



FRANCISCO ALBERTO CLARO
Licenciado em Engenharia Mecânica

PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO ADUTORA DE ABASTECIMENTO (ESTUDO NUMÉRICO)

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2023



PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO ADUTORA DE ABASTECIMENTO (ESTUDO NUMÉRICO)

FRANCISCO ALBERTO CLARO

Licenciado em Engenharia Mecânica

Orientador: Luís Miguel Chagas da Costa Gil,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: José Manuel Paixão Conde,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Moisés Gonçalves de Brito,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Orientador: Luís Miguel Chagas da Costa Gil,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Projeto de uma instalação adutora de abastecimento (estudo numérico)

Copyright © Francisco Alberto Claro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Luís Gil por toda a atenção, apoio e disponibilidade prestadas ao longo desta dissertação.

Agradeço também a todos os colegas de faculdade que me ajudaram ao longo do meu percurso académico, nomeadamente ao José, André, Miguel, Suraj, Daniel e Samuel.

À minha família, em particular aos meus pais, por todo o apoio e motivação, e me terem possibilitado realizar este curso. Aos meus avós e tias, por sempre acreditarem nas minhas capacidades, com especial referência à minha avó Georgina pelos valores que sempre me transmitiu.

Por último, agradeço à minha irmã Mariana pelo acompanhamento e troca de ideias proporcionadas ao longo do curso.

RESUMO

O principal objetivo desta dissertação é o de projeto e dimensionamento de uma instalação adutora de abastecimento.

Inicialmente, procedeu-se a uma pesquisa bibliográfica sobre os fenómenos de transitórios hidráulicos, abordando-se as equações fundamentais do escoamento em regime permanente e transitório em condutas. Para regime transitório apresentam-se os respetivos modelos matemáticos. Estas equações diferenciais são resolvidas pelo método das características e finalmente discretizadas. Neste contexto, apresenta-se ainda o código numérico utilizado nesta dissertação.

Seguidamente, a instalação de abastecimento, exclusivamente gravítica, é dimensionada para regime permanente. Posteriormente, dimensiona-se a instalação considerando as manobras necessárias para o seu normal funcionamento: 'Entradas em serviço', 'Saídas de serviço' e 'Fornecimento alternado dos reservatórios'.

Para cada manobra apresentam-se as envolventes da cota piezométrica e de pressão mínima concluindo sobre a integridade da instalação e a ocorrência de cavitação.

Para a generalidade dos cenários foi possível definir leis de fecho que evitavam sobrepressões elevadas e a ocorrência de cavitação. Para os cenários em que a existência de válvulas de retenção na instalação motiva a geração de transitórios hidráulicos relevantes introduziram-se reservatórios de ar comprimido (RAC).

A introdução destes dispositivos de proteção permitiu que em todos os cenários considerados fosse garantida a integridade estrutural da instalação e a não ocorrência de cavitação.

Palavras-chave: método das características, regimes transitórios, reservatório de ar comprimido, cavitação.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is the design and sizing of a supply hydraulic installation.

Initially, bibliographic research was carried out the phenomena of hydraulic transients, addressing the fundamental equations of flow in steady and transient state in ducts. For transient state, the respective mathematical models are presented. These differential equations are solved by the method of characteristics and finally discretized.

Next, the supply installation, exclusively gravitational, is dimensioned for steady state. Subsequently, the installation is dimensioned considering the necessary maneuvers for its normal operation: 'Installation start-up', 'Installation shutdown' and 'Alternate supply of reservoirs'.

For each maneuver, the piezometric level and minimum pressure in each section of the installation are presented, concluding about the installation integrity and the occurrence of cavitation.

For most scenarios it was possible to define closure laws that prevented high overpressures and the occurrence of cavitation. For the scenarios in which the existence of check valves in the installation motivates the generation of relevant hydraulic transients, air chambers were introduced.

The introduction of these protective devices allowed that in all the scenarios considered the structural integrity of the installation and the non-occurrence of cavitation were guaranteed.

