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\delta V}{\delta X} = 0 \quad (15)$$

E desenvolvendo $\frac{dp}{dt}$, tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 = L_2 \quad \text{equação da continuidade} \quad (16)$$

Nota-se que equação 8 e a equação 16 são equações diferenciais parciais não lineares.

As variáveis dependentes são P e V e estão relacionadas em função de x e t , estas equações como citado anteriormente não possuem solução analítica, contudo, podem ser utilizados métodos numéricos para a resolução destas equações.

Como visto pode-se então encontrar os valores de velocidade (V) e pressão (P) com a formulação acima apresentada. Entretanto, convém em problemas de hidráulica encontrar valores de velocidade e pressão em relação à vazão e carga hidráulica, respectivamente.

As equações L_1 (equação 8) e L_2 (equação 16) contêm duas incógnitas (P e V), e podem ser combinadas por meio de um multiplicador desconhecido λ .

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (17)$$

Deste modo, dois valores reais de λ podem ser encontrados, os quais fornecem duas equações em P e V que representam o mesmo fenômeno físico das

equações originais (equação do movimento e da continuidade), podendo substituí-las para qualquer solução.

Pode haver uma grande simplificação se dois valores particulares de λ forem encontrados.

Estes valores permitem a transformação das equações diferenciais parciais em ordinárias, como demonstrado abaixo:

$$L = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} + \lambda \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \quad (18)$$

$$L = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} + \frac{\lambda \partial P}{\partial t} + \lambda \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

Agrupando-se os termos com variáveis iguais na equação 19:

$$L = \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \lambda \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda \partial P}{\partial t} \right) + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (20)$$

E rearranjando:

$$L = \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \lambda \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right)_I + \lambda \left(\frac{1}{\rho \lambda} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} \right)_{II} + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (21)$$

Para a parte I da equação 21 fazendo- se $\lambda \rho a^2 = dx/dt$, do cálculo este termo será a derivada total de dV/dt :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial x} \lambda \rho a^2 + \frac{\partial V}{\partial t}$$

Da mesma forma no termo II se fizermos $1/\rho \lambda = dx/dt$, este termo será a derivada total de dP/dt :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{\rho \lambda} + \frac{\partial P}{\partial t}$$

Com isso então tem-se:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda \rho a^2 \text{ e } \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\rho \lambda}$$

Portanto:

$$\lambda \rho a^2 = \frac{1}{\rho \lambda'}$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{(\rho a)^2}$$

E finalmente:

$$\lambda \mp \frac{1}{\rho a} \quad (22)$$

Após isso a equação 19 será:

$$L = \frac{dV}{dt} \mp \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (23)$$

Desde que mantida a condição de $\frac{dx}{dt} = \lambda \rho a^2 = \frac{1}{\rho \lambda}$

Onde então:

$$\frac{dx}{dt} = \mp \left(\frac{1}{\rho a} \rho a^2 \right) \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \mp a \quad (24)$$

Pode-se então visualizar a solução em um diagrama x e t como mostra a Figura 16, que representa a malha de cálculo formada no plano (x,t) que permite o cálculo das variáveis pP e VP em um ponto qualquer a partir de valores conhecidos nos pontos A e B, em um instante anterior ao do ponto P.

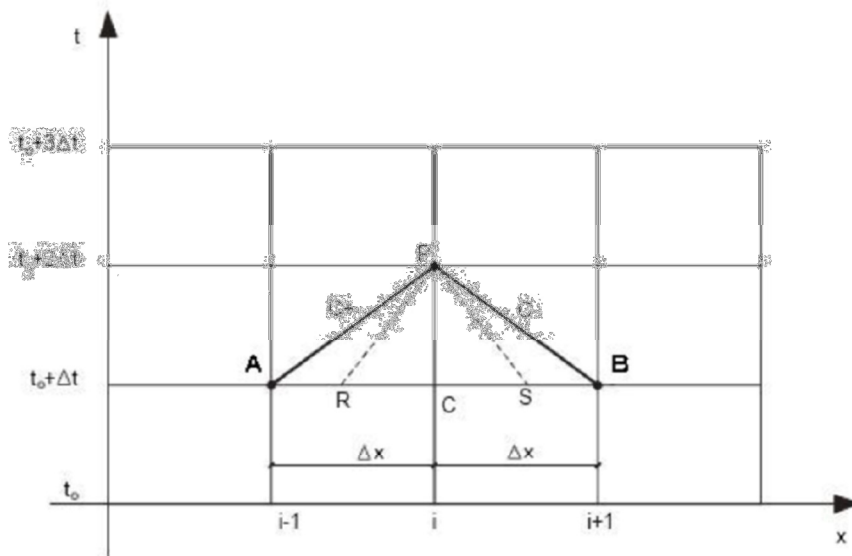


Figura 16. Malha de cálculo para o método das características.

Fonte: CASTRO E SANTOS (2002)

AP e PB somente serão retas se a for constante.

Multiplicando a equação 23 por $\rho a dt$ e integrando entre A e P, tem-se:

$$\begin{aligned}
 (\rho a dt)L &= \rho a dt + dP + \rho a g \sin \theta dt + \frac{\rho a g f V |V| dt}{sD} = 0 \\
 \int L \rho a dt &= \rho a \int_A^P dV + \int_A^P dP + \rho a g \sin \theta \int_A^P dt + \frac{\rho a g f V |V|}{sD} \int_A^P dt = 0
 \end{aligned} \tag{25}$$

$$\rho a (V_0 - V_A) + P_0 - P_A + \rho a g \sin \theta (t_0 - t_A) + \frac{\rho a g f V |V|}{sD} (t_0 - t_A) = 0$$

Mas $t_p - t_a = \Delta t$, então:

$$\rho a (V_0 - V_A) + P_0 - P_A + \rho a g \sin \theta \Delta t + \frac{\rho a g f V |V|}{sD} \Delta t = 0 \tag{26}$$

Como

$$\frac{dx}{dt} = \mp a$$

Passando para diferenças finitas é $\Delta x = a \Delta t$, logo:

$$\rho a (V_0 - V_A) + P_0 - P_A + \rho a g \sin \theta \Delta t + \frac{\rho f V |V|}{2D} \Delta x = 0 \tag{27}$$

Supondo θ constante de A até B e V constante igual ao valor conhecido em A no conduto.

De maneira similar, agora para o caso de $-\lambda$ tem-se:

$$\rho a (V_0 - V_B) + P_0 - P_B + \rho a g \sin \theta \Delta t + \frac{\rho f V |V|}{2D} \Delta x = 0 \tag{28}$$

Pois,

$$\frac{dx}{dt} = -a$$

como na equação 23.

Δx será um número sempre positivo e igual ao comprimento do trecho.

Desta forma, podem-se resolver simultaneamente as equações 27 e 28 para se determinar P e V a partir dos dados conhecidos em A e B.

Entretanto, tratando-se de tubulações é mais conveniente se trabalhar com carga hidráulica (H) e vazão (Q), ao invés de pressão e velocidade.

Percebe-se pela Figura 16 que:

$$P_P = \rho g (H_P - Z_P) \text{ e } P_A = \rho g (H_A - Z_A), \text{ e}$$

$$P_P - P_A = \rho g (H_P - H_A) - \rho g (Z_P - Z_A), \text{ mas } Z_P - Z_A = \rho g \Delta x \sin \theta$$

Então,

$$P_P - P_A = \rho g(H_P - H_A) - \rho g \Delta x \sin \theta \quad (29)$$

Fazendo $V = Q/A$ e substituindo 29 na equação 27 tem-se:

$$\begin{aligned} \rho a \left(\frac{Q_P}{A} - \frac{Q_A}{A} \right) + \rho g(H_P - H_A) - \rho g \Delta x f \frac{Q_A}{A} \left| \frac{Q_A}{A} \right| \frac{1}{2D} &= 0 \\ \frac{\rho a}{A} Q_P - \frac{\rho a}{A} Q_A + \rho g H_P - \rho g H_A + \frac{\rho \Delta x f Q_A |Q_A|}{2g d A^2} &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

Isolando H_P obtém-se a equação da curva característica C^+ .

$$C^+ \rightarrow H_P = H_A - \frac{a}{Ag} (Q_P - Q_A) - \frac{\rho \Delta x f Q_A |Q_A|}{2g d A^2} \quad (31)$$

Analogamente obtém-se a curva C^- .

$$C^- \rightarrow H_P = H_B + \frac{a}{Ag} (Q_P - Q_B) - \frac{\rho \Delta x f Q_B |Q_B|}{2g d A^2} \quad (32)$$

Para simplificar as equações faz-se então:

$$B = \frac{a}{gA} \text{ e } R = \frac{f \Delta x}{2g d A^2} \text{ que são valores constantes.}$$

Portanto:

$$C^+ \rightarrow H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - R Q_A |Q_A| \quad (33)$$

$$C^- \rightarrow H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) - R Q_B |Q_B| \quad (34)$$

4.9 Dispositivo de proteção – RHO

Para o presente estudo o dispositivo de proteção considerado foi o reservatório hidropneumático (RHO, calderins). Nos tanques hidropneumáticos convencionais (sem bexiga) o ar comprimido que está em contato com a água se dissolve e o volume de ar diminui, o compressor deve partir periodicamente para introduzir ar comprimido e compensar o ar perdido pela dissolução.

Nos tanques hidropneumáticos com membrana (bexiga) o ar comprimido e a água estão separados pela membrana de butil, evitando a dissolução e a necessidade de utilizar compressores. A carga de ar comprimido se faz uma única vez,

quando o tanque é instalado na adutora. O volume de ar comprimido permanecerá inalterado durante algum tempo, dependendo da operação da linha devendo ter um acompanhamento ou um sensor de alerta de nível que, depois de configurado, informe a necessidade de complementação do nível do gás. A bexiga é fabricada sob medida para cada tanque de maneira que durante a expansão máxima ela não trabalhará estirada ou expandida, proporcionando uma longa vida útil (a expectativa de vida útil da bexiga é de 10 anos). Outros benefícios dos tanques hidropneumáticos com membrana são: i) eliminação da corrosão no interior do tanque, aumentando a vida útil do equipamento; ii) eliminação dos custos de compressores e de seus custos de operação e manutenção; iii) não necessita energia elétrica para operar; iv) certificação da bexiga de butil para utilização em sistemas de água potável. A Figura 17, mostra como é constituído um RHO com membrana.



Figura 17. Componentes de um reservatório hidropneumático com bexiga (RHO).
Fonte ARI.

Para a proteção de tubulações de esgotos sanitários ou água bruta, utilizamos o RHO com bexiga reforçada conforme demonstra a Figura 18.

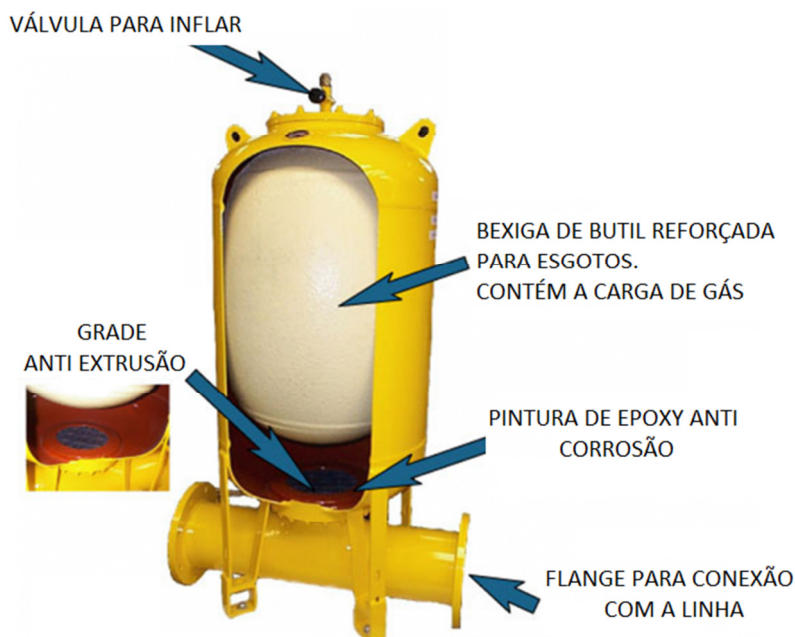


Figura 18. Componentes de um reservatório hidropneumático com bexiga (RHO) para esgotos. Fonte ARI.

O reservatório hidropneumático com bexiga é um dispositivo de controle de surto instalado com uma bexiga de borracha butílica. A pressão de pré-carga da bexiga é calculada pela equação 40 para dar a elasticidade necessária para empurrar a água para o sistema. Uma vez que a bexiga foi carregada com a pré-carga correta, o reservatório irá operar automaticamente, esvaziando quando acionado e enchendo com as ondas de retorno até atingir naturalmente o seu equilíbrio de estado estacionário.

A operação do reservatório acontece da seguinte forma (Figura 19):

1. Fornecida a pressão de pré-carga no reservatório, conforme valor estabelecido, neste estágio a bexiga estará com ar e o RHO vazio, Figura 19a;
2. Quando a válvula de isolamento entre o reservatório e a tubulação for aberta, estando a(s) bomba(s) hidráulica(s) desligada(s) e a tubulação completamente preenchida por água, ou seja, carregada em condição estática, nessa condição a água ocupará parcialmente o volume do RHO. A bexiga vai ser comprimida, comprimindo o ar fornecido na pré-carga (a pressão na situação estática é sempre maior do que a pressão de pré-carga). Figura 19b;
3. Na situação seguinte, Figura 19c, estando a(s) bomba(s) em operação normal, a pressão na tubulação será superior à situação anterior e o volume de água no

RHO será ainda maior, comprimindo ainda mais o gás na bexiga, sendo alcançado um equilíbrio dinâmico entre ambos;

4. Imediatamente após a parada de bombeamento (falta de energia, por exemplo) a pressão na tubulação começa a cair em uma onda de pressão baixa que se inicia junto à bomba. A energia elástica da bexiga dentro do reservatório irá provocar a descarga da água para a tubulação expandindo o ar da bexiga. Esta descarga evitará a ocorrência de pressões muito baixas evitando pressões de vapor da água, perigosas para a tubulação conforme a Figura 19d e atinge a maior expansão da bexiga conforme a Figura 19e;

5. No instante seguinte, a Figura 19f apresenta o retorno da onda de pressão positiva, o fluxo da água inverte e a água entrará no RHO comprimindo o ar da bexiga;

6. A Figura 19g mostra-se a compressão máxima da bexiga;

7. Após várias oscilações, o estado de equilíbrio é novamente atingido voltando ao estado da Figura 19b. Quando a estação de bombeamento reiniciar sua operação, o reservatório irá encher de água até que o estado de equilíbrio dinâmico seja atingido (Figura 19c) e o sistema estará preparado para a próxima parada da bomba.

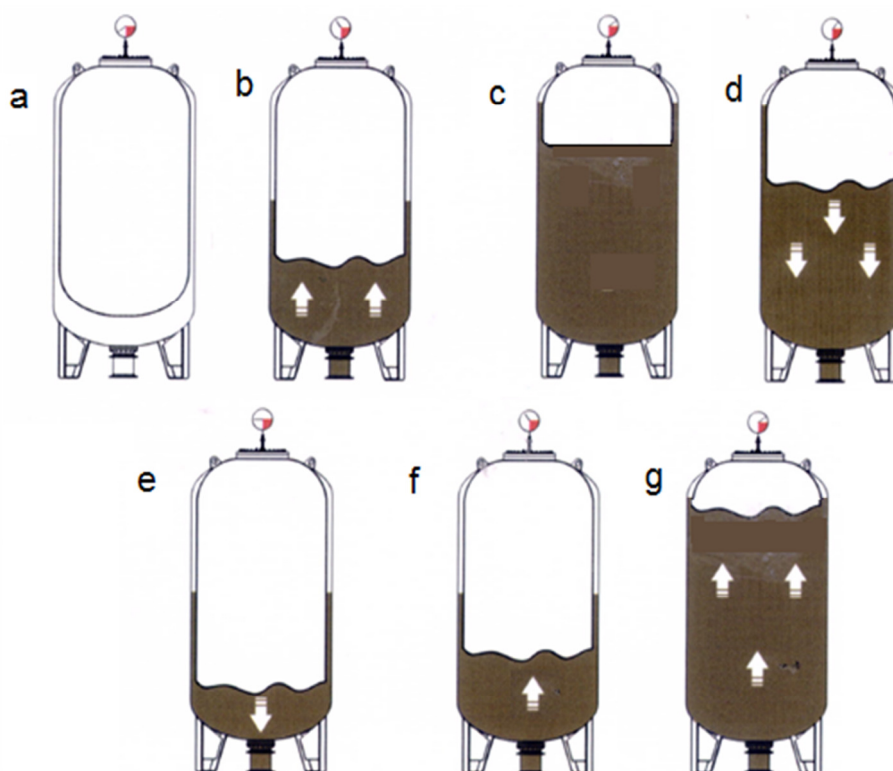


Figura 19. Operação do RHO com bexiga.

Fonte: Catálogo A.R.I.

Na Figura 20 são mostradas as diferenças entre o reservatório hidropneumático tradicional, em que há necessidade de compressor, e reservatório com bexiga. Contudo, neste caso, a bexiga é fixada no flange de conexão com a tubulação da adutora e é ela que recebe a água, ficando o ar confinado no RHO.

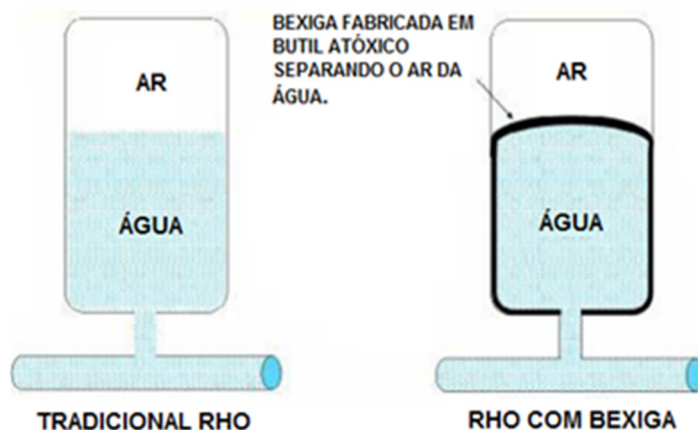


Figura 20. Comparação de RHO tradicional e com bexiga.
Fonte: Saint-Gobain.

Há fabricantes que fixam a boca da bexiga no bocal do reservatório o qual faz conexão com a linha de adução, conforme as Figura 21 e 22 dos fabricantes BERMAD e A.R.I.

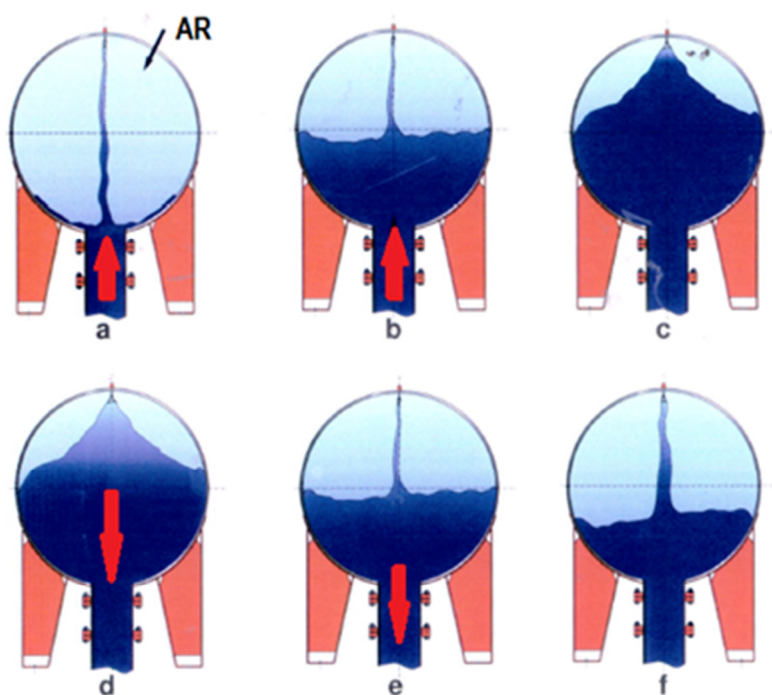


Figura 21. Operação do RHO do fabricante BERMAD.
Fonte: BERMAD.

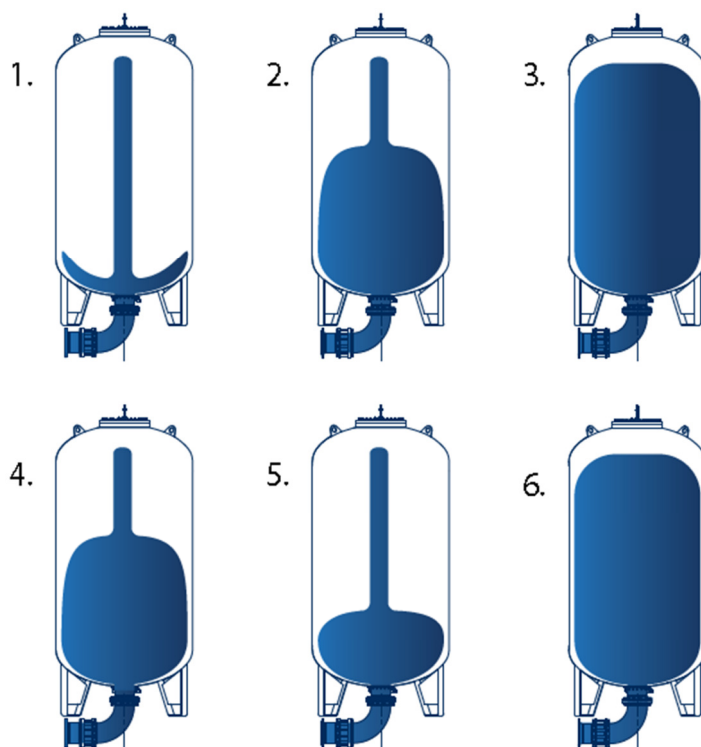


Figura 22. Operação do RHO do fabricante A.R.I.
Fonte: A.R.I.

A Figura 23 mostra o interior do reservatório com a bexiga não inflada e a Figura 24 mostra a bexiga inflada para teste antes de ser instalada.



Figura 23. Detalhe: bexiga não inflada no interior do RHO.
Fonte: Saint-Gobain.



Figura 24. Detalhe da bexiga inflada.
Fonte: Saint-Gobain.

O mercado fornece um modelo chamado de Hydroballs que tem um funcionamento semelhante ao RHO com bexiga, tal modelo ainda não tem utilização frequente em projetos no Brasil. A Figura 25 apresenta o modelo.

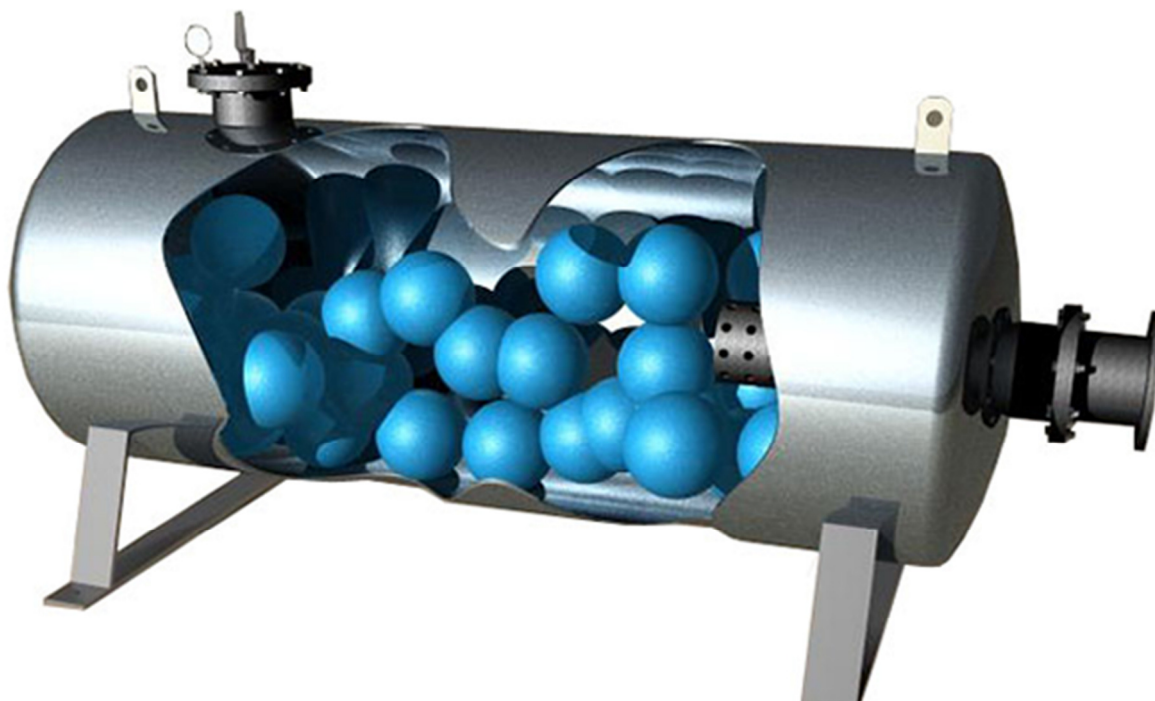


Figura 25. Detalhe do modelo de RHO Hydroball.
Fonte: <http://www.hydroballs.com/en/>.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização

Avaliou-se neste trabalho alternativas de solução do sistema de bombeamento público do município de Torrinha – SP.

O município localiza-se a 270 km da capital do Estado de São Paulo, possui uma área de aproximadamente 303,3 km². Está inserido no Bioma Cerrado, nas coordenadas geográfica 22°25' de Latitude Sul e 48°10' de Longitude Oeste, está a uma altitude média de 802 metros. De acordo com o censo demográfico de 2010 sua população é de aproximadamente 9.330 habitantes, sendo que a população urbana é maior que a rural (IBGE). A projeção para 2015, segundo o SEADE, é de 9.520 habitantes.

5.2 Caracterização do sistema de captação

O sistema de captação de água para abastecimento público do município administrado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) será feita do Aquífero Guarani através de um poço profundo de 405 metros, perfurado em 2013, com capacidade de exploração de vazão de 40 L s⁻¹.

A adução de água é prevista para ser feita em duas etapas que recebem o nome de baixo e alto recalque respectivamente. O baixo recalque consiste na adução da água do poço pelo grupo moto bomba até um reservatório próximo à boca do poço, que serve como poço de sucção para o alto recalque, que por sua vez recalca a água até o centro de reservação da cidade de Torrinha.

O alto recalque será feito através de uma instalação de bombeamento denominado de estação elevatória tipo Q, que é a instalação de grupo motobomba submersa em uma camisa de aço reproduzindo em escala reduzida a instalação em poço profundo convencional. A Figura 26 mostra o esquemático da estação elevatória tipo Q. A bomba submersa para poço na simulação pelo programa Allievi tem a nomenclatura de B1. As Figuras 27 e 28 mostram o caminhamento e perfil da adutora do alto recalque.

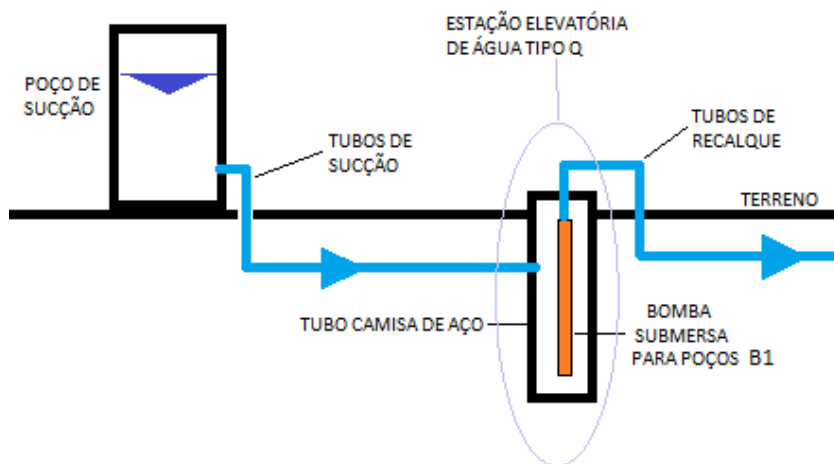


Figura 26. Esquemático da estação elevatória de água tipo “Q”, padrão SABESP.



Figura 27. Caminhamento da adutora, sendo GMB – grupo moto bomba; A.A.B. – adutora de água bruta; C.R. – centro de reservação.

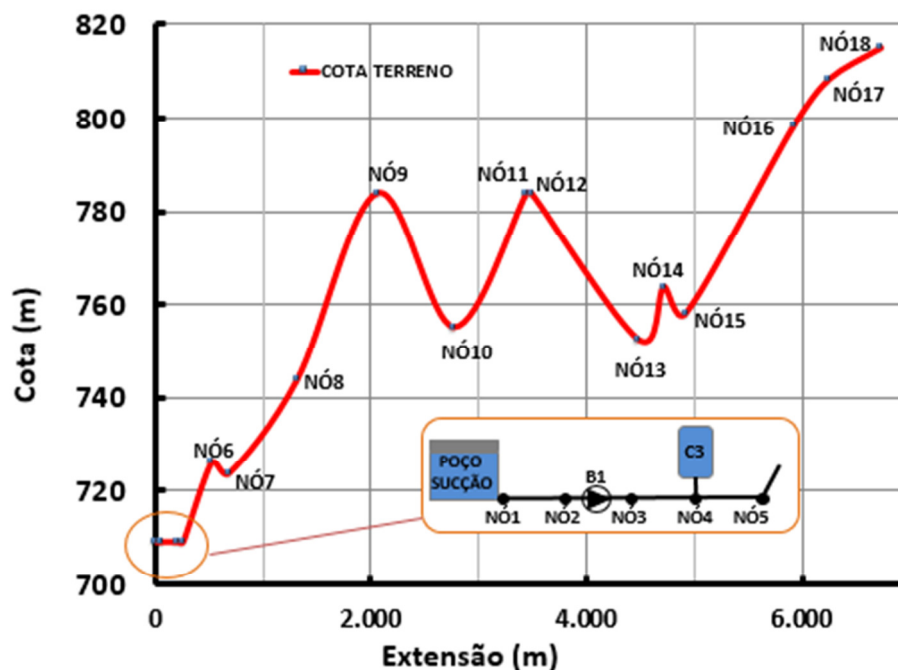


Figura 28. Perfil do caminhamento da adutora (alto recalque).

B1 – grupo moto bomba; C3 – calderin ou RHO.

O conjunto moto bomba definido é da marca Leão modelo 801/085x+S120-07 cuja curva vazão versus pressão é apresentada na Figura 29 e suas características na Tabela 1.

Tabela 1. Dados operacionais do grupo motobomba.

Item	Valor
Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	140
Altura manométrica total (m)	137
Rendimento conjunto motobomba (%)	80,8
Diâmetro do rotor (mm)	142
Rotação (rpm)	3500
Momento de inércia por estágio (kg m^2)	0,0228
Número de estágios (un)	7
Potência do motor (cv)	85

Fonte: SABESP e Catálogo do Fabricante.



BOMBAS LEÃO S.A.

Modelo

S120

BOMBA SUBMERSA PARA POÇOS COM Ø MÍNIMO 6" e 10"