Keywords: characteristics method, transient regimes, air chamber, cavitation.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Metodologia	2
1.4	Estrutura da dissertação.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Escoamento em regime permanente	5
2.1.1	Equação de Bernoulli generalizada	5
2.1.2	Linha de energia e linha piezométrica	6
2.2	Escoamento em regime transitório.....	8
2.2.1	Análise qualitativa	8
2.2.2	Modelação matemática de transitórios hidráulicos em condutas	10
2.3	Método das características	12
2.3.1	Discretização do método	12
2.3.2	Condições de fronteira.....	14
2.4	Código numérico	18
3	INSTALAÇÃO.....	21
3.1	Enquadramento	21

3.2	Problema proposto	23
3.3	Dimensionamento para regime permanente	25
3.3.1	Abastecimento simultâneo dos dois reservatórios	29
3.3.2	Abastecimento exclusivo do reservatório (C)	30
3.3.3	Abastecimento exclusivo do reservatório (D)	30
4	DIMENSIONAMENTO PARA REGIME TRANSITÓRIO	31
4.1	Considerações iniciais	31
4.2	Leis de fechos e de abertura	33
4.3	Entradas em serviço	38
4.3.1	Abastecimento simultâneo dos dois reservatórios	38
4.3.2	Abastecimento exclusivo do reservatório (C)	42
4.3.3	Abastecimento exclusivo do reservatório (D)	46
4.4	Saídas de serviço	49
4.4.1	Saída de serviço conjunta dos dois reservatórios	49
4.4.2	Saída de serviço para condição inicial de abastecimento exclusivo	63
4.4.3	Saída de serviço de apenas um dos reservatórios	65
4.5	Fornecimento alternado dos reservatórios	72
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	83
5.1	Conclusões	83
5.2	Trabalhos futuros	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Linhas de energia e piezométrica (Lencastre, 1996)	7
Figura 2.2 - Evolução temporal de uma onda de pressão (Lencastre, 1996).....	9
Figura 2.3 - Volumes de controlo. (a) Balanço de quantidade de movimento, (b) Conservação de massa (Wylie & Streeter, 1978)	10
Figura 2.4 - Malha (método das características) (Wylie et al., 1993)	12
Figura 3.1 - Instalação adutora de abastecimento	24
Figura 4.1 - Representação da instalação (Interface gráfica do software).....	31
Figura 4.2 - Lei de fecho 1.....	34
Figura 4.3 - Lei de fecho 2.....	34
Figura 4.4 - Caudal na válvula 3 (Saída de serviço para abastecimento exclusivo do reservatório (C)).....	35
Figura 4.5 - Lei de fecho 3 (Fornecimento alternado dos reservatórios).....	36
Figura 4.6 - Lei de abertura 1	37
Figura 4.7 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário ES1)	38
Figura 4.8 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário ES1).....	39
Figura 4.9 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário ES1)	40
Figura 4.10 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário ES1).....	40
Figura 4.11 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário ES1)	41
Figura 4.12 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário ES1)	41
Figura 4.13 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário ES2)	42
Figura 4.14 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário ES2)	43
Figura 4.15 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário ES2).....	44
Figura 4.16 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário ES2)	45

Figura 4.17 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário ES2)	45
Figura 4.18 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário ES3)	46
Figura 4.19 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário ES3)	47
Figura 4.20 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário ES3)	47
Figura 4.21 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário ES3)	48
Figura 4.22 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário ES3)	48
Figura 4.23 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário SS1)	49
Figura 4.24 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário SS1)	50
Figura 4.25 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS1)	51
Figura 4.26 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS1)	51
Figura 4.27 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS1)	52
Figura 4.28 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS1)	53
Figura 4.29 - Caudal volúmico a jusante da válvula de retenção (cenário SS2)	54
Figura 4.30 - Caudal volúmico a jusante da válvula 2 (cenário SS2)	54
Figura 4.31 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS2)	55
Figura 4.32 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS2)	56
Figura 4.33 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS2)	57
Figura 4.34 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS2)	57
Figura 4.35 - Representação da instalação com reservatório hidropneumático	58
Figura 4.36 - Envolventes da cota piezométrica sem e com RAC, variante troço AD (cenário SS2)	59
Figura 4.37 - Envolvente da pressão absoluta mínima sem e com RAC, desde V2 até reservatório (D) (cenário SS2)	60
Figura 4.38 - Pressão absoluta estática a montante da válvula de retenção com RAC (cenário SS2)	61
Figura 4.39 - Pressão absoluta estática à entrada do reservatório hidropneumático (cenário SS2)	62
Figura 4.40 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS3)	63
Figura 4.41 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS3)	64
Figura 4.42 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS4)	64
Figura 4.43 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS4)	65
Figura 4.44 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário SS5)	66
Figura 4.45 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário SS5)	66