CURVA DE PERFORMANCE

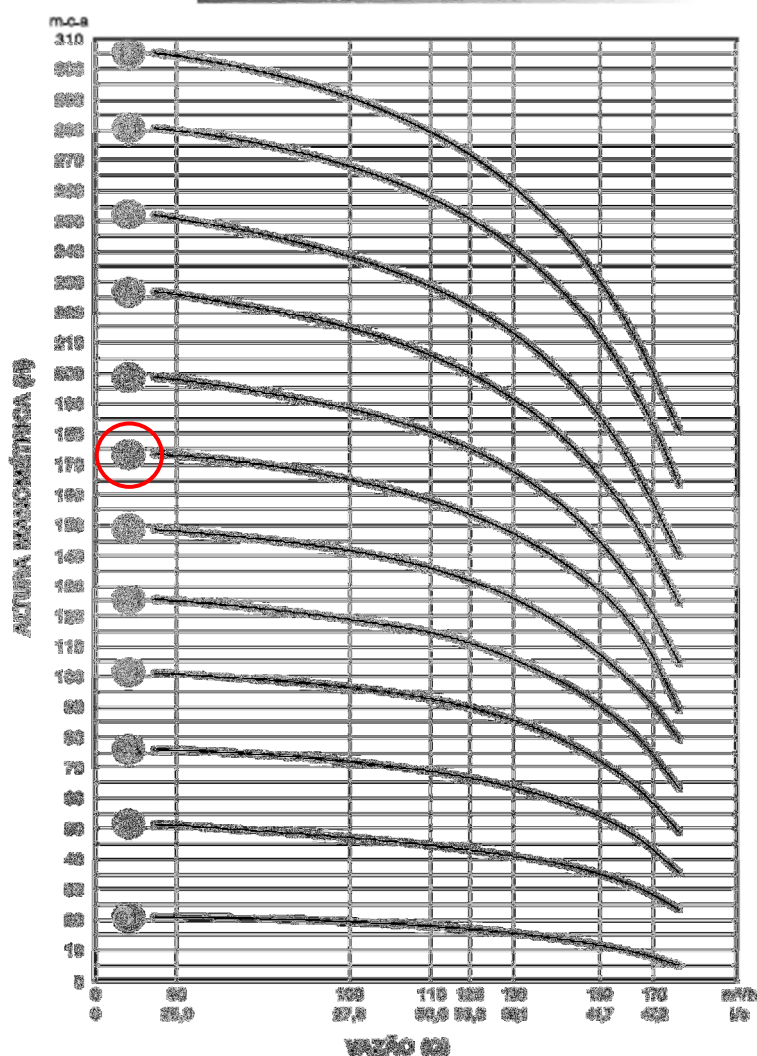


TABELA DE SELEÇÃO

MOTOR + BOMBA	DIÂMETRO (mm)	IP	Ø	Ø0	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Ø5	Ø6	Ø7	Ø8	Ø9	Ø10	Ø11	Ø12	Ø13	Ø14	Ø15	Ø16	Ø17	Ø18	Ø19	Ø20	Ø21	Ø22	Ø23	Ø24	Ø25	Ø26	Ø27	Ø28	Ø29	Ø30	Ø31	Ø32	Ø33	Ø34	Ø35	Ø36	Ø37	Ø38	Ø39	Ø40	Ø41	Ø42	Ø43	Ø44	Ø45	Ø46	Ø47	Ø48	Ø49	Ø50	Ø51	Ø52	Ø53	Ø54	Ø55	Ø56	Ø57	Ø58	Ø59	Ø60	Ø61	Ø62	Ø63	Ø64	Ø65	Ø66	Ø67	Ø68	Ø69	Ø70	Ø71	Ø72	Ø73	Ø74	Ø75	Ø76	Ø77	Ø78	Ø79	Ø80	Ø81	Ø82	Ø83	Ø84	Ø85	Ø86	Ø87	Ø88	Ø89	Ø90	Ø91	Ø92	Ø93	Ø94	Ø95	Ø96	Ø97	Ø98	Ø99	Ø100	Ø101	Ø102	Ø103	Ø104	Ø105	Ø106	Ø107	Ø108	Ø109	Ø110	Ø111	Ø112	Ø113	Ø114	Ø115	Ø116	Ø117	Ø118	Ø119	Ø120	Ø121	Ø122	Ø123	Ø124	Ø125	Ø126	Ø127	Ø128	Ø129	Ø130	Ø131	Ø132	Ø133	Ø134	Ø135	Ø136	Ø137	Ø138	Ø139	Ø140	Ø141	Ø142	Ø143	Ø144	Ø145	Ø146	Ø147	Ø148	Ø149	Ø150	Ø151	Ø152	Ø153	Ø154	Ø155	Ø156	Ø157	Ø158	Ø159	Ø160	Ø161	Ø162	Ø163	Ø164	Ø165	Ø166	Ø167	Ø168	Ø169	Ø170	Ø171	Ø172	Ø173	Ø174	Ø175	Ø176	Ø177	Ø178	Ø179	Ø180	Ø181	Ø182	Ø183	Ø184	Ø185	Ø186	Ø187	Ø188	Ø189	Ø190	Ø191	Ø192	Ø193	Ø194	Ø195	Ø196	Ø197	Ø198	Ø199	Ø200	Ø201	Ø202	Ø203	Ø204	Ø205	Ø206	Ø207	Ø208	Ø209	Ø210	Ø211	Ø212	Ø213	Ø214	Ø215	Ø216	Ø217	Ø218	Ø219	Ø220	Ø221	Ø222	Ø223	Ø224	Ø225	Ø226	Ø227	Ø228	Ø229	Ø230	Ø231	Ø232	Ø233	Ø234	Ø235	Ø236	Ø237	Ø238	Ø239	Ø240	Ø241	Ø242	Ø243	Ø244	Ø245	Ø246	Ø247	Ø248	Ø249	Ø250	Ø251	Ø252	Ø253	Ø254	Ø255	Ø256	Ø257	Ø258	Ø259	Ø260	Ø261	Ø262	Ø263	Ø264	Ø265	Ø266	Ø267	Ø268	Ø269	Ø270	Ø271	Ø272	Ø273	Ø274	Ø275	Ø276	Ø277	Ø278	Ø279	Ø280	Ø281	Ø282	Ø283	Ø284	Ø285	Ø286	Ø287	Ø288	Ø289	Ø290	Ø291	Ø292	Ø293	Ø294	Ø295	Ø296	Ø297	Ø298	Ø299	Ø300	Ø301	Ø302	Ø303	Ø304	Ø305	Ø306	Ø307	Ø308	Ø309	Ø310	Ø311	Ø312	Ø313	Ø314	Ø315	Ø316	Ø317	Ø318	Ø319	Ø320	Ø321	Ø322	Ø323	Ø324	Ø325	Ø326	Ø327	Ø328	Ø329	Ø330	Ø331	Ø332	Ø333	Ø334	Ø335	Ø336	Ø337	Ø338	Ø339	Ø340	Ø341	Ø342	Ø343	Ø344	Ø345	Ø346	Ø347	Ø348	Ø349	Ø350	Ø351	Ø352	Ø353	Ø354	Ø355	Ø356	Ø357	Ø358	Ø359	Ø360	Ø361	Ø362	Ø363	Ø364	Ø365	Ø366	Ø367	Ø368	Ø369	Ø370	Ø371	Ø372	Ø373	Ø374	Ø375	Ø376	Ø377	Ø378	Ø379	Ø380	Ø381	Ø382	Ø383	Ø384	Ø385	Ø386	Ø387	Ø388	Ø389	Ø390	Ø391	Ø392	Ø393	Ø394	Ø395	Ø396	Ø397	Ø398	Ø399	Ø400	Ø401	Ø402	Ø403	Ø404	Ø405	Ø406	Ø407	Ø408	Ø409	Ø410	Ø411	Ø412	Ø413	Ø414	Ø415	Ø416	Ø417	Ø418	Ø419	Ø420	Ø421	Ø422	Ø423	Ø424	Ø425	Ø426	Ø427	Ø428	Ø429	Ø430	Ø431	Ø432	Ø433	Ø434	Ø435	Ø436	Ø437	Ø438	Ø439	Ø440	Ø441	Ø442	Ø443	Ø444	Ø445	Ø446	Ø447	Ø448	Ø449	Ø450	Ø451	Ø452	Ø453	Ø454	Ø455	Ø456	Ø457	Ø458	Ø459	Ø460	Ø461	Ø462	Ø463	Ø464	Ø465	Ø466	Ø467	Ø468	Ø469	Ø470	Ø471	Ø472	Ø473	Ø474	Ø475	Ø476	Ø477	Ø478	Ø479	Ø480	Ø481	Ø482	Ø483	Ø484	Ø485	Ø486	Ø487	Ø488	Ø489	Ø490	Ø491	Ø492	Ø493	Ø494	Ø495	Ø496	Ø497	Ø498	Ø499	Ø500	Ø501	Ø502	Ø503	Ø504	Ø505	Ø506	Ø507	Ø508	Ø509	Ø510	Ø511	Ø512	Ø513	Ø514	Ø515	Ø516	Ø517	Ø518	Ø519	Ø520	Ø521	Ø522	Ø523	Ø524	Ø525	Ø526	Ø527	Ø528	Ø529	Ø530	Ø531	Ø532	Ø533	Ø534	Ø535	Ø536	Ø537	Ø538	Ø539	Ø540	Ø541	Ø542	Ø543	Ø544	Ø545	Ø546	Ø547	Ø548	Ø549	Ø550	Ø551	Ø552	Ø553	Ø554	Ø555	Ø556	Ø557	Ø558	Ø559	Ø560	Ø561	Ø562	Ø563	Ø564	Ø565	Ø566	Ø567	Ø568	Ø569	Ø570	Ø571	Ø572	Ø573	Ø574	Ø575	Ø576	Ø577	Ø578	Ø579	Ø580	Ø581	Ø582	Ø583	Ø584	Ø585	Ø586	Ø587	Ø588	Ø589	Ø590	Ø591	Ø592	Ø593	Ø594	Ø595	Ø596	Ø597	Ø598	Ø599	Ø600	Ø601	Ø602	Ø603	Ø604	Ø605	Ø606	Ø607	Ø608	Ø609	Ø610	Ø611	Ø612	Ø613	Ø614	Ø615	Ø616	Ø617	Ø618	Ø619	Ø620	Ø621	Ø622	Ø623	Ø624	Ø625	Ø626	Ø627	Ø628	Ø629	Ø630	Ø631	Ø632	Ø633	Ø634	Ø635	Ø636	Ø637	Ø638	Ø639	Ø640	Ø641	Ø642	Ø643	Ø644	Ø645	Ø646	Ø647	Ø648	Ø649	Ø650	Ø651	Ø652	Ø653	Ø654	Ø655	Ø656	Ø657	Ø658	Ø659	Ø660	Ø661	Ø662	Ø663	Ø664	Ø665	Ø666	Ø667	Ø668	Ø669	Ø670	Ø671	Ø672	Ø673	Ø674	Ø675	Ø676	Ø677	Ø678	Ø679	Ø680	Ø681	Ø682	Ø683	Ø684	Ø685	Ø686	Ø687	Ø688	Ø689	Ø690	Ø691	Ø692	Ø693	Ø694	Ø695	Ø696	Ø697	Ø698	Ø699	Ø700	Ø701	Ø702	Ø703	Ø704	Ø705	Ø706	Ø707	Ø708	Ø709	Ø710	Ø711	Ø712	Ø713	Ø714	Ø715	Ø716	Ø717	Ø718	Ø719	Ø720	Ø721	Ø722	Ø723	Ø724	Ø725	Ø726	Ø727	Ø728	Ø729	Ø730	Ø731	Ø732	Ø733	Ø734	Ø735	Ø736	Ø737	Ø738	Ø739	Ø740	Ø741	Ø742	Ø743	Ø744	Ø745	Ø746	Ø747	Ø748	Ø749	Ø750	Ø751	Ø752	Ø753	Ø754	Ø755	Ø756	Ø757	Ø758	Ø759	Ø760	Ø761	Ø762	Ø763	Ø764	Ø765	Ø766	Ø767	Ø768	Ø769	Ø770	Ø771	Ø772	Ø773	Ø774	Ø775	Ø776	Ø777	Ø778	Ø779	Ø780	Ø781	Ø782	Ø783	Ø784	Ø785	Ø786	Ø787	Ø788	Ø789	Ø790	Ø791	Ø792	Ø793	Ø794	Ø795	Ø796	Ø797	Ø798	Ø799	Ø800	Ø801	Ø802	Ø803	Ø804	Ø805	Ø806	Ø807	Ø808	Ø809	Ø810	Ø811	Ø812	Ø813	Ø814	Ø815	Ø816	Ø817	Ø818	Ø819	Ø820	Ø821	Ø822	Ø823	Ø824	Ø825	Ø826	Ø827	Ø828	Ø829	Ø830	Ø831	Ø832	Ø833	Ø834	Ø835	Ø836	Ø837	Ø838	Ø839	Ø840	Ø841	Ø842	Ø843	Ø844	Ø845	Ø846	Ø847	Ø848	Ø849	Ø850	Ø851	Ø852	Ø853	Ø854	Ø855	Ø856	Ø857	Ø858	Ø859	Ø860	Ø861	Ø862	Ø863	Ø864	Ø865	Ø866	Ø867	Ø868	Ø869	Ø870	Ø871	Ø872	Ø873	Ø874	Ø875	Ø876	Ø877	Ø878	Ø879	Ø880	Ø881	Ø882	Ø883	Ø884	Ø885	Ø886	Ø887	Ø888	Ø889	Ø890	Ø891	Ø892	Ø893	Ø894	Ø895	Ø896	Ø897	Ø898	Ø899	Ø900	Ø901	Ø902	Ø903	Ø904	Ø905	Ø906	Ø907	Ø908	Ø909	Ø910	Ø911	Ø912	Ø913	Ø914	Ø915	Ø916	Ø917	Ø918	Ø919	Ø920	Ø921	Ø922	Ø923	Ø924	Ø925	Ø926	Ø927	Ø928	Ø929	Ø930	Ø931	Ø932	Ø933	Ø934	Ø935	Ø936	Ø937	Ø938	Ø939	Ø940	Ø941	Ø942	Ø943	Ø944	Ø945	Ø946	Ø947	Ø948	Ø949	Ø950	Ø951	Ø952	Ø953	Ø954	Ø955	Ø956	Ø957	Ø958	Ø959	Ø960	Ø961	Ø962	Ø963	Ø964	Ø965	Ø966	Ø967	Ø968	Ø969	Ø970	Ø971	Ø972	Ø973	Ø974	Ø975	Ø976	Ø977	Ø978	Ø979	Ø980	Ø981	Ø982	Ø983	Ø984	Ø985	Ø986	Ø987	Ø988	Ø989	Ø990	Ø991	Ø992	Ø993	Ø994	Ø995	Ø996	Ø997	Ø998	Ø999	Ø1000	Ø1001	Ø1002	Ø1003	Ø1004	Ø1005	Ø1006	Ø1007	Ø1008	Ø1009	Ø1010	Ø1011	Ø1012	Ø1013	Ø1014	Ø1015	Ø1016	Ø1017	Ø1018	Ø1019	Ø1020	Ø1021	Ø1022	Ø1023	Ø1024	Ø1025	Ø1026	Ø1027	Ø1028	Ø1029	Ø1030	Ø1031	Ø1032	Ø1033	Ø1034	Ø1035	Ø1036	Ø1037	Ø1038	Ø1039	Ø1040	Ø1041	Ø1042	Ø1043	Ø1044	Ø1045	Ø1046	Ø1047	Ø1048	Ø1049	Ø1050	Ø1051	Ø1052	Ø1053	Ø1054	Ø1055	Ø1056	Ø1057	Ø1058	Ø1059	Ø1060	Ø1061	Ø1062	Ø1063	Ø1064	Ø1065	Ø1066	Ø1067	Ø1068	Ø1069	Ø1070	Ø1071	Ø1072	Ø1073	Ø1074	Ø1075	Ø1076	Ø1077	Ø1078	Ø1079	Ø1080	Ø1081	Ø1082	Ø1083	Ø1084	Ø1085	Ø1086	Ø1087	Ø1088	Ø1089	Ø1090	Ø1091	Ø1092	Ø1093	Ø1094	Ø1095	Ø1096	Ø1097	Ø1098	Ø1099	Ø1100	Ø1101	Ø1102	Ø1103	Ø1104	Ø1105	Ø1106	Ø1107	Ø1108	Ø1109	Ø1110	Ø1111	Ø1112	Ø1113	Ø1114	Ø1115	Ø1116	Ø1117	Ø1118	Ø1119	Ø1120	Ø1121	Ø1122	Ø1123	Ø1124	Ø1125	Ø1126	Ø1127	Ø1128	Ø1129	Ø1130	Ø1131	Ø1132	Ø1133	Ø1134	Ø1135	Ø1136	Ø1137	Ø1138	Ø1139	Ø1140	Ø1141	Ø1142	Ø1143	Ø1144	Ø1145	Ø1146	Ø1147	Ø1148	Ø1149	Ø1150	Ø1151	Ø1152	Ø1153	Ø1154	Ø1155	Ø1156	Ø1157	Ø1158	Ø1159	Ø1160	Ø1161	Ø1162	Ø1163	Ø1164	Ø1165	Ø1166	Ø1167	Ø1168	Ø1169	Ø1170	Ø1171	Ø1172	Ø1173	Ø1174	Ø1175	Ø1176	Ø1177	Ø1178	Ø1179	Ø1180	Ø1181	Ø1182	Ø1183	Ø1184	Ø1185	Ø1186	Ø1187	Ø1188	Ø1189	Ø1190	Ø1191	Ø1192	Ø1193	Ø1194	Ø1195	Ø1196	Ø1197	Ø1198	Ø1199	Ø1200	Ø1201	Ø1202	Ø1203	Ø1204	Ø1205	Ø1206	Ø1207	Ø1208	Ø1209	Ø1210	Ø1211	Ø1212	Ø1213	Ø1214	Ø1215	Ø1216	Ø1217	Ø1218	Ø1219	Ø1220	Ø1221	Ø1222	Ø1223	Ø1224	Ø1225	Ø1226	Ø1227	Ø1228	Ø1229	Ø1230	Ø1231	Ø1232	Ø1233	Ø1234	Ø1235	Ø1236	Ø1237	Ø1238	Ø1239	Ø1240	Ø1241	Ø1242	Ø1243	Ø1244	Ø1245	Ø1246	Ø1247	Ø1248	Ø1249	Ø1250	Ø1251	Ø1252	Ø1253	Ø1254	Ø1255	Ø1256	Ø1257	Ø1258	Ø1259	Ø1260	Ø1261	Ø1262	Ø1263	Ø1264	Ø1265	Ø1266	Ø1267	Ø1268	Ø1269	Ø1270	Ø1271	Ø1272	Ø1273	Ø1274	Ø1275	Ø1276	Ø1277	Ø1278	Ø1279	Ø1280	Ø1281	Ø1282	Ø1283	Ø1284	Ø1285	Ø1286	Ø1287	Ø1288	Ø1289	Ø1290	Ø1291	Ø1292	Ø1293	Ø1294	Ø1295	Ø1296	Ø1297	Ø1298	Ø1299	Ø1300	Ø1301	Ø1302	Ø1303	Ø1304	Ø1305	Ø1306	Ø1307	Ø1308	Ø1309	Ø1310	Ø1311	Ø1312	Ø1313	Ø1314	Ø1315	Ø1316	Ø1317	Ø1318	Ø1319	Ø1320	Ø1321	Ø1322	Ø1323	Ø1324	Ø1325	Ø1326	Ø1327	Ø1328	Ø1329	Ø1330	Ø1331	Ø1332	Ø1333
---------------	---------------	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

A tubulação projetada para o alto recalque é de diâmetro nominal de 250 mm, perfazendo uma linha total de 6.689,12 metros.

O diâmetro nominal de 250 mm é o que se mostrou mais econômico no estudo, bem como a disponibilidade no almoxarifado da companhia.

Na Tabela 2 estão relacionados, no padrão da SABESP, os componentes de custos e hidráulicos de 4 diâmetros de tubulação de recalque para avaliação do mais viável economicamente. No custo anual são considerados o custo anual de energia gasto pelos conjuntos elevatórios, a manutenção dos mesmos e a amortização e juros dos conjuntos e da tubulação.

Tabela 2. Comparativo de custos entre 4 diâmetros possíveis para a tubulação de recalque.

ITEM	ESPECIFICAÇÕES	DIÂMETROS			
0	DIÂMETRO (MM)	200	250	300	350
0	EFICIÊNCIA DA BOMBA (%)	80,8	80,8	80,8	80,8
0	NÚMERO DE BOMBAS	2	2	2	2
0	HORAS DE TRABALHO (bomba dia ⁻¹)	18	18	18	18
0	CUSTO DO KWH (R\$ h ⁻¹)	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311
0	CUSTO DA DEMANDA (R\$ kW ⁻¹ mês ⁻¹)	3,79	3,79	3,79	3,79
0	DESCONTO ENERGIA (%)	15	15	15	15
0	CUSTO DA TUBULAÇÃO (R\$ m ⁻¹)	151,5	166,14	183,61	225,23
0	CUSTO DE 1 CONJ. ELEVAT. (R\$)	37.533,00	25.200,00	22.794,00	21.534,00
0	JUROS ANUAL P/ CANALIZAÇÃO (%)	12,00	12,00	12,00	12,00
0	JUROS ANUAL P/ CONJ ELEVAT. (%)	12,00	12,00	12,00	12,00
0	PRAZO DE PAG. CANALIZ. (anos)	30,00	30,00	30,00	30,00
0	PRAZO DE PAG. CONJ. ELEV. (anos)	10,00	10,00	10,00	10,00
0	SOMATÓRIO DOS K LOCALIZADOS (m)	15,00	15,00	15,00	15,00
0	COEFICIENTE HAZEN WILLIAMS (adimensional)	100	100	100	100
1	VAZÃO (Ls ⁻¹)	38,89	38,89	38,89	38,89
2	COMPRIMENTO (m)	6.689,12	6.689,12	6.689,12	6.689,12
3	NÍVEL ÁGUA MONTANTE (m)	708,90	708,90	708,90	708,90
4	NÍVEL ÁGUA JUSANTE (m)	814,85	814,85	814,85	814,85
5	ALTURA GEOMÉTRICA (m)	105,95	105,95	105,95	105,95
6	VELOCIDADE (ms ⁻¹)	1,24	0,79	0,55	0,40
7	PERDA CARGA UNITÁRIA (mm ⁻¹)	0,0131	0,0044	0,0018	0,0009
8	PERDA CARGA POR ATRITO (m)	87,82	29,66	12,21	5,77
9	PERDA CARGA LOCALIZADA (m)	1,17	0,48	0,23	0,12
10	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (m)	194,95	136,09	118,40	111,84
11	POTÊNCIA REQUERIDA (cv)	125,11	87,33	75,98	71,78
12	CONSUMO MENSAL ENERGIA (KWh mês ⁻¹)	49.722,34	34.709,42	30.197,46	28.526,60
13	CUSTO ANUAL ENERGIA (R\$ ano ⁻¹)	25.450,73	17.766,26	15.456,78	14.601,54
14	CUST ADUTORA (R\$)	1.013.401,68	1.111.330,40	1.228.189,32	1.506.590,50
15	CUST TOTAL CONJUNTO ELEVATÓRIO (R\$)	75.066,00	50.400,00	45.588,00	43.068,00
16	MANUTENÇÃO DOS CONJUNTOS ELEVATÓRIOS (R\$)	3.002,64	2.016,00	1.823,52	1.722,72
17	AMORTIZAÇÃO JUROS DA CANALIZAÇÃO (R\$ ano ⁻¹)	125.807,39	137.964,62	152.471,91	187.033,65
18	AMORTIZAÇÃO JUROS DAS BOMBAS (R\$ ano ⁻¹)	13.285,49	8.920,00	8.068,35	7.622,35
19	CUSTO TOTAL ANUAL (R\$ ano ⁻¹) = 13+16+17+18	167.546,25	166.666,88	177.820,57	210.980,27

A análise do diâmetro econômico faz parte da rotina de trabalho na definição de projetos de sistemas adutores na SABESP, contudo no presente trabalho o que se propôs foi para o diâmetro de 250 mm, que se mostrou o mais viável economicamente,

qual combinação de materiais se mostraria mais adequado, considerando a ocorrência do transiente hidráulico.

A maior parte do caminhamento da adutora é em via rural não pavimentada com uma travessia aérea sobre córrego sem denominação, afluente do Ribeirão Pinheirinho. No perímetro urbano a pavimentação é de asfalto.

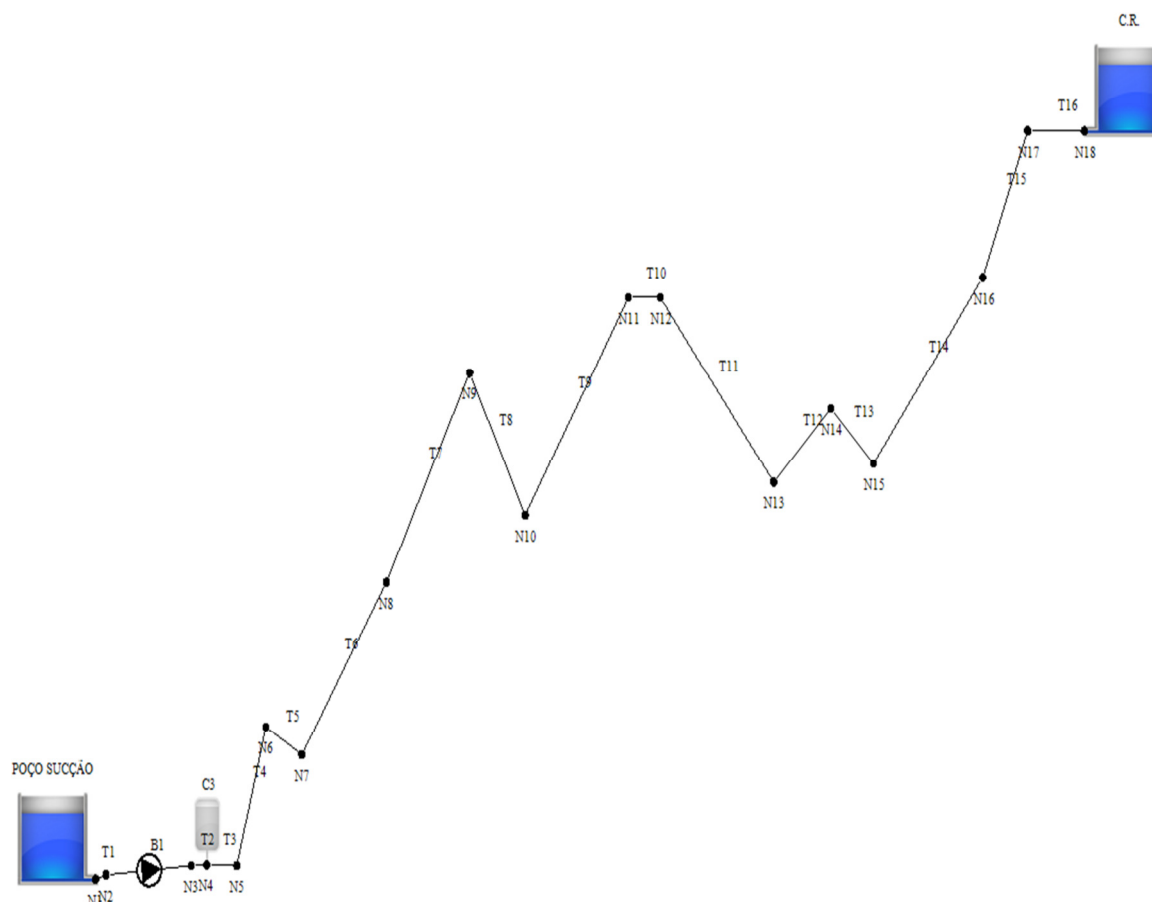


Figura 30. Perfil linearizado do caminhamento feito no programa Allievi: i) Poço sucção – elemento reservatório que no caso é de montante; ii) CR – elemento reservatório de jusante; iii) Ni – elemento nó, o qual o programa atribui uma determinada denominação e interliga dois outros elementos e também determina os pontos de inflexão da linha e mudança de material e diâmetro, quando for o caso; iv) Ti – elemento tubulação, define material, extensão, diâmetro e espessura; v) Bi – elemento estação de bombeamento (GMB); vi) Ci – elemento reservatório hidropneumático.

Na Tabela 3 são apresentados os dados topográficos e os dados da adutora utilizados nas simulações. Além desses foram obtidos: i) Cota do terreno do poço de sucção: 708,90 m; ii) Cota inicial do nível da água no poço de sucção: 717,72 m; iii) Cota do terreno do GMB: 708,90 m; iv) Cota do terreno do centro de reservação: 814,85 m; v) Cota do nível máximo de água no reservatório: 823,67 m; vi) Diâmetro da tubulação:

250 mm; vii) Extensão da linha de recalque: 6.689,12 m; viii) Desnível geométrico entre a cota inicial do nível da água no poço de sucção e a cota do nível da água no Centro de reservação é de 105,95 m.

Tabela 3. Dados topográficos e da adutora utilizados nas simulações.

Trecho	Ni (m)	Cin (m)	Nfin (m)	Cfin (m)	Øint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m s ⁻¹)	K (mm)
T1	N1	708,90	N2	708,90	314,6	52,40	5,7	1.033,52	0,10
T2	N3	708,90	N4	708,90	263	151,87	5,5	1.068,45	0,10
T3	N4	708,90	N5	708,90	263	52,40	5,5	1.068,45	0,10
T4	N5	708,90	N6	725,95	263	267,00	5,5	1.068,45	0,10
T5	N6	725,95	N7	723,55	263	160,20	5,5	1.068,45	0,10
T6	N7	723,55	N8	743,65	263	631,90	5,5	1.068,45	0,10
T7	N8	743,65	N9	783,75	263	745,82	5,5	1.068,45	0,10
T8	N9	783,75	N10	755,00	263	714,77	5,5	1.068,45	0,10
T9	N10	755,00	N11	783,60	252	667,83	11	368,92	0,06
T10	N11	783,60	N12	783,60	252	52,40	11	368,92	0,06
T11	N12	783,60	N13	752,32	252	991,66	11	368,92	0,06
T12	N13	752,32	N14	763,65	252	235,94	11	368,92	0,06
T13	N14	763,65	N15	757,95	252	202,79	11	368,92	0,06
T14	N15	757,95	N16	798,15	252	1003,98	11	368,92	0,06
T15	N16	798,15	N17	808,10	252	323,78	11	368,92	0,06
T16	N17	808,10	N18	814,85	252	486,78	11	368,92	0,06

Ni: Nó inicial; Cin: Cota inicial; Cfin: cota final; Nfin: nó final; Øint: diâmetro interno; e: espessura; K: rugosidade.

As características das tubulações foram obtidas dos catálogos do fabricante, sendo para o tubo de ferro fundido dúctil a empresa Saint-Gobain Canalização e para a tubulação de PVC a empresa Amanco. Os materiais utilizados nas simulações são muito comuns entre as empresas de saneamento.

As principais informações dos catálogos dos fabricantes das tubulações podem ser vistos no Apêndice.

Não foi simulado com tubos de PVC 12 DeFoFo sem ou com proteção devido que as pressões no regime permanente no trecho inicial da linha estão acima da pressão de serviço admissível da tubulação, o PVC 12 DeFoFo suporta 1,0 MPa e os 1.000 m iniciais da linha possuem pressão acima desse valor.

5.3 Programa Allievi

Para análise da adutora de água desde o tanque de sucção até o Centro de Reservação da cidade de Torrinha foi utilizado o programa computacional Allievi.

O Allievi é um programa de cálculo desenvolvido pela Universidade de Valência para analisar e verificar os efeitos transitórios de manobras efetuadas nos elementos do sistema hidráulico.

A utilização do programa se deve à facilidade da entrada e configuração dos dados, 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 e possui uma interface de apresentação dos resultados das análises em planilhas eletrônicas, gráficos e vídeo de fácil manipulação.

Para sistemas de condutos forçados o programa utiliza o Método das Características (MOC). A partir de 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 para a determinação da carga piezométrica e da velocidade ambas em função do tempo e do espaço (x – espaço e t – tempo).

A forma desse sistema de equações é:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

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 Δt e em pontos x específicos (separados de uma distância Δx) obedecendo a condição:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a \quad (36)$$

Sendo a a celeridade da onda de pressão na tubulação. Esta celeridade, no caso da água, é calculada utilizando a equação:

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{47,6 + C \frac{D}{e}}} \quad (37)$$

Sendo que o coeficiente C depende do material da tubulação, e é a espessura da parede da tubulação e D é o diâmetro da tubulação.

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

$$\left. \begin{aligned} H_i^{n+1} - H_{i+1}^n + \frac{a}{g}(V_i^{n+1} - V_{i-1}^n) + \frac{\int_{i-1}^n \Delta x}{D} V_{i-1}^n |V_{i-1}^n| &= 0 \\ H_i^{n+1} - H_{i+1}^n - \frac{a}{g}(V_i^{n+1} - V_{i-1}^n) - \frac{\int_{i-1}^n \Delta x}{D} V_{i-1}^n |V_{i-1}^n| &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Com as quais se podem calcular a carga piezométrica H e a velocidade V , na i -ésima 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 .

O sistema (38) 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; estas serão as “condições de contorno” do problema a ser resolvido.

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 vários tipos.
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.

Para a simulação hidráulica o programa necessita de elementos que se interconectem 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 foram os seguintes:

1. Nós: elemento que interliga outros elementos e normalmente está nos pontos de inflexão da adutora. É necessário definir a cota.
2. Trechos: ou tubulação, é o elemento que define as características das tubulações. Dados necessários para a caracterização são extensão, diâmetro interno e espessura da parede.
3. Reservatórios: elementos que armazenam água à pressão atmosférica, sendo necessário fornecer diversas variáveis. Para a simulação do trabalho, devido ser reservatório de grande dimensão, são necessárias somente as cotas do terreno e cota inicial do nível d'água.
4. Bomba: elemento que indica o grupo moto bomba (GMB). Necessário fornecer números de bombas; cota; curva da bomba por pontos ou universal; rotação; tipo de válvula; inércia do GMB.
5. Reservatório Hidropneumático (RHO): elemento adotado de proteção contra o transiente. Para a verificação, deve-se fornecer quantidade de RHOs; diâmetro interno; comprimento; cota da base e rugosidade das paredes do RHOs.

5.4 Simulação

Primeiramente foi simulada a operação do sistema de captação, em regime permanente a fim de determinar os pontos ou Nós de interesse na análise do transiente. Normalmente os pontos de interesse são os pontos que apresentam maior carga e pontos de inflexão da adutora. Em seguida foram realizadas as simulações em regime transitório; com diferentes combinações de materiais e com ou sem uso de dispositivos de proteção contra do transiente. No total foram realizadas 5 simulações (S1, S2, S3, S4 e S5).

Simulação 1 (S1): regime permanente;

Simulação 2 (S2): linha com tubos de ferro fundido sem proteção;

Simulação 3 (S3): linha com tubos de PVC-O sem proteção;

Simulação 4 (S4): linha com tubos de PVC-O com proteção;

Simulação 5 (S5): linha com tubos de ferro fundido e de PVC 12 DeFoFo com proteção.

5.4.1 Tempo de simulação para determinação dos transientes mínimo e máximo.

Nas simulações S2, S3, S4 e S5 foi utilizado o tempo de 195 s, configurando o GMB inicialmente desligado, iniciando a manobra de arranque em 10 s e levando 30 s para entrar em regime de rotação nominal e no nonagésimo segundo (90) o instante em que o GMB pára.

Posteriormente variou-se o tempo de simulação para 500, 1.000 e 2.000 s visando verificar se os efeitos mais severos do transiente ocorrem dentro do tempo padrão do programa ou não.

O tempo de 195 s de simulação é o tempo “default” do programa Allievi em que se tem o resultado com a utilização de equipamentos computacionais de porte comercial. Outros programas também utilizam uma faixa entre 120 s e 190 s de tempo padrão para a determinação do transiente máximo e mínimo.

5.4.2 Celeridade

Para a determinação do transiente hidráulico pelo programa é necessário definir a celeridade dos materiais utilizados nas tubulações. Pode-se calcular a celeridade pela equação 37 e inserir o resultado no programa ou calcular a celeridade por meio de ferramenta disponível no programa. Ao abrir o assistente para cálculo da celeridade é incitado a fornecer o coeficiente C cujo valor o programa para o elemento “Trechos” fornece relação de C a ser utilizado em função do material. A Figura 31 apresenta a ferramenta para a digitação do valor do coeficiente C para o trecho de tubulação T1:

Cálculo celeridade da tubulação T1 X

Cálculo da celeridade da tubulação selecionada

Permite atribuir um valor para a celeridade ou calculá-lo mediante a introdução de três parâmetros

☒ **Especificar celeridade**

Celeridade (m/s)

☐ **Calcular celeridade**

Diâmetro (mm)

Espessura (mm)

Coef. material

Celeridade (m/s)

Coefficientes do material da tubulação

Coeficiente: $CMT = 1.0E+6 / ModElastTub(Kp/cm^2)$

Aço:..... 0.5 MET = $(2.0 - 2.12)E+6 Kp/cm^2$

Fo.Fo:..... 0.6 - 1.3 MET = $(0.80 - 1.70)E+6 Kp/cm^2$

Concreto:..... 3.3 - 7.1 MET = $(0.14 - 0.30)E+6 Kp/cm^2$

H. arm. camisa chapa:.. 2.5 MET = $0.39E+6 Kp/cm^2$

PVC Rígido:..... 36 - 42 MET = $(2.40 - 2.75)E+4 Kp/cm^2$

Figura 31. Assistente para cálculo da celeridade e/ou digitação para o trecho da tubulação selecionada.

Ao acionar o botão “Calcular celeridade” do assistente é necessário digitar o valor do coeficiente C correspondente ao material da tubulação conforme Tabela 5. As variáveis diâmetro e espessura são automaticamente preenchidas conforme digitado para o trecho em questão. Digitando o coeficiente a celeridade é calculada pela equação 37 e apresentada na janela correspondente. Para terminar a ação deve-se clicar no botão salvar. A Figura 32 mostra o cálculo para a tubulação de ferro fundido de diâmetro interno de 263 mm, espessura da parede de 5,5 m e coeficiente C de 0,80 que tem como resultado a celeridade de 1.068 m s^{-1} .

Para o material de PVC DeFoFo 12, utilizou-se o valor de celeridade calculado pelo Tomaz (2010), para obter-se essa celeridade no programa o coeficiente utilizado foi de 29,35. Para o material PVC-O utilizou-se o menor valor do coeficiente tabelado no programa levando dessa maneira a um valor maior de celeridade, vide tabela 5 com os resultados da celeridade.

 Cálculo celeridade da tubulação T7 ×

Cálculo da celeridade da tubulação selecionada

Permite atribuir um valor para a celeridade ou calculá-lo mediante a introdução de três parâmetros

☐ Especificar celeridade

Celeridade (m/s)

☒ Calcular celeridade

Diâmetro (mm)

Espessura (mm)

Coef. material

Celeridade (m/s)

Coefficientes do material da tubulação

Coefficiente: CMT = 1.0E+6/ModElastTub(Kp/cm2)

Aço:..... 0.5 MET = (2.0 - 2.12)E+6 Kp/cm2

Fo.Fo.:..... 0.6 - 1.3 MET = (0.80 - 1.70)E+6 Kp/cm2

Concreto:..... 3.3 - 7.1 MET = (0.14 - 0.30)E+6 Kp/cm2

H. arm. camisa chapa:.. 2.5 MET = 0.39E+6 Kp/cm2

PVC Rígido:..... 36 - 42 MET = (2.40 - 2.75)E+4 Kp/cm2

Figura 31. Assistente para cálculo da celeridade para trecho com tubulação de ferro fundido diâmetro interno de 263 mm, espessura da parede de 5,5 mm.

Para os materiais foi calculada a celeridade com o assistente do programa que forneceu os seguintes resultados apresentados na Tabela 4 com exceção da celeridade do PVC 12 DeFoFo que foi utilizado o valor conforme Tomaz (2010).

Tabela 4. Materiais das tubulações e parâmetros para cálculo da Celeridade (a).

Material	Dinterno (mm)	Espessura da parede (mm)	Coefficiente C	Celeridade (m s ⁻¹)
Ferro Fundido*	314,6	5,7	0,80	1.034
Ferro Fundido	263	5,5	0,80	1.068
PVC 12 DeFoFo	252	11	29,35	369
PVC-O	258,8	7,6	2,40	871

* Tubulação utilizada entre o poço de sucção e o GMB, tubulação de sucção não estudada no trabalho.

5.4.3 Conjunto moto bomba

As informações requeridas pelo programa em relação ao conjunto moto bomba são: a curva característica da bomba; rendimento; rotação de regime,

rotação nominal e inércia do conjunto. A inércia do conjunto é calculada pelo programa pela fórmula de Thorley:

$$I = 0,03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0,9556} + 0,0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1,48} \quad (39)$$

Sendo: I : momento de inércia do grupo em kg m²;

P : potência nominal do grupo em kW,

N : velocidade de rotação nominal em mil rpm.

O termo $0,03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0,9556}$ representa o momento de inércia da bomba e o termo $0,0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1,48}$ o momento de inércia do motor elétrico de acionamento.

Neste estudo a inércia do conjunto foi de 0,35 kg m².

Na Figura 32 mostra o assistente de cálculo do momento de inércia que pode ser digitado ou calculado.

Figura 32. Assistente para digitação ou cálculo do momento de inércia do GMB pelo programa.

Outro parâmetro que deve ser configurado é se o GMB (Figura 33) inicialmente encontra-se ligado ou desligado. No caso de inicialmente ligado deve-se completar os seguintes dados:

- Instante de parada (Inst. par.): É o instante em que se desconectam simultaneamente todos os grupos da Estação de Bombeamento.
- Voltar-se-á a ligar? (Sim – Não): Indica se os grupos serão ligados novamente, ou não, após o desligamento.
- Instante de religar: Em caso de ser religado, este é o instante que se produzirá o ligar simultâneo dos grupos (instante posterior ao do desligamento).
- Tempo de aceleração. Em caso de religar é a duração para se atingir, em evolução linear com o tempo, a rotação de regime dos grupos.

Para o GMB inicialmente desligado, o procedimento será:

- Instante no qual se ligam os grupos: É o instante em que se ligam simultaneamente todos os grupos da Estação de Bombeamento.
- Duração da aceleração: É o intervalo de tempo utilizado em evolução linear para que os grupos atinjam a rotação de regime.
- Desligar-se-ão os grupos? (Sim – Não): Indica se os grupos irão ser desligados ou não depois de ligados.
- Instante de parada: Em caso de desligar este é o instante no qual se produzirá o desligamento simultâneo dos grupos (instante posterior ao de ligar).

Parada/Arranque						
Inicial	Inst. par.	Novo arr	Inst. arr.	Duração	Nova par	Inst. par.
Paradas ▾		▾	10	30	SI ▾	90

Figura 33. Assistente para configuração de funcionamento do GMB.

5.4.4 Dispositivo de proteção

O programa necessita das seguintes informações (Figura 34):

- Número de calderins: É o número de calderins iguais, instalados em paralelo, que constituem a estrutura de proteção. Calderin é a denominação de reservatório hidropneumático na linguagem nativa do programa.

- b) Diâmetro: É o diâmetro interno do calderin em metros.
- c) Comprimento: É o comprimento do corpo paralelo do calderin, suposto cilíndrico em metros.
- d) Volume: É o volume total do calderin em metros cúbicos, calculado pelo programa ao se dispor do diâmetro e do comprimento do calderin, um volume inicial do RHO, na prática pode ser adotado como sendo 5% do volume da adutora para a primeira calibração.
- e) Cota da base: É a cota da base ou da aresta inferior do calderin em metros.
- f) Rugosidade absoluta: É a rugosidade absoluta das paredes internas do calderin.

Calderins - Dados Básicos							
Nome	Nó	Zu (m)	Num	Act			
C3	N4	708.9	1	☐			

Características físicas do calderin							
D (m)	L (m)	V (m ³)	Rug (mm)	Zb (m)	Posição	Bexiga	P (m)
1	1.8	1.4137166	6	708.9	Vertical ▾	SI ▾	32.75 Calc.

Figura 34. Assistente para configuração do elemento de proteção.

O RHO pode ser com bexiga ou não e deve ser calculada a pressão do gás a ser inflado na bexiga ou no RHO.

Para o RHO sem bexiga, o inflado se realizará fechando a válvula no ramal de conexão do RHO 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 a seguinte:

$$P_h V_{RHO} = P_{gás} V_{gásRHO} \quad (40)$$

Sendo: P_h : Pressão de inchado em valor absoluto, conforme a Figura 35. Para determinar a pressão de inchado em valor relativo deverá ser subtraído o valor da pressão atmosférica em metros.

V_{RHO} : Volume total do RHO em metros cúbicos.

$P_{gás}$: Pressão do gás em valor absoluto nas condições de operação em metros. Em RHOs 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 RHOs, e somando a pressão atmosférica.

$V_{\text{gásRHO}}$: Volume do gás no interior do RHO em condições de operação da estação de bombeamento em metros cúbicos.

Na prática, admite-se a relação entre volume inicial de gás e de água no RHO como sendo um terço do volume do RHO para o gás e dois terços do volume do RHO com água.

No Allievi o usuário pode introduzir o valor da pressão de inchado ou utilizar o assistente introduzindo o valor do volume inicial de gás em metros cúbicos e a pressão inicial do gás em metros; o assistente calculará automaticamente a pressão de inchado do RHO (Figura 35).

Figura 35. Assistente de cálculo da pressão inicial da bexiga do RHO.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados da Simulação S1 – regime permanente observa-se que os Nós números 3, 9, 10, 12, 16 e 17 (Tabela 5) são os pontos de interesse para as simulações em regime transitório por que apresentaram as maiores pressões e/ou cotas piezométricas, pontos de inflexão do perfil da adutora. Sendo que o Nó 3 localizado na saída do grupo moto bomba foi o que apresentou o maior valor de pressão 132,40 mca.

Os Nós 4, 5, 6 e 7 apesar de terem pressões elevadas podem ser analisados somente pelo Nó 3 devido à localização e cotas entre os mesmos.