Figura 4.46 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS5).....	67
Figura 4.47 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS5)	67
Figura 4.48 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS5).....	68
Figura 4.49 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS5).....	68
Figura 4.50 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário SS6).....	69
Figura 4.51 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário SS6)	69
Figura 4.52 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS6).....	70
Figura 4.53 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS6)	71
Figura 4.54 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS6).....	71
Figura 4.55 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS6).....	72
Figura 4.56 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário FA1).....	73
Figura 4.57 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário FA1)	74
Figura 4.58 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário FA1)	75
Figura 4.59 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário FA1)	75
Figura 4.60 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário FA1).....	76
Figura 4.61 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário FA1)	76
Figura 4.62 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário FA2).....	77
Figura 4.63 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário FA2)	78
Figura 4.64 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário FA2)	79
Figura 4.65 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário FA2)	79
Figura 4.66 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário FA2).....	80
Figura 4.67 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário FA2)	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características do troço AB.....	27
Tabela 3.2 - Características do troço BC.....	27
Tabela 3.3 - Características do troço BD.....	28
Tabela 3.4 - Características dos reservatórios de receção.....	28
Tabela 3.5 - Características do reservatório de alimentação.....	28
Tabela 4.1 - Características das leis de fecho 1 e 2.....	34
Tabela 4.2 - Características da lei de fecho 3.....	36
Tabela 4.3 - Características da lei de abertura 1.....	37
Tabela 4.4 - Entrada de dados para o RAC.....	58

SIGLAS

C45	Curva a 45°
eq.	Equivalente
J60	Joelho a 60°
J90	Joelho a 90°
mca	Metros coluna de água
RAC	Reservatório de ar comprimido
V1	Válvula de esfera 1
V2	Válvula de seccionamento 2
V3	Válvula de seccionamento 3
V4	Válvula de seccionamento 4
V5	Válvula de retenção 5

SÍMBOLOS

L	Comprimento [L]
V	Velocidade [LT^{-1}]
A	Área da secção transversal [L^2]
H	Altura, carga total [L]
D	Diâmetro [L]
C^+	Linha característica a montante
C^-	Linha característica a jusante
C_v	Coefficiente de caudal
Q	Caudal volúmico [L^3T^{-1}]
Δ	Varição de ...
t	Tempo [T]
c	Celeridade de uma onda [LT^{-1}]
ρ	Massa volúmica [ML^{-3}]
p	Pressão [$ML^{-1}T^{-2}$]
f	Coefficiente de atrito
g	Aceleração gravítica [LT^{-2}]
z	Coordenada [L]

V	Volume [L^3]
S	Secção de uma conduta [L^2]
t_s	Tempo de estabilização [T]

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O golpe de aríete pode ser facilmente reconhecido através do ruído gerado por este fenómeno. Este ruído é frequentemente causado por uma manobra de fecho de uma válvula ou corte de alimentação elétrica de bombas. Assim sendo, considera-se que se está na presença de um golpe de aríete quando, num regime transitório, as solicitações correspondentes às ondas de pressão são muito elevadas, o que implicará a existência de forças elásticas no fluido e na tubagem, assim como variação da massa volúmica (escoamento compressível).

A ocorrência de golpe de aríete pode ter impactos severos numa instalação, tais como rotura de tubagem, falha dos equipamentos, fadiga e deformação do material, vibração, desvios de posição da tubagem e cavitação.

De forma a acautelar a ocorrência destes fenómenos, deve então ser realizada uma análise de forma a apurar quais os valores de pressão máxima e mínima ao longo de uma dada conduta, pretendendo assim assegurar que a pressão máxima admissível do material não é excedida e obter informações relativas à ocorrência de cavitação. Neste processo revela-se fundamental realizar uma análise aprofundada, recorrendo a softwares que realizem cálculo numérico, nomeadamente através do método das características.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo o projeto de uma instalação hidráulica adutora de abastecimento.

Assim, é primeiramente caracterizada e dimensionada a instalação para regime permanente.

De seguida, dimensiona-se a instalação para regime transitório, analisando-se os cenários inerentes ao normal funcionamento da instalação. Caso se verifique provável a ocorrência de sobrepressões elevadas ou ocorrência de cavitação, introduzem-se e dimensionam-se dispositivos de proteção que atenuem estes fenómenos.