Os Nós 1e 2 são nós que estão na sucção do grupo moto bomba e não foram analisados. A velocidade da água em toda a extensão da adutora ficou abaixo de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, o que é recomendado segundo o critério de dimensionamento econômico de condutos forçados (TSUTIYA, 2006). Para os trechos de tubulação se tem os resultados conforme Tabela 6 e para o grupo moto bomba (GMB) se tem os resultados conforme a Tabela 7.

Tabela 5. Cota do terreno (CT), carga piezométrica (CP) e pressão em cada Nó.

NÓ	CT (mca)	CP (mca)	Pr. (mca)
N3	708,9	841,3	132,40
N4	708,9	840,94	132,04
N5	708,9	840,81	131,91
N6	725,95	840,18	114,23
N7	723,55	839,79	116,24
N8	743,65	838,28	94,63
N9	783,75	836,5	52,75
N10	755,00	834,79	79,79
N11	783,60	832,92	49,32
N12	783,60	832,77	49,17
N13	752,32	829,99	77,67
N14	763,65	829,33	65,68
N15	757,95	828,76	70,81
N16	798,15	825,94	27,79
N17	808,10	825,03	16,93
N18	814,85	823,67	8,82

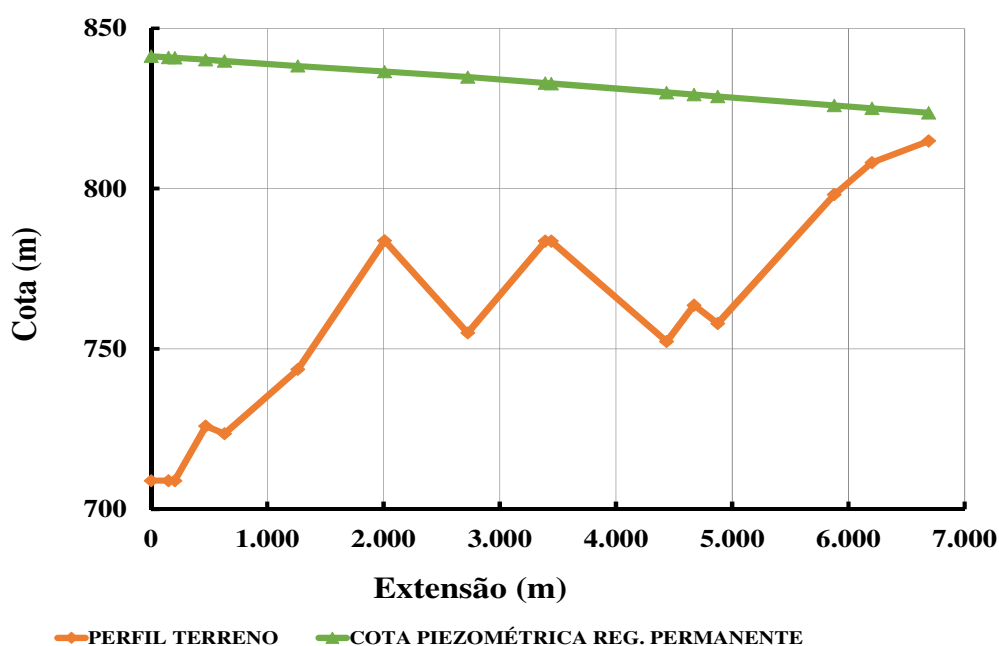
Tabela 6. Vazão (Q), velocidade (V), fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach (f) e perda distribuída na tubulação (h) nas tubulações.

Trecho	Q (L s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	f (adimensional)	hf _{TRECHO} (m)
T2	44,60	0,82	0,01831	0,36
T3	44,60	0,82	0,01831	0,13
T4	44,60	0,82	0,01831	0,64
T5	44,60	0,82	0,01831	0,38
T6	44,60	0,82	0,01831	1,51
T7	44,60	0,82	0,01831	1,78
T8	44,60	0,82	0,01831	1,71
T9	44,60	0,89	0,01734	1,87
T10	44,60	0,89	0,01734	0,15
T11	44,60	0,89	0,01734	2,78
T12	44,60	0,89	0,01734	0,66
T13	44,60	0,89	0,01734	0,57
T14	44,60	0,89	0,01734	2,82
T15	44,60	0,89	0,01734	0,91
T16	44,60	0,89	0,01734	1,36

Tabela 7. Vazão (Q), altura manométrica (H), potência e rendimento do GMB.

NOME	BOMBAS	Q (L s ⁻¹)	H (m)	POTÊNCIA (cv)	RENDIMENTO (%)
B1	1	44,6	123,7	85,0	86,6

Nota-se na Figura 36 que para o regime permanente, não há variação de vazão ou pressão para o mesmo ponto durante o bombeamento.

**Figura 36.** Cota piezométrica no regime permanente.

6.1. Simulação 2 –S2

Os resultados das pressões máximas e mínimas da simulação 2, regime transitório com tubulação de ferro fundido sem elemento de proteção e no período de 195 segundos, são apresentados na Tabela 8, sendo as envoltórias apresentadas na Figura 39.

Quando o regime de escoamento é transitório, os pontos de inflexão selecionados apresentaram incrementos na pressão máxima e os Nós 9 a 17 apresentaram pressões mínimas menores que a pressão de vapor d'água (9,8 mca), o que estabeleceria condições para formação de vácuo e quebra da coluna líquida especialmente nos Nós 9, 11, 12 e 14.

Tabela 8. Simulação 2 - Pressões máximas e mínimas com tubos de ferro fundido sem elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.

NÓ	CT (m)	Tempo (s)	Pr. Máx. (mca)	Tempo (s)	Pr. Mín. (mca)
N3	708,90	115,20	195,52	102,60	24,23
N4	708,90	115,05	194,53	102,45	24,52
N5	708,90	115,00	194,35	102,40	24,64
N6	725,95	114,75	176,74	102,15	8,23
N7	723,55	114,60	178,69	102,00	11,12
N8	743,65	114,00	156,29	101,40	-7,46
N9	783,75	113,30	114,80	100,70	-46,81
N10	755,00	112,65	144,20	100,05	-16,64
N11	783,60	110,90	115,34	98,30	-44,74
N12	783,60	110,95	115,44	98,35	-44,87
N13	752,32	111,00	146,68	98,40	-13,55
N14	763,65	110,80	134,46	98,20	-23,84
N15	757,95	110,60	138,99	98,00	-17,82
N16	798,15	109,64	96,55	97,05	-56,59
N17	808,10	109,35	76,97	96,75	-55,74
N18	814,85	0,00	8M82	0,00	8,82

A Figura 37a apresenta para o grupo moto bomba o comportamento das variáveis vazão e pressão. As variáveis potência e rotação são mostradas na Figura 37b. Verifica-se que o equipamento apresentou valores próximos à simulação no regime permanente.

Apesar do sistema não ser dotado de nenhum elemento de proteção, somente trabalhando com válvula de retenção na cabeça da bomba, não há retorno de água na bomba e, portanto, a bomba não apresenta rotação inversa (Figura 38a).

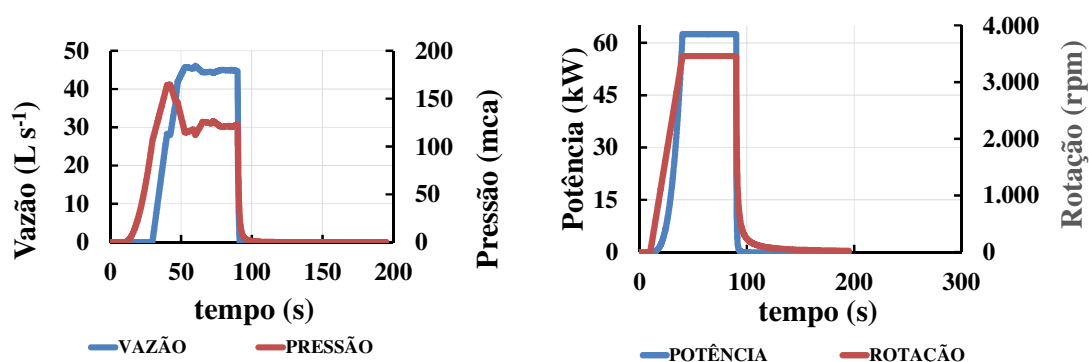


Figura 37. Comportamento do Grupo moto bomba (GMB): vazão e pressão ou altura manométrica (a); e potência e rotação (b).

Na Figura 38 é apresentado o comportamento do reservatório a jusante na simulação S2. Observa-se que ocorre retorno de água para a tubulação, mas sem ocorrer a quebra da coluna de água. O reservatório de jusante tem a tubulação de entrada em seu nível mínimo o que ajuda a minimizar os efeitos do transiente não deixando ocorrer à quebra da coluna de água na tubulação.

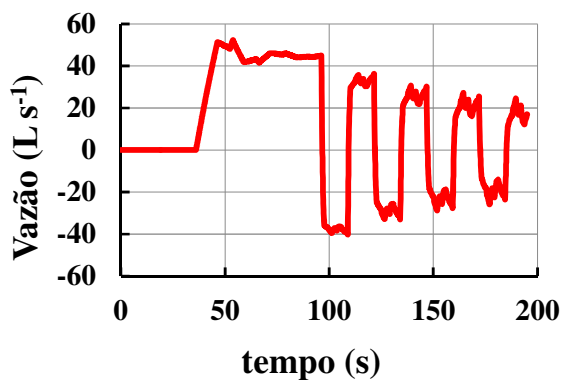


Figura 38. Comportamento da vazão no reservatório de jusante.

Na Figura 39, o comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.

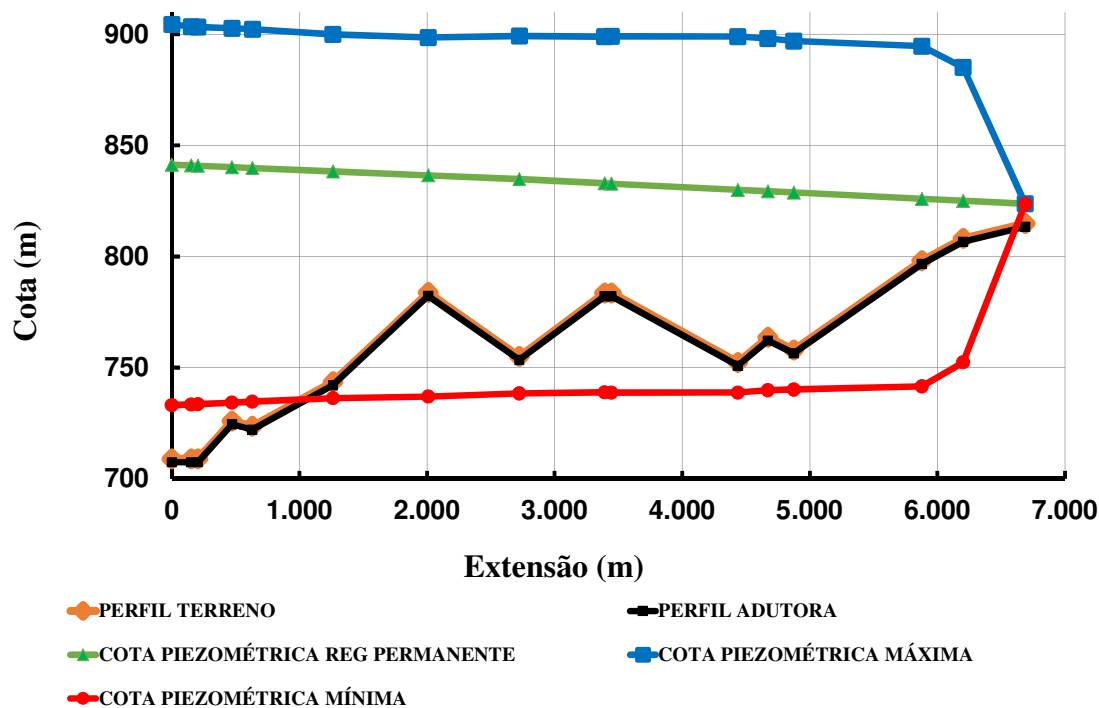


Figura 39. Simulação 2: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.

6.2. Simulação 3 –S3

Os resultados das pressões máximas e mínimas da simulação 3, regime transitório com tubulação de PVC-O sem elemento de proteção e no período de 195 segundos, são apresentados na Tabela 9, sendo as envoltórias apresentadas na Figura 40.

As pressões máximas apresentadas superam a pressão de serviço do material que é de 160 mca e a envoltória de pressão mínima atinge valores bem abaixo da pressão de vapor da água o que pode colapsar o tubo, especialmente nos Nós 9, 11 e 12, ou permitir a fenômeno da retro sifonagem de fluídos, podendo promover a entrada de agentes patogênicos e de outros contaminantes o que também poderia ocorrer nos Nós 16 e 17.

Tabela 9. Simulação 3 - Pressões máximas e mínimas com tubos de PVC-O sem elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.

NÓ	CT (m)	Tempo (s)	Pr. Máx. (mca)	Tempo (s)	Pr. Min. (mca)
N3	708,90	119,50	184,28	104,02	38,81
N4	708,90	119,60	182,70	104,40	39,11
N5	708,90	119,45	182,29	104,45	39,19
N6	725,95	120,05	163,72	104,75	22,34
N7	723,55	118,75	165,32	104,55	25,62
N8	743,65	117,55	143,53	102,25	6,77
N9	783,75	117,15	102,89	102,95	-33,81
N10	755,00	116,35	132,75	101,05	-4,10
N11	783,60	115,60	104,86	100,40	-32,45
N12	783,60	115,55	104,89	100,35	-32,43
N13	752,32	114,40	132,83	100,20	0,11
N14	763,65	114,15	120,73	99,95	-10,27
N15	757,95	114,10	124,76	99,70	-4,15
N16	798,15	113,10	84,51	97,80	-43,72
N17	808,10	113,50	72,89	98,20	-53,43
N18	814,85	0,00	8,82	0,00	8,82

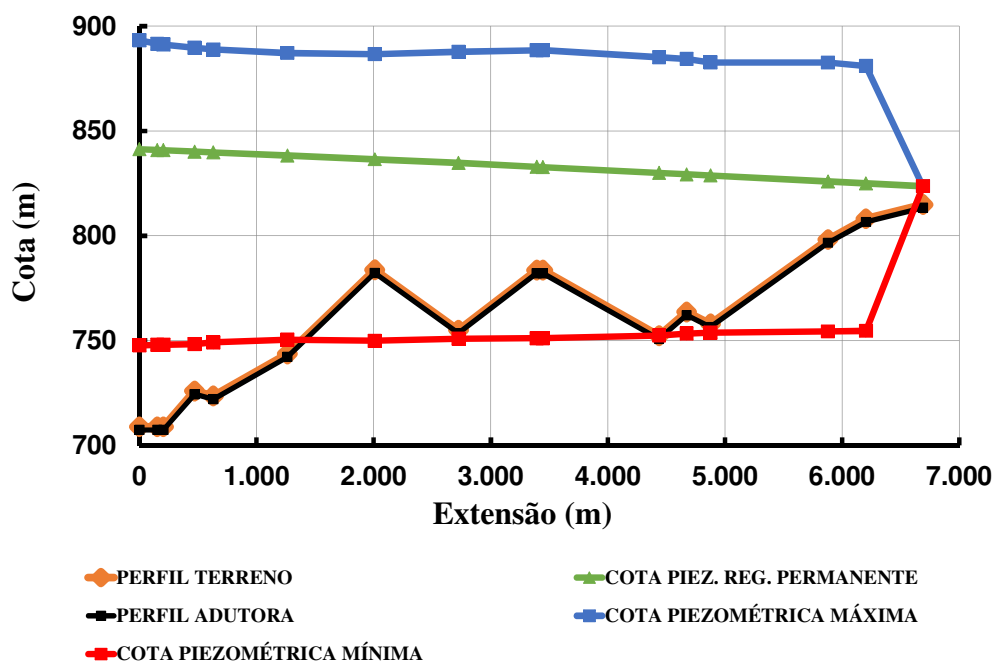


Figura 40. Simulação 3: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.

6.3. Simulação 4 –S4

Os resultados das pressões máximas e mínimas da simulação 4, regime transitório com tubulação de PVC-O com reservatório hidropneumático (RHO) e no período de 195 segundos, são apresentados na Tabela 10, sendo as envoltórias apresentadas na Figura 41.

O reservatório hidropneumático utilizado tem as seguintes características: corpo cilíndrico de 1,96 m³ em aço de 1,00 metro de diâmetro, 2,5 metros de comprimento, posição vertical, com bexiga, pressão inicial de 39,88 mca instalado no Nó 4.

Conforme a Figura 41, verifica que o RHO consegue eliminar as subpressões permitindo que a tubulação de PVC-O seja utilizado sem problema de colapso.

As pressões máximas, no entanto, não sofreram grande redução, atingindo limites superiores a pressão de serviço do material que é de 160 mca, portanto mesmo com o reservatório hidropneumático, haveria grande risco de ruptura da tubulação.

Tabela 10. Simulação 4 - Pressões máximas e mínimas com tubos de PVC-O com RHO como elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.

NÓ	CT (m)	Tempo (s)	Pr. Máx. (mca)	Tempo (s)	Pr. Mín. (mca)
N3	708,90	141,15	178,67	106,50	48,51
N4	708,90	47,15	166,63	107,50	75,44
N5	708,90	47,05	166,43	108,25	75,70
N6	725,95	46,70	148,13	110,05	60,74
N7	723,55	46,35	149,81	104,65	63,55
N8	743,65	45,45	127,29	103,80	45,24
N9	783,75	45,10	83,82	103,05	7,87
N10	755,00	45,30	108,65	102,25	38,94
N11	783,60	45,85	75,60	101,70	12,93
N12	783,60	45,90	75,27	101,45	13,34
N13	752,32	46,65	98,21	100,50	49,53
N14	763,65	46,90	84,58	100,25	39,43
N15	757,95	47,15	88,21	100,00	46,45
N16	798,15	47,45	36,52	113,75	14,18
N17	808,10	47,30	22,38	113,40	7,64
N18	814,85	0,00	8,82	0,00	8,82

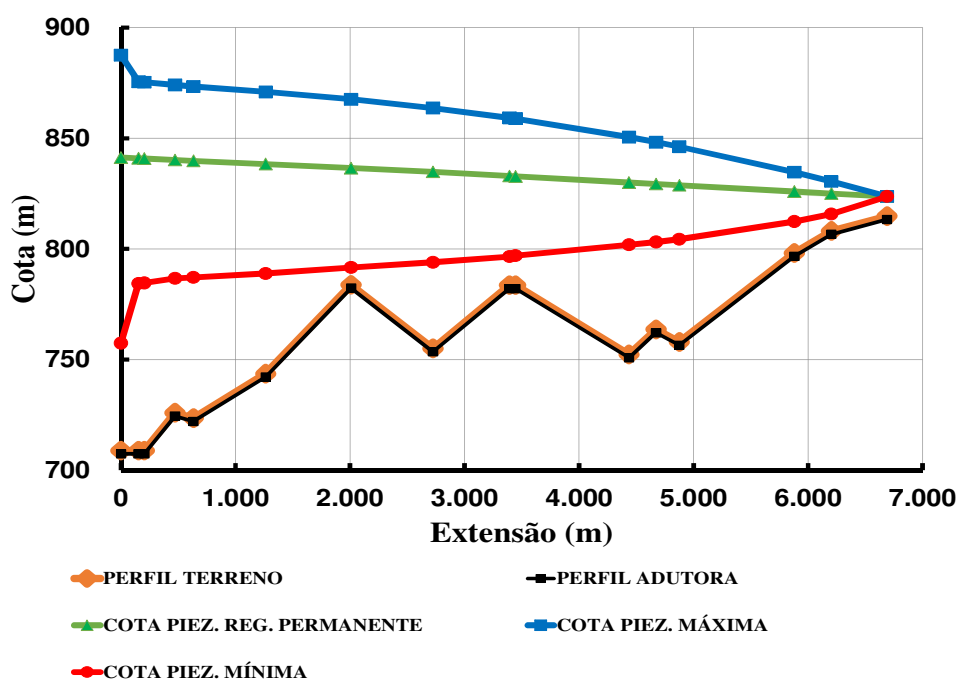


Figura 41. Simulação 4: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.

6.4. Simulação 5 –S5

Os resultados das pressões máximas e mínimas da simulação 5, regime transitório com tubulação de ferro fundido até o Nó 11 numa extensão de 3.391,79 m e 3.297,33 m em PVC 12 DeFoFo com elemento de proteção tipo reservatório hidropneumático (RHO) e no período de 195 segundos, são apresentados na Tabela 11, sendo as envoltórias apresentadas na Figura 42.

Quanto às pressões apresentadas, nesta simulação o elemento de proteção consegue reduzir as envoltórias de pressões a valores que podem ser absorvidos pelos materiais da linha.

Tanto o ferro fundido quanto o PVC 12 DeFoFo (440 mca e 100 mca, respectivamente) operam dentro dos limites de pressões de serviço nas pressões máximas e segura a subpressão em valores bem acima da pressão de vapor da água evitando o colapso do tubo ou permitir o fenômeno da retro sifonagem.

Tabela 11. Simulação 5 - Pressões máximas e mínimas com tubos de Ferro fundido e PVC 12 DeFoFo com RHO como elemento de proteção de transiente. Em que: CT = cota do terreno; Pr. Máx. = pressão máxima; Pr. Mín. = pressão mínima.

NÓ	CT (m)	Tempo (s)	Pr. Máx. (mca)	Tempo (s)	Pr. Mín. (mca)
N3	708,90	132,70	179,47	103,05	58,92
N4	708,90	42,85	162,97	101,90	77,56
N5	708,90	42,80	162,69	102,00	77,62
N6	725,95	42,95	144,16	102,00	61,50
N7	723,55	43,00	145,65	101,80	64,47
N8	743,65	43,35	121,74	105,85	45,69
N9	783,75	52,90	77,43	106,65	5,73
N10	755,00	52,45	104,06	111,55	33,99
N11	783,60	50,15	73,92	111,00	4,54
N12	783,60	50,30	73,86	110,95	4,48
N13	752,32	49,45	101,25	108,35	38,40
N14	763,65	49,30	88,22	107,70	28,68
N15	757,95	49,30	92,19	107,15	35,96
N16	798,15	50,55	39,77	104,45	10,08
N17	808,10	51,05	24,52	103,75	4,70
N18	814,85	0,00	8,82	0,00	8,82

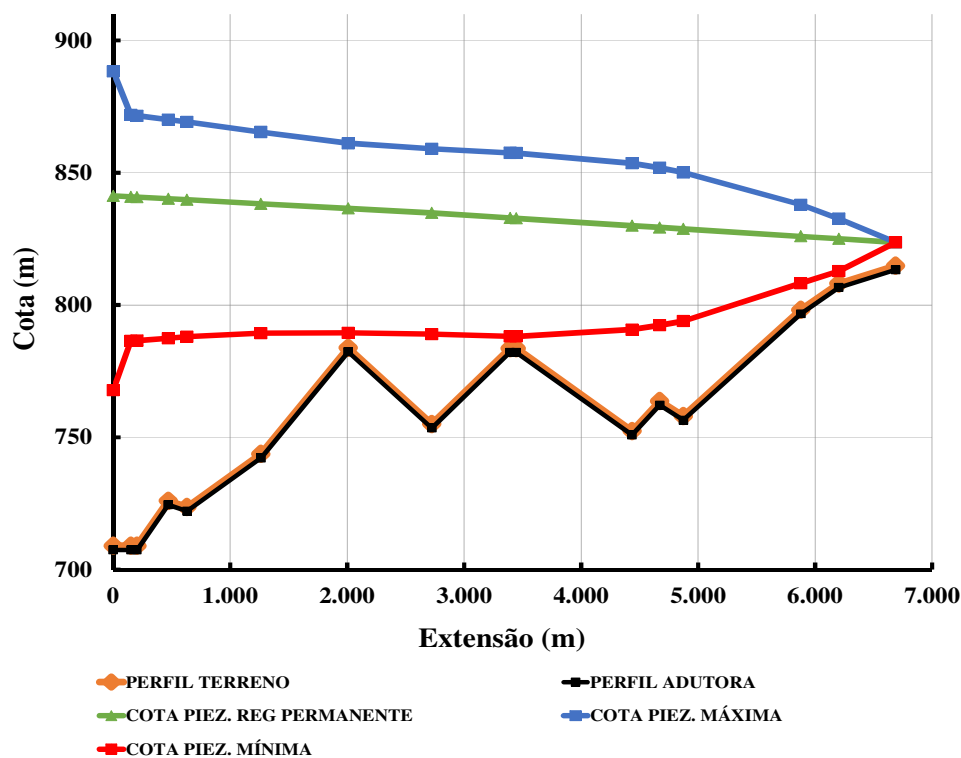


Figura 42. Simulação 5: Comportamento das envoltórias de máximas e mínimas de carga na linha.

O reservatório hidropneumático utilizado na simulação apresentava diâmetro 1,0 m, altura 1,8 metros e volume de 1,41 m³ com pressão inicial da bexiga de 32,75 mca calculado pela equação 41.

O comportamento das variáveis: pressão, nível de água, volume de gás e de água no interior do tanque são apresentadas nas Figuras 43, 44 e 45.

Os volumes de gás e água no interior do reservatório não extrapolaram o volume do mesmo, o que evidencia sua atuação adequada.

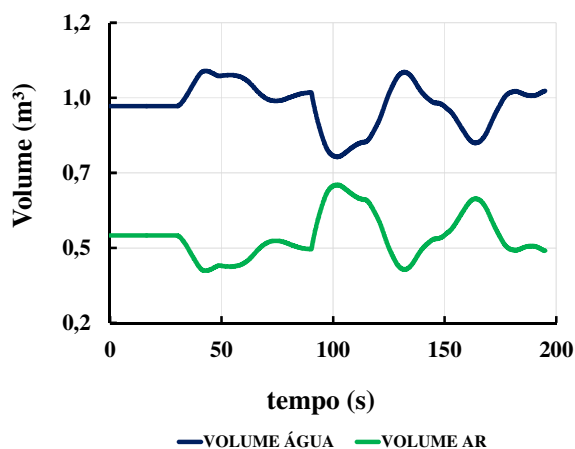


Figura 43. Comportamento das variáveis água e ar no reservatório hidropneumático (RHO).

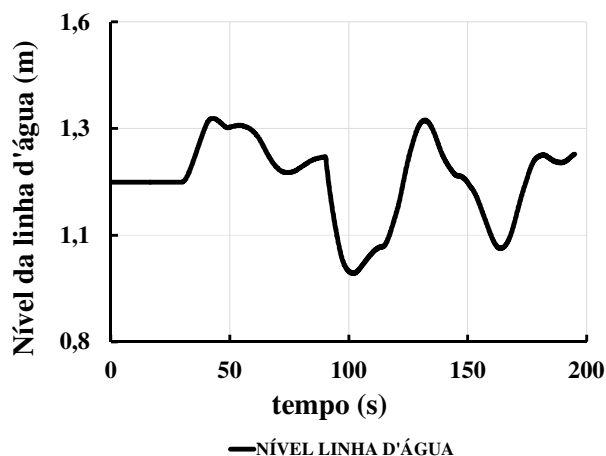


Figura 44. Variação do nível da linha d'água no reservatório hidropneumático (RHO).

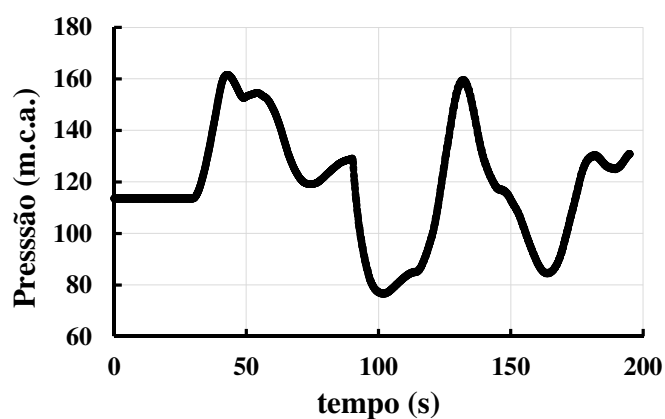


Figura 45. Comportamento da pressão no reservatório hidropneumático (RHO).

Na Figura 46, a interface ar da bexiga e a água passa do nível inicial até um nível mínimo logo no início do transiente e quando a onda reverte seu sentido atinge nível máximo demonstrando que o dispositivo opera com folga sem ficar com água no seu interior e também sem ficar com ar mantendo o efeito amortecedor que se espera.

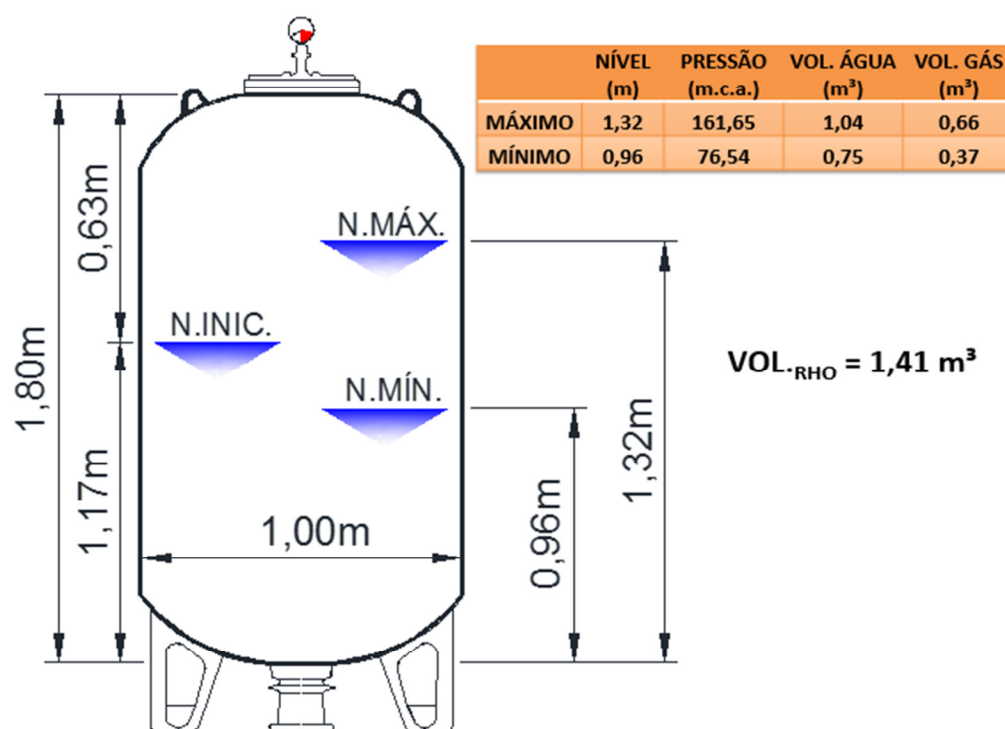


Figura 46. Comportamento da pressão no reservatório hidropneumático (RHO).

As Figuras 47 a 50 apresentam para o Nó a variação da pressão tanto no regime permanente (até os 90 segundos) como no regime transitório (após os 90 segundos) nos tempos de simulação de 195, 500, 1.000 e 2.000 segundos.

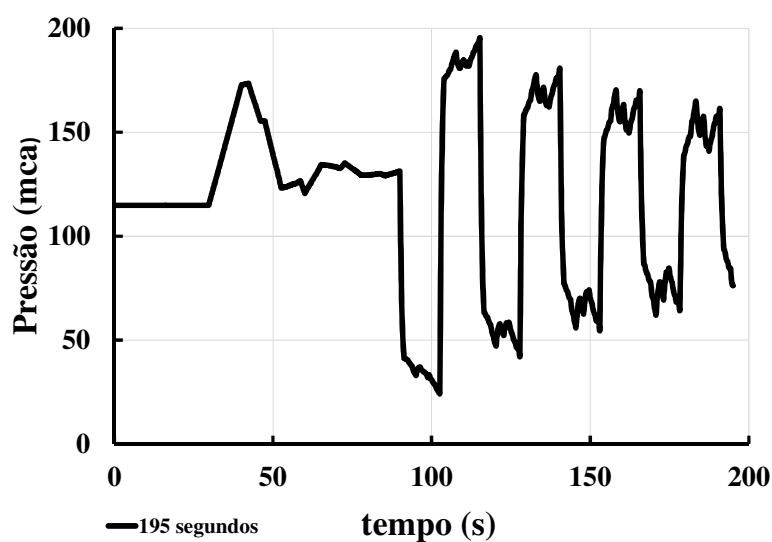


Figura 47. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 195 segundos.

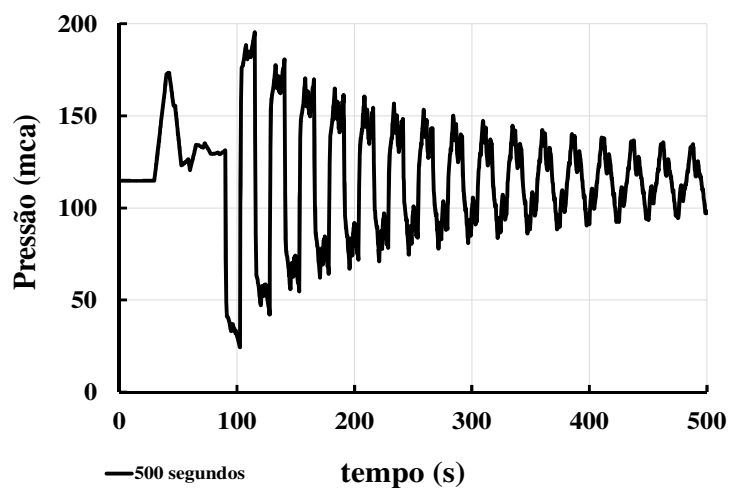


Figura 48. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 500 segundos.

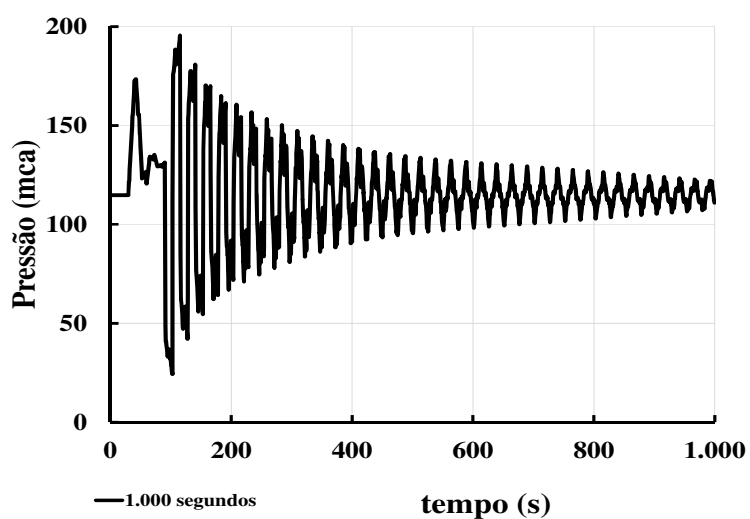


Figura 49. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 1.000 segundos.

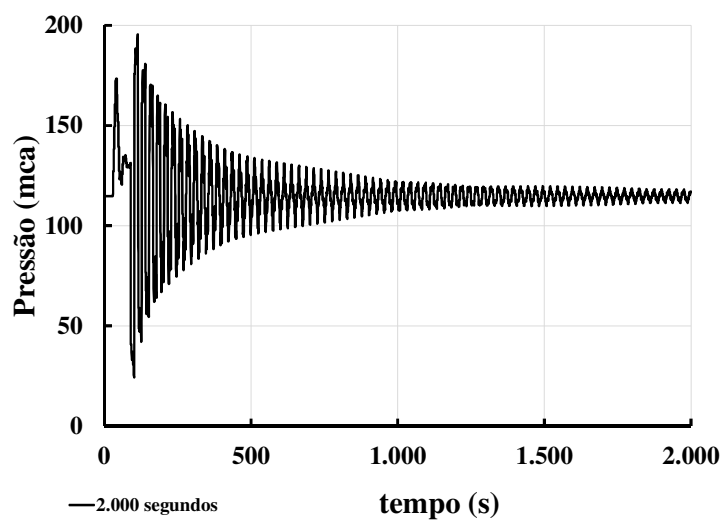


Figura 50. Pressão NÓ 3 com tempo de simulação de 2.000 segundos.

A primeira onda do transiente tem o sentido de decréscimo partindo do valor de pressão do regime permanente ao valor mínimo, atingindo o menor valor no início do transiente hidráulico, no caso 3 segundos.

As Figuras 51 a 58 demonstram como se comporta a primeira onda do surto.

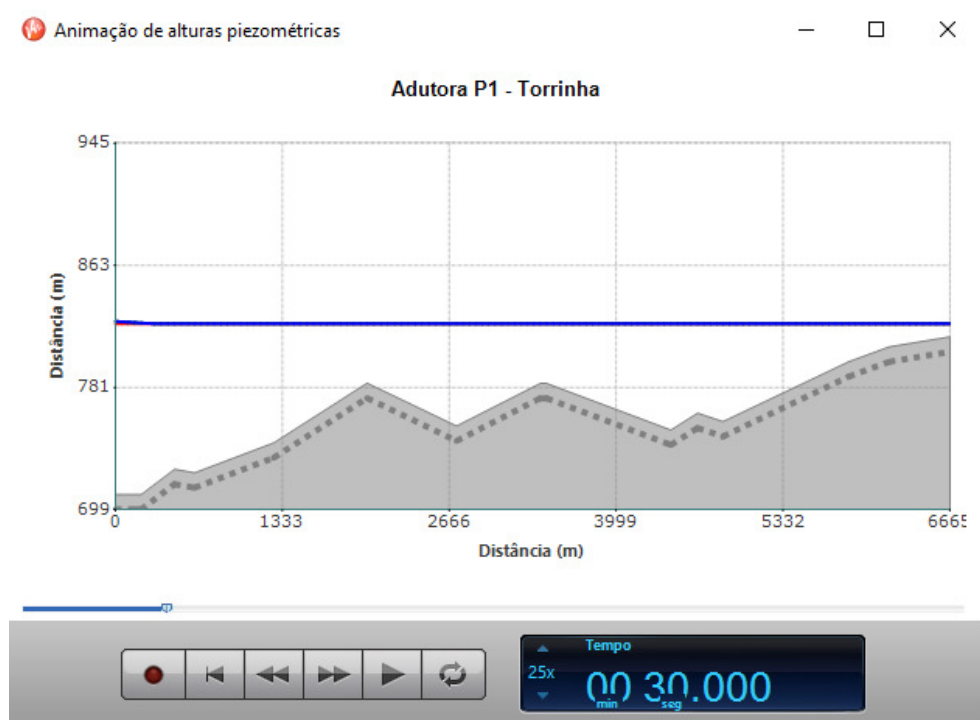


Figura 51. Partida do GMB.