Os objetivos específicos são:

- dimensionar a instalação para regime permanente;
- implementar os regimes transitórios através de simulações numéricas para cenários estabelecidos;
- analisar os resultados numéricos correspondentes;
- seleccionar e dimensionar os dispositivos de proteção mais adequados ao estudo.

1.3 Metodologia

As simulações numéricas a realizar serão efetuadas com recurso ao software comercial AFT Impulse. Assim, é primeiramente introduzida, no software, a instalação a estudar (reservatórios de alimentação e receção, condutas e acessórios). Na segunda fase, são introduzidos os valores obtidos através do dimensionamento da secção (valores estes correspondentes às propriedades do fluido, cotas de superfície dos reservatórios, cotas de entrada e saída dos reservatórios, comprimentos das condutas, diâmetros das condutas, pressão nos reservatórios, coeficientes de perda de carga ou caudal dos acessórios e propriedades inerentes ao material da conduta). Na terceira fase serão introduzidos os parâmetros relativos aos regimes transitórios a simular. Posteriormente, é efetuada a simulação correspondente e serão analisados os resultados, sendo decidido, caso necessário, quais os dispositivos de proteção mais adequados a introduzir na instalação.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos:

1. Introdução
2. Revisão bibliográfica
3. Instalação
4. Dimensionamento para regime transitório
5. Conclusões e trabalhos futuros

No primeiro capítulo realiza-se uma introdução ao trabalho, apresentando-se o enquadramento, os objetivos, a metodologia e a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo abordam-se as equações fundamentais do escoamento em regime permanente e transitório em condutas, apresentando-se os modelos matemáticos que caracterizam os transitórios hidráulicos. Apresentam-se ainda os métodos numéricos implementados no método das características. Finalmente, apresenta-se o código numérico utilizado.

No terceiro capítulo define-se e dimensiona-se a instalação, exclusivamente gravítica, para regime permanente.

No quarto capítulo dimensiona-se a instalação em regime transitório, aplicando três casos necessários ao seu normal funcionamento: 'Entradas em serviço', 'Saídas de serviço' e 'Fornecimento alternado dos reservatórios'. Em paralelo são analisados os respetivos resultados criteriosamente.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões obtidas da análise de resultados, e as propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Escoamento em regime permanente

Entende-se por escoamento em regime permanente aquele em que não existe dependência do tempo. Nas secções 2.1.1 e 2.1.2 apresentam-se as equações relevantes para o presente trabalho que regem o escoamento nestas condições.

2.1.1 Equação de Bernoulli generalizada

No dimensionamento de uma instalação hidráulica é fundamental ter presente a relação matemática que caracteriza o escoamento ao longo de uma linha de corrente. Para o efeito, apresenta-se a equação de conservação de energia para sistemas abertos ou equação de Bernoulli generalizada (equação (2.1)). Assim, assume-se que a variação da massa volúmica é nula, o que permite obter ao longo de uma linha de corrente:

$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_M + H_M = \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_J + \Delta H_{MJ} \quad (2.1)$$

Onde os índices M e J são referentes às secções a montante e jusante e p , V e Z aos valores médios de pressão, velocidade e cota nas respetivas secções. O termo ΔH_{MJ} é associado à perda de carga, as quais podem ser distribuídas decorrentes das perdas por atrito na tubagem, e das perdas localizadas, associadas aos acessórios presentes na instalação, podendo estas ser calculadas através do coeficiente de perda global K_{eq} , que contempla ambas as perdas. Já o termo dado por H_M representa a energia por unidade de peso que assegura o movimento do fluido.

Dado as secções a montante e jusante, de forma geral, começarem e terminarem em superfícies livres de grandes reservatórios, a velocidade é nula e os valores de pressão e cota conhecidos, donde:

$$H = \Delta H_{piez} + K_{eq} Q^2 \quad (2.2)$$

A equação (2.2) apresentada permite assim obter o valor de caudal em regime permanente numa dada instalação hidráulica, conhecidas as perdas de carga globais da instalação e a diferença de cotas piezométricas entre os pontos M e J, dado na equação, por ΔH_{piez} .

Nesta dissertação, opta-se por utilizar o código numérico para a obtenção dos caudais em regime permanente. No entanto, estes podem ser calculados analiticamente por meio de processo iterativo.

Além dos caudais importa também perceber de que forma a energia e a pressão evolui ao longo da instalação em condições permanentes de funcionamento. Na secção 2.1.2 apresenta-se este mesmo conceito através da linha de energia e linha piezométrica.

2.1.2 Linha de energia e linha piezométrica

Para o projeto de uma instalação importa conhecer em detalhe as pressões no interior das condutas, de forma a que não se proporcionem condições para a vaporização do fluido (cavitação).

Uma forma de verificar se existe perigo de ocorrência de cavitação faz-se através da linha piezométrica. O conceito de linhas de energia e piezométrica apresenta-se através do exemplo seguinte.

Considere-se uma conduta de secção S , em que se escoar um determinado caudal Q , representada na Figura 2.1. A energia total por unidade de peso em cada secção (z_E) é dada por:

$$z_E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Já a linha piezométrica, que representa, em altura, a soma das energias potencial e de pressão, é dada por:

$$z_p = z + \frac{p}{\rho g} \quad (2.4)$$

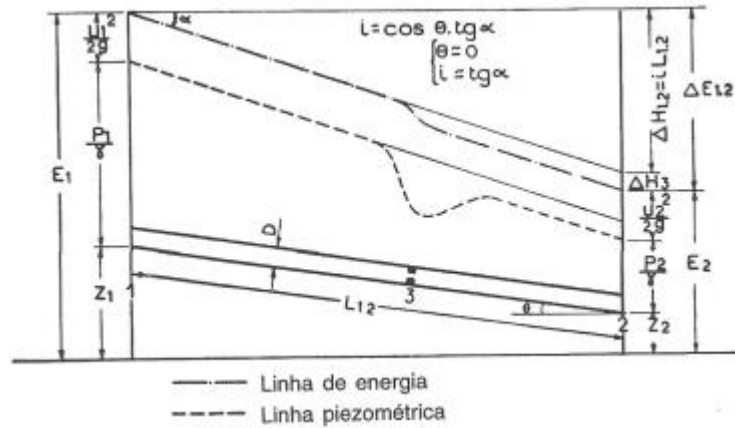


Figura 2.1 - Linhas de energia e piezométrica (Lencastre, 1996)

Como se pode verificar pela Figura 2.1, se a secção da conduta se mantém constante, a linha piezométrica é paralela à linha de energia e dista dela um comprimento igual a $V^2/2g$. Pela mesma figura, verifica-se que a um aumento localizado de velocidade (diminuição de secção) corresponde um abaixamento da linha piezométrica, enquanto que a uma diminuição de velocidade (aumento de secção) corresponde uma elevação da linha piezométrica.

Com a introdução de regimes transitórios podem obter-se as envolventes da cota piezométrica máximas e mínimas que permitem em conjunto com a linha piezométrica para regime permanente analisar detalhadamente as pressões ao longo da instalação. Neste contexto, apresenta-se na secção 2.2 os modelos matemáticos que caracterizam o escoamento em regime transitório.

2.2 Escoamento em regime transitório

O regime transitório representa o regime variável que ocorre na passagem de um regime permanente para outro regime permanente, em que os valores de pressão e velocidade são função do tempo. A ocorrência de regimes transitórios, nomeadamente em escoamento sob pressão (choque hidráulico), representa uma situação recorrente numa instalação hidráulica.

O fenómeno do golpe de aríete representa assim um fenómeno de propagação de ondas de pressão quer no fluido quer na tubagem, pelo que os modelos matemáticos a utilizar neste tipo de estudos são modelos elásticos.

Podendo este fenómeno ter repercussões bastante graves num sistema hidráulico, torna-se importante entender a explicação física do golpe de aríete.

2.2.1 Análise qualitativa

Considere-se uma bomba que, através de uma conduta AB, alimenta um reservatório, conforme representado na Figura 2.2. (Lencastre, 1996)

Se o caudal através da bomba se anular instantaneamente, a válvula de retenção colocada imediatamente a jusante fecha-se (Figura 2.2 a)), e a camada de líquido imediatamente a jusante da válvula pára também; ainda assim, as camadas de líquido vizinhas têm tendência a seguir o movimento e a afastar-se da bomba, provocando uma redução local de pressão, de que resulta a descompressão do líquido e conseqüente contração da conduta. Este efeito de contração da conduta, cria uma disponibilidade temporária de massa de líquido que permite manter em movimento o líquido a jusante, cujo movimento termina, descomprimindo-se e fornecendo um volume que permite o movimento da camada seguinte, e assim sucessivamente.

Gera-se, deste modo, uma onda de depressão que se propaga na direção do reservatório, com celeridade c . Assim, a onda atingirá o reservatório ao fim do tempo $t = L/c$, em que L representa o comprimento da conduta, entre a bomba e o reservatório.

Isto significa que, ao fim do tempo t , a pressão na secção B na passagem da conduta para o reservatório é inferior à pressão no reservatório, o que promove um escoamento no sentido inverso. Este escoamento restabelece a pressão nas sucessivas camadas de líquido anteriormente descomprimidas, restabelecendo o estado inicial da camada de líquido (Figura 2.2 b)). Esta onda de equilíbrio propaga-se e atinge a válvula no tempo $2t$, a contar do início

do fenómeno, e é obrigada a parar. Esta redução de energia cinética provoca um aumento local da pressão, que provoca uma compressão do líquido e alargamento da conduta. Este alargamento transmite-se até ao reservatório, onde chega ao fim de $3t$ (Figura 2.2 c)).

Quando a onda atinge o reservatório, como a pressão neste é agora menor do que a pressão da conduta, o escoamento reverte novamente, sendo atingidas as condições iniciais de pressão e velocidade até que, em $4t$, a onda atinge a válvula, e são criadas condições para reiniciar o processo, através de uma nova onda de depressão (Figura 2.2 d)). Ainda assim, este fenómeno acaba por terminar em virtude do efeito das perdas de carga e a deformação das paredes (resultado das variações de pressão).

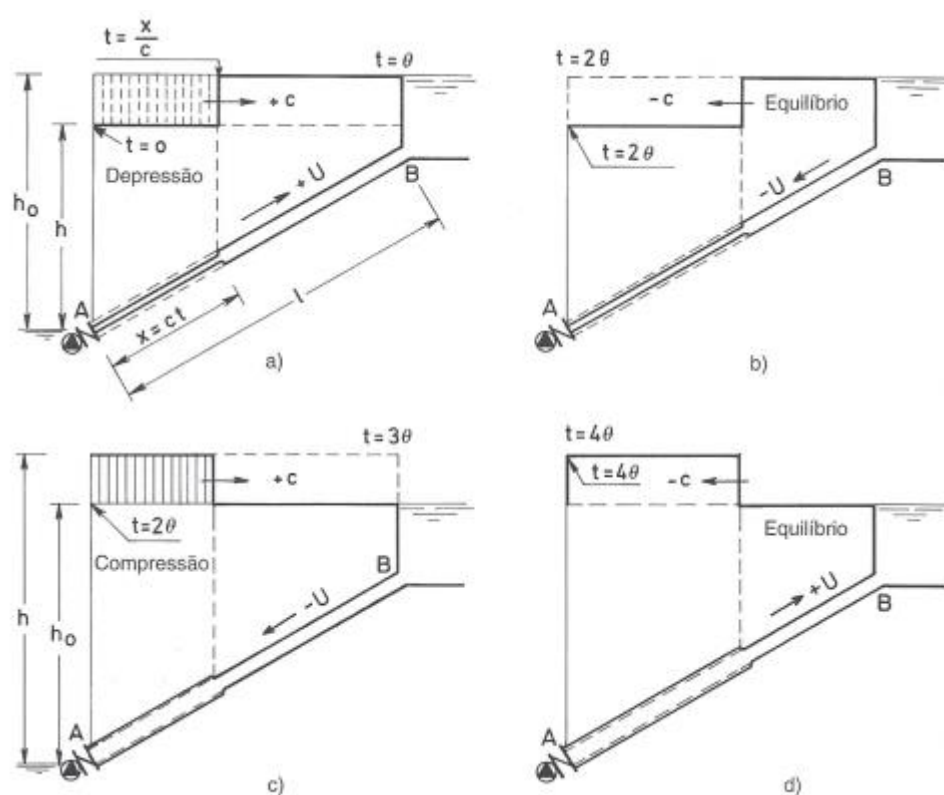


Figura 2.2 - Evolução temporal de uma onda de pressão (Lencastre, 1996)

No caso do fecho brusco de uma válvula, a primeira onda seria de sobrepressão. Ao fim do tempo t gerar-se-ia no reservatório uma onda de equilíbrio, que se propagaria até à válvula onde chegaria no tempo $2t$. Iniciar-se-ia então uma onda de depressão que atingiria o reservatório no tempo $3t$, seguindo-se uma onda de equilíbrio que atingiria a válvula no tempo $4t$, recomeçando o fenómeno.

2.2.2 Modelação matemática