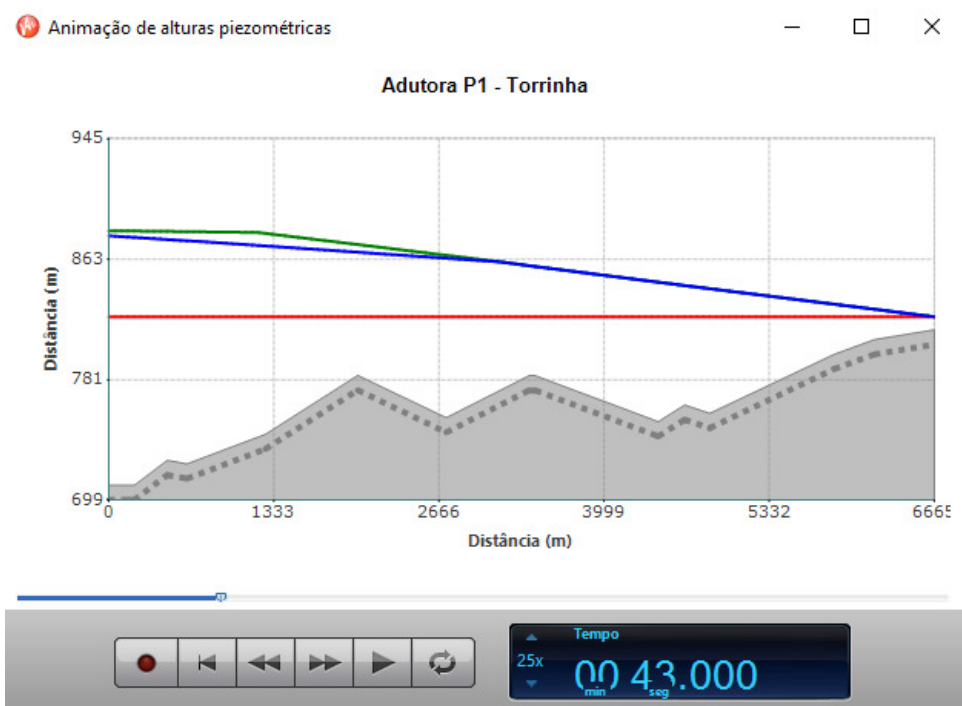


Figura 52. Pressão máxima no regime permanente (linha verde).

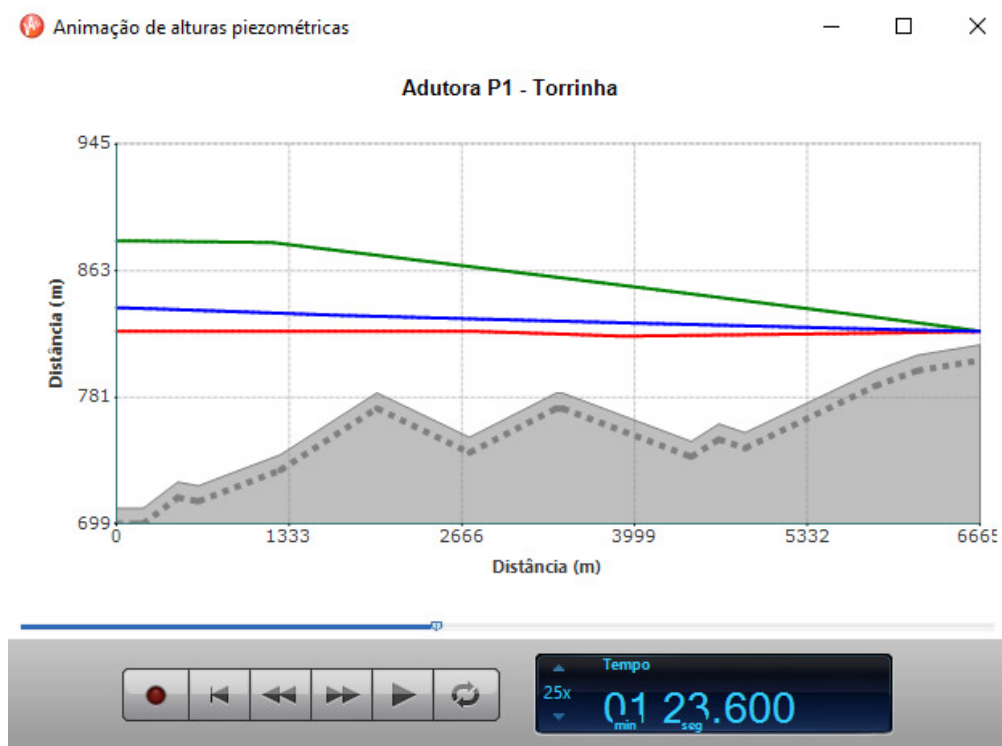


Figura 53. Pressão de trabalho no regime permanente estabilizada (linha azul).

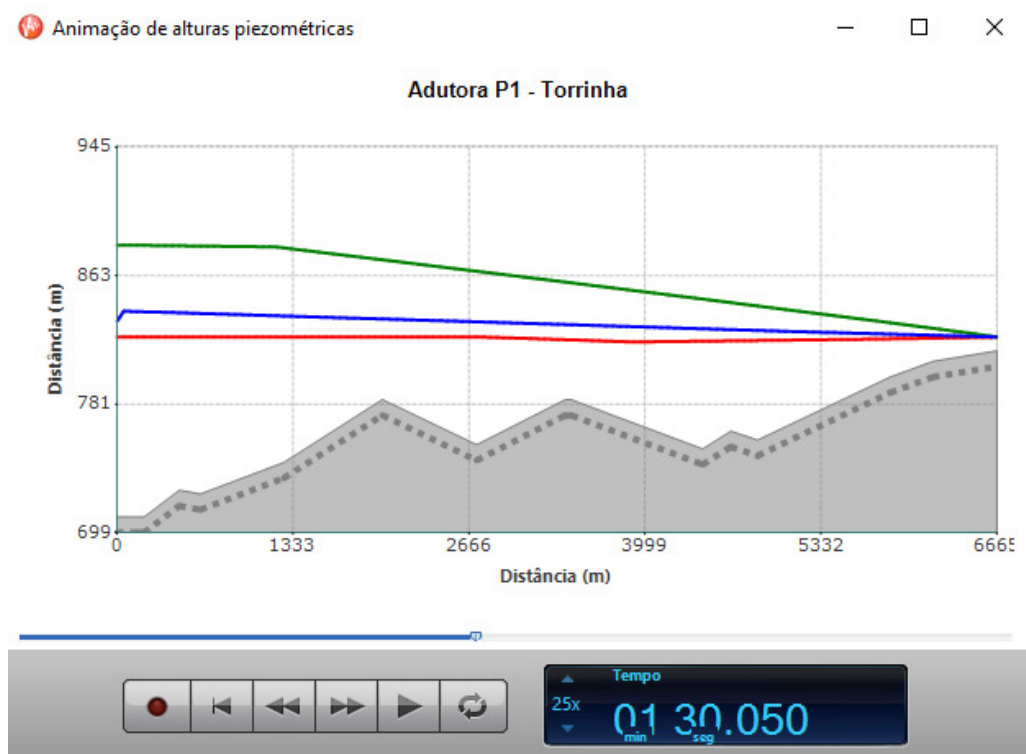


Figura 54. Início do transiente com o desligamento do GMB, queda da linha azul.

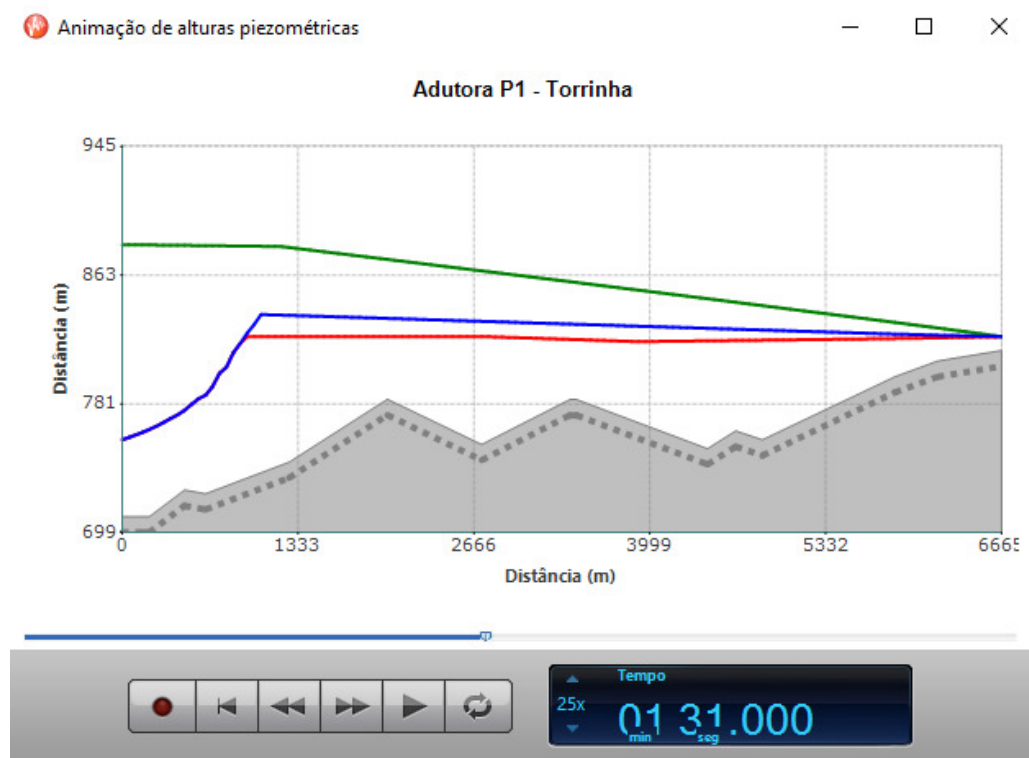


Figura 55. Linha de pressão 950 milésimos de segundos após o início do transiente.

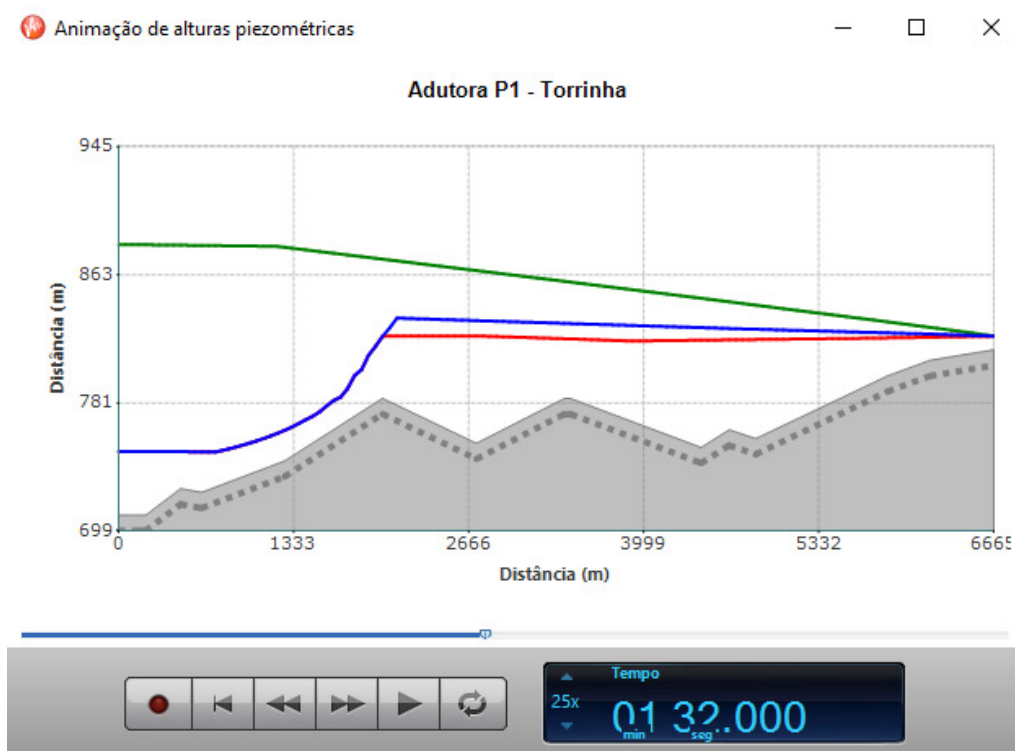


Figura 56. Linha de pressão 2 segundos após o início do transiente (linha azul).



Figura 57. Linha de pressão 3 segundos após o início do transiente.



Figura 58. Linha de pressão 6,500 segundos após o início do transiente chegando ao final da adutora.

A seguir a onda passa a ter comportamento inverso.

Pela variação do tempo de simulação, não ocorre pressões mais elevadas após os primeiros 195 segundos o que ratifica o tempo padrão do programa, a onda de pressão com o tempo vai diminuindo a sua intensidade devido aos atritos existentes.

Observando os dados da Tabela 12, verifica-se que as pressões máximas causadas pelos transientes na segunda simulação não excederam a pressão de serviço da tubulação de ferro fundido. Já na terceira simulação o Nó 3 apresentou pressão superior à pressão de serviço do tubo de PVC-O e na quarta simulação a pressão máxima excede em 15 % a pressão de serviço da tubulação.

Já na quinta simulação a tubulação de ferro fundido do Nó 3 suporta a pressão máxima de 179,47 metros.

Para as pressões de mínimas mesmo com a instalação de ventosas que evitam que a linha piezométrica fique abaixo da linha da tubulação, o Nó 10 nas segunda e terceira simulações demonstra a facilidade de retro sifonagem de água não potável, podendo promover a entrada de agentes patogénicos e de outros contaminantes por ser ponto de inflexão baixo que não é interessante a implantação de ventosa.

Na quarta e quinta simulações, as pressões mínimas ficam positivas evitando os danos acima descritos.

Tabela 12. Comparação de pressões máximas e mínimas entre as opções de formatação da linha de tubos.

Nó	Segunda simulação		Terceira simulação		Quarta simulação		Quinta simulação	
	Pr. Máx. (mca)	Pr. Mín. (mca)	Pr. Máx. (mca)	Pr. Mín. (mca)	Pr. Máx. (mca)	Pr. Mín. (mca)	Pr. Máx. (mca)	Pr. Mín. (mca)
N3	195,52	24,23	184,28	38,81	178,67	48,51	179,47	58,92
N9	114,80	-46,81	102,89	-33,81	83,82	7,87	77,43	5,73
N10	144,20	-16,64	132,75	-4,10	108,65	38,94	104,06	33,99
N12	115,44	-44,87	104,89	-32,43	75,27	13,34	73,86	4,48
N16	96,55	-56,59	84,51	-43,72	36,52	14,18	39,77	10,08
N17	76,97	-55,74	72,89	-53,43	22,38	7,64	24,52	4,70

Na Tabela 13 são apresentados os preços dos materiais considerados, comparando os investimentos em tubulação para cada simulação, verifica-se que o maior investimento é para a segunda simulação, investimento intermediário para a terceira e quarta e um menor investimento para a quinta simulação conforme Tabela 14. A terceira e quarta simulação tem o mesmo material sendo que na quarta simulação tem o elemento de proteção adicionado. Os custos da tubulação são diferentes da Tabela 2 porque neste caso se considera somente o material e não o diâmetro.

Tabela 13. Preço da tubulação.

Item	Material	R\$ m ⁻¹
1	Tubo FF Dúctil K7 ver. Int. cim.c/ pb je DN250 (5,5m)	236,79
2	Tubo PVC 12 DeFoFo – DN 250 (5,75m) PN 1,0 MPa	78,70
3	Tubo PVC-O – DN 250 (5,75m) PN 1,6 MPa	181,57

Fonte: SABESP

Tabela 14. Comparativo de investimento da tubulação conforme as simulações propostas.

SIMULAÇÃO	EXTENSÃO (m)			RHO (R\$)	CUSTO TOTAL (R\$)
	Tubo FF Dúctil K7, DN 250mm	Tubo PVC 12 DeFoFo, DN 250mm	Tubo PVC-O, DN 250mm		
2 ^a	6.689,12	-	-		1.583.889,30
3 ^a	-	-	6.689,12		1.214.543,52
4 ^a	-	-	6.689,12	180.000,00	1.394.543,52
5 ^a	3.391,79	3.297,33	-	180.000,00	1.242.624,95

A quarta e quinta simulações foram editadas com o elemento de proteção contra transiente o elemento reservatório hidropneumático com bexiga (RHO).

Na simulação 5 foi especificado RHO com volume de 1,41 m³ e na simulação 4 foi necessário utilizar RHO com volume de 1,96 m³. Ambos equipamentos com bexiga. Orçando somente o RHO de menor volume, que contém uma bexiga com capacidade de 1,5 m³, PN 20 bar, o custo unitário foi R\$ 180.000,00

Os dados hidráulicos das simulações mostram pequena variação em favor da segunda simulação em termos de vazão, conforme apresenta a Tabela 15.

Tabela 15. Quadro comparativo das simulações com os valores hidráulicos do grupo moto bomba (GMB).

Simulação	Q (L s ⁻¹)	H (mca)	POT. (kW)	REND. (%)
2 ^a	44,8	122,1	62,5	85,9
3 ^a	44,74	122,5	62,5	86,1
4 ^a	44,74	122,5	62,5	86,1
5 ^a	44,65	123,3	62,5	85,4

Entre a quinta e a segunda simulação a diferença é de 0,33% no item vazão, 1% no item altura manométrica e para 0,7% o item rendimento.

7 CONCLUSÕES

A aplicação do programa computacional Allievi possibilitou calcular os transientes hidráulicos máximos e mínimos do sistema de abastecimento do município de Torrinha (SP) pelo método de aproximações finitas.

Com as envoltórias de pressões de máximas e mínimas conhecidas foi possível levantar e definir a composição da tubulação de recalque com as suas respectivas classes de pressões.

A quinta simulação, cujos primeiros 3391,79 metros são de tubos de ferro fundido, ponta bolsa, K7 e os 3297,33 metros finais com tubos de PVC 12 DeFoFo, apresentando ainda como equipamento de proteção contra transiente hidráulico o dispositivo RHO de 1,5 m³ de capacidade com bexiga, demonstrou ser a configuração mais viável economicamente do sistema.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até o fim do ano de 2016 esse sistema deverá estar implantado para abastecer a cidade de Torrinha, quando ter-se-ão os resultados reais para averiguar o grau de confiabilidade da simulação, permitindo também uma melhor calibração do modelo.

O reservatório hidropneumático com bexiga já vem sendo utilizado com frequência na SABESP, apresentando bons resultados.

O problema operacional do RHO tradicional era a necessidade da instalação e operação de compressor de ar, o sistema com bexiga elimina o compressor e a operação do mesmo é simples, bastando monitorar o nível do líquido ou do ar com a operação do reservatório e carregar de gás quando necessário através de equipamento portátil de compressor.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12215**: Projeto de adutora de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1991. 9 p.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2010. Brasília, DF, 2010. 76 p.

AMOA, S. O. K.; ELBASHIR, M. A. M. **Hydraulic transient in a pipeline using computer model to calculate and simulate transient**. 2007. 96 f. Thesis (Master of Science)-Division of Water Resources, Department of Building and Environmental Technology, Lund University, Lund, 2007.

AZEVEDO, J. M., et al. Manual de hidráulica. 8 ed. Editora Edgard Blucher. São Paulo, 1998.

BOULOS, P. F. et al. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. **American Water Works Association**, Denver, p. 111-124, 2005.

CAMARGO, L. A. O golpe de aríete em condutos. Análise pelo método das características In: ENCONTRO DE ENGENHEIROS DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA TUBOS E CONEXÕES TIGRE, 16. 1991, Vitória. **Tipo de documento...** Joinville: Tubos e Conexões Tigre, 1991. p. 44.

CASTRO, M. A. H.; SANTOS, R. M. N. Modelagem computacional de transientes hidráulicos em sistemas de recalque. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 2002, João Pessoa. **Transientes hidráulicos**: anais do I SEREA. João Pessoa, 2002. p. 16.

DECKERT, M.; MENEZES, M. M. Estudo comparativo sobre golpes de aríete em tubulações de pequenas centrais hidrelétricas. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 4, n. 2, p. 217-228, nov. 2013.

FRANÇA, F. V. P. **Verificação da adequação do esquema numérico de MacCormack na solução de transientes hidráulicos em condutos forçados**. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) -Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ITA. Universidad Politécnica de Valencia. **Allievi**. Disponível em: <http://www.allievi.net/allievi-es.php>. Acesso em: 12 mar. 2014.

KOELLE, E. **Fundamentos dos transientes hidráulicos**. São Paulo: Koelle Engineering, 1992.

LAMBERT, M. F. et al. Detection and location of a partial blockage in a pipeline using damping of fluid transients. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, VA, USA, v. 131, n. 3, p. 244-249, May 2005.

MARTIN, C. S. **Hydraulic Transients Design for Pipeline Systems**. Hydraulic Design Handbook. L. W. Mays. New York, NY, McGraw-Hill, 1999. 2 ed. cap. 6, p. 5-40.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **DiagNóstico dos serviços de água e esgoto** – 2013. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 76p

STREETER, V. L. **Mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Editora McGraw-Hill, 1978.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Fluid mechanics**. New York: Editora McGraw-Hill Book Company, 1979. 562p.

TOMAZ, Plínio. **Golpe de aríete em casas de bombas**. São Paulo: Navegar Editora, 2010. 231 p.

TSUTIYA, M. T.; SOBRINHO, P. A. **Coleta e transporte de esgotos**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. 548 p.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.

TUNDISI, J. G. Disponibilidade de recursos hídricos, qualidade e governança da água: análises estratégicas e perspectivas para o Brasil. São Paulo: <http://www.institutojatobas.org.br/>, 2015. Disponível em: http://www.tdtsustentabilidade.org/wp-content/uploads/2015/10/Apresentacao_principais-propostas_doc-posicionamento-V2.pdf. Acesso em: 12 nov. 2015.

VASCONCELOS, J. G. Modelo matemático para simulação de enchimento de adutoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Trabalho técnico**: anais. Belo Horizonte: ABES, 2007. p. 1-8.

APÊNDICE

PRESSÕES DE SERVIÇO ADMISSÍVEIS - TUBO CLASSE K7

DN	Tubos - Classe K7					
	JGS			JTI		
	PSA	PMS	PTA	PSA	PMS	PTA
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
150	6,4	7,7	8,2	1,6	1,9	2,4
200	5,3	6,3	6,8	1,0	1,2	1,7
250	4,4	5,2	5,7	1,0	1,2	1,7
300	3,8	4,6	5,1	1,0	1,2	1,7
350	3,4	4,1	4,6	-	-	-
400	3,0	3,6	4,1	-	-	-
450	2,9	3,5	4,0	-	-	-
500	2,8	3,3	3,8	-	-	-
600	2,6	3,1	3,6	-	-	-
700	2,4	2,9	3,4	-	-	-
800	2,3	2,8	3,3	-	-	-
900	2,3	2,7	3,2	-	-	-
1000	2,2	2,6	3,1	-	-	-
1200	2,1	2,5	3,0	-	-	-

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.

1 MPa = 10,19 kgf/cm² = 101,9 m.c.a

PRESSÕES DE SERVIÇO ADMISSÍVEIS - CONEXÕES COM BOLSAS

Se uma conexão é formada por dois tipos de juntas (exemplo tê com bolsas e flanges) é conveniente adotar as PSA, PMS e PTA mais baixas.

DN	Conexões														
	JGS			JM			JTI			JTE			JPK		
	PSA	PMS	PTA	PSA	PMS	PTA	PSA	PMS	PTA	PSA	PMS	PTA	PSA	PMS	PTA
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
80	6,4	7,7	8,2	-	-	-	2,5	3,0	3,5	-	-	-	-	-	-
100	6,4	7,7	8,2	4,0	4,8	5,3	2,5	3,0	3,5	-	-	-	-	-	-
150	6,4	7,7	8,2	4,0	4,8	5,3	2,5	3,0	3,5	-	-	-	-	-	-
200	6,2	7,4	7,9	3,5	4,2	4,7	1,6	1,9	2,4	-	-	-	-	-	-
250	5,5	6,6	7,9	3,5	4,2	4,7	1,6	1,9	2,4	-	-	-	-	-	-
300	4,9	5,9	6,4	3,2	3,8	4,3	1,6	1,9	2,4	4,1	4,9	5,4	-	-	-
350	4,6	5,5	6,9	3,1	3,7	4,2	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
400	4,2	5,1	5,6	3,1	3,7	4,2	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
450	4,1	4,9	5,4	3,0	3,6	4,1	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
500	3,8	4,6	5,1	3,0	3,6	4,1	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
600	3,6	4,3	4,8	2,9	3,5	4,0	-	-	-	2,7	3,2	3,7	-	-	-
700	3,4	4,1	4,6	2,8	3,4	3,9	-	-	-	2,5	3,0	3,5	-	-	-
800	3,2	3,9	4,4	2,7	3,2	3,7	-	-	-	1,6	1,9	2,4	-	-	-
900	3,1	3,7	4,2	2,7	3,2	3,7	-	-	-	1,6	1,9	2,4	-	-	-
1000	3,0	3,6	4,1	2,7	3,2	3,7	-	-	-	1,6	1,9	2,4	-	-	-
1200	2,9	3,5	4,0	2,6	3,1	3,6	-	-	-	1,4	1,7	2,2	-	-	-
1400	2,8/2,2*	3,3/2,6*	3,8/3,1*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5/2,2*	3,0/2,6*	3,5/3,1*
1500	2,7/2,2*	3,3/2,6*	3,8/3,1*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5/2,2*	3,0/2,6*	3,5/3,1*
1600	2,7/2,1*	3,3/2,5*	3,8/3,0*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5/2,1*	3,0/2,5*	3,5/3,0*
1800	2,7/1,6*	3,2/1,9*	3,7/2,4*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	1,9	2,4
2000	2,6/1,6*	3,1/1,9*	3,6/2,4*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Consultar		

* Valores para tê com 2 bolsas e flange orientável para derivação com DN > 600.

No caso de conexões flangeadas, consultar tabela de peças com flanges.

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

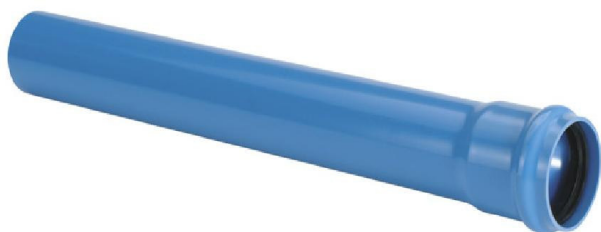
Pressão interna máxima, incluindo o golpe de ariete, que um componente pode suportar em serviço.

PTA - Pressão de teste admissível

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

$$1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ kgf/cm}^2 = 101,9 \text{ m.c.a}$$

Amanco Ductilfort



Os tubos Amanco Ductilfort são uma linha em PVC dúctil utilizada na construção de redes para condução de água. Perfeitamente intercambiáveis às tubulações de ferro fundido para sua classe de pressão, dispensando o uso de adaptadores para essa união.

Aplicação

- Execução de sistemas de adução e distribuição de água potável e/ou bruta com Pressão de Serviço de 1,0 MPa (PN 10) à temperatura de 25 °C.

Desenho e Dimensões

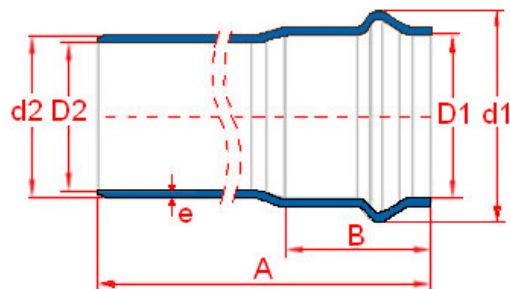


Figura 1

Tabela 1

DN	100	150	200	250	300
D ₁	119,30	171,55	223,95	276,30	328,55
D ₂	108,40	156,40	204,20	252,00	299,80
d ₁	151,60	211,50	271,70	333,40	391,70
d ₂	118	170	222	274	326
e	4,8	6,8	8,9	11,0	13,1
A	6000	6000	6000	6000	6000
B	117	135	160	175	195
Peso (g)	15559	31779	51556	82661	116947

Medidas em milímetros

1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- Matéria Prima: PVC
- Cor: Azul
- Tubos Ponta – Bolsa com 6 m de comprimento
- Bitolas: DN 100 a 300
- Pressão de Serviço: 1,0 MPa (10 Kgf/cm²) a 25° C, incluindo eventuais sobrepressões dinâmicas previstas e calculadas
- Compatível com Tubos e Conexões de Ferro Fundido para PN 10
- Anel de Vedação JERI (Junta Elástica Removível Integrada) fabricado em borracha EPDM (resistente aos raios UV)
- Normas de Referência:
 - ABNT NBR 7665 / 2007 – Sistemas para adução e distribuição de água - Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos
 - ABNT NBR 9822 - Execução de tubulações de PVC rígido para adutoras e redes de água

2. ANEL

O sistema de junta elástica removível integrada foi projetado para facilitar a possível substituição do anel, evitando perda da bolsa do tubo.

Apresenta praticidade na instalação e manutenção de redes de água. Une a segurança da junta integrada com a versatilidade de um sistema removível.

2.1 Desenho e Dimensões

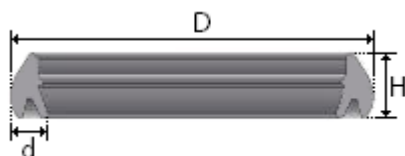


Figura 2

Tabela 2

DN	D	d	H
100	146,8	14,0	24,2
150	204,8	17,2	27,8
200	263,0	20,6	31,4
250	323,2	24,6	37,3
300	378,8	26,3	39,0

Medidas em milímetros

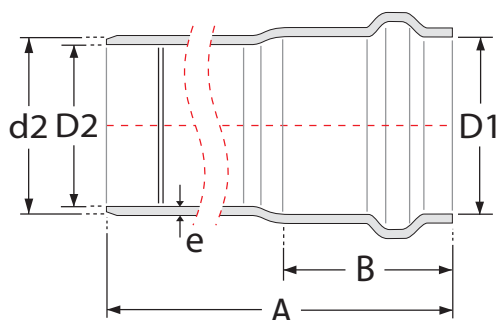
Linha Amanco Biax - Adução

Os tubos Amanco Biax são fabricados em PVC-O e possuem características físicas e mecânicas superiores aos tubos de PVC-U, devido à tecnologia incorporada em seu processo de fabricação.



Indicados para sistemas de adução e distribuição de água bruta ou potável, para uso enterrado e sob pressão de até 1,6MPa, de acordo com a NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sobre pressão - Requisitos e métodos de ensaio.

Comercializados na cor branca, os tubos Amanco Biax são ponta e bolsa com sistema de junta elástica integrada e removível, única solução prevista na Norma Brasileira e tecnicamente adequada para tubos de PVC orientado.



Medidas (mm)

DN	D ₁	D ₂	D ₃	e	A	B
100	119,0	111,4	118	3,3	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

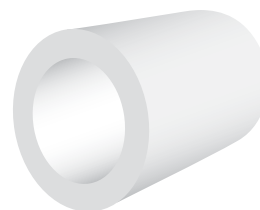
Processo de Fabricação

Os tubos para adução e distribuição de água são tradicionalmente fabricados em PVC não plastificado (PVC-U). Avanços tecnológicos nos processos de fabricação desses produtos, bem como aprimoramento dos sistemas de vedação e ensaios de qualidade, proporcionaram o conhecimento de novas soluções em PVC para condução de fluidos sob pressão.

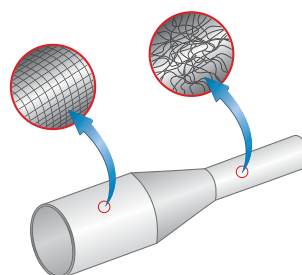
Pesquisas específicas sobre o comportamento do PVC na produção de tubos permitiram o desenvolvimento de um novo conceito nos processos de fabricação, incorporando orientação das moléculas de PVC-U com objetivo de obter tubos de PVC-O (PVC orientado) de características superiores aos de PVC-U, pois a orientação molecular resulta em melhora das propriedades físicas e mecânicas dos tubos.

Os tubos Amanco Biax são obtidos diretamente na linha de produção:

a) Na 1ª fase é extrudado um tubo de PVC-U com sobre-espessura (espessura adicional), denominado preforma.



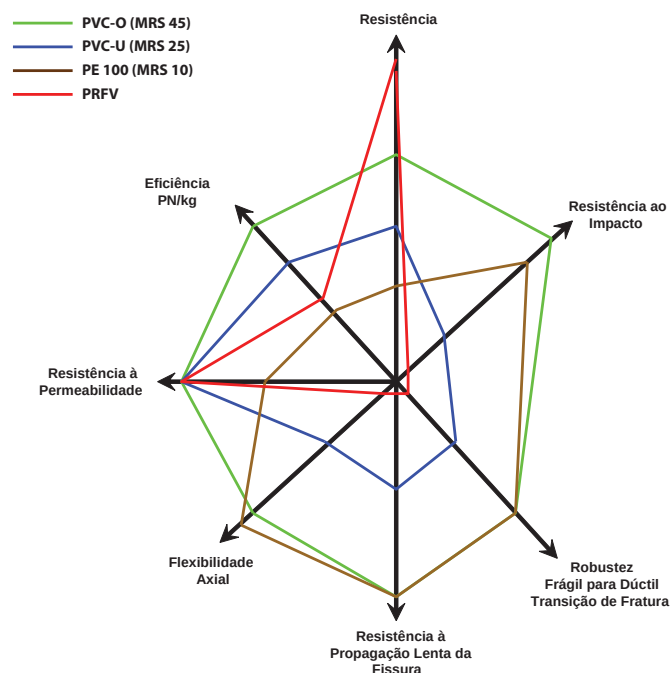
b) Na 2ª fase, a preforma é expandida circunferencialmente e longitudinalmente de forma mecânica, com auxílio de calor. Nesta fase ocorre a orientação molecular.



c) Na 3ª fase é realizado o resfriamento, a medição e corte do comprimento adequado e a abertura da bolsa, tudo na mesma linha de fabricação.

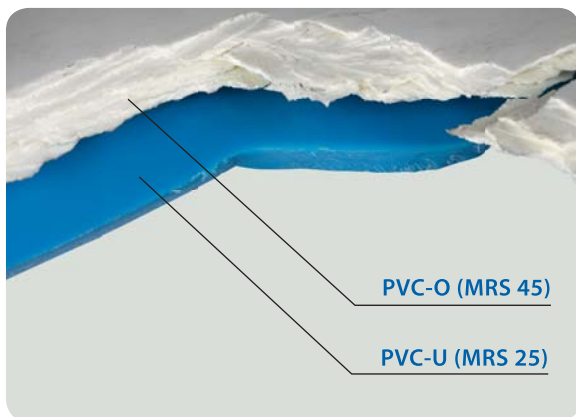
d) Em seguida é acoplada a junta elástica.

O conceito de fabricação dos tubos Amanco Biax aumenta significativamente a resistência mecânica, resistência à tração, a tenacidade (resistência ao impacto e resistência à propagação de fissuras) e a ductibilidade. O gráfico demonstra a característica de diferentes tubos termoplásticos.



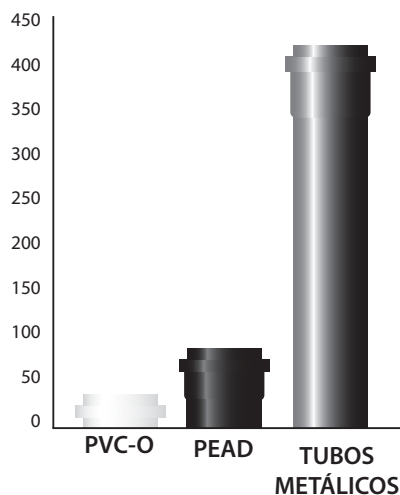
Vantagens Amanco Biax

- **Mais Resistente:** Suporta maior pressão hidrostática interna em comparação com demais tubos termoplásticos normalizados, além de não ser atacado por processos de corrosão.
- **Leveza:** quando comparado ao ferro fundido que atende a mesma pressão nominal (PN16), os tubos Amanco Biax são 80% mais leves e facilitam o transporte, manuseio e instalação.
- **Robusto:** Resistente à fratura frágil e à propagação lenta de fissuras devido ao processo de orientação molecular, que proporciona ao tubo a formação da parede em camadas, formando um meio não contínuo e, portanto não transmitindo a falha.



- **Facilidade de Instalação:** Os tubos Amanco Biax são mais fáceis de manusear e, na maioria dos casos, não exigem equipamentos pesados para instalação. O acoplamento simples, aliado à leveza, flexibilidade e elevada resistência ao impacto, faz a diferença em termos de custo, desempenho e velocidade da instalação em relação à tubulações feitas em outros materiais.
- **Solução Sustentável:** Os tubos Amanco Biax, quando comparados a outras soluções do mercado para a mesma aplicação, significam economias consideráveis em energia consumida para sua fabricação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

**Energia consumida pelos tubos
(matéria prima + fabricação) (kWh)**



Aplicação

A linha Amanco Biax destina-se à aplicação em sistemas enterrados de adução e distribuição de água bruta ou potável, especialmente quando o desempenho frente às cargas de impacto ou oscilações de ressonância é necessário, até uma pressão hidrostática interna de 1,6 MPa (PN16), à temperatura de 25° C.

São tubulações compatíveis e intercambiáveis com as redes existentes de ferro fundido, utilizadas pelas empresas públicas e privadas, responsáveis pelas obras de infraestrutura, na instalação e manutenção dos sistemas de adução e distribuição.

As conexões utilizadas em sistemas que utilizam tubos Amanco Biax devem ser de ferro fundido dúctil, fabricadas de acordo com a ABNT NBR 7675.

Junta Elástica

Os tubos Amanco Biax vêm com anel integrado e removível, a solução inteligente da Amanco, que une a segurança de uma junta integrada com a versatilidade de um sistema removível, para as suas necessidades em infraestrutura.

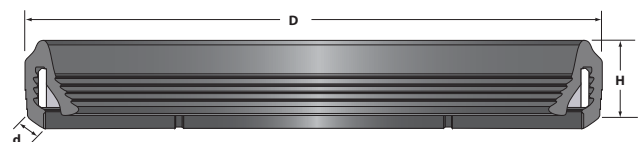
CONCEITO

O anel para o tubo Amanco Biax é do tipo misto, atuando bem para situações de pressão hidrostática e de vácuo.



Essa junta elástica possui um sistema de fixação em polipropileno, que auxilia o posicionamento do anel na bolsa dos tubos Amanco Biax, aumentando sua resistência à extrusão sobre pressão e impedindo o deslocamento do mesmo no transporte, manuseio e instalação.

Uma das vantagens da utilização do anel bilabial removível é a praticidade na instalação e manutenção de grandes trechos, tornando seu manuseio uma tarefa simples e rápida. Este sistema representa uma evolução no processo de juntas elásticas e foi projetada para facilitar uma possível substituição do anel, sem operações de alto custo.



Medidas (mm)

DN	D	d	H
100	140,1	7,0	29,4
150	196,5	8,4	35,1
200	251,2	9,3	38,6
250	307,1	10,5	43,8
300	366,5	12,8	53,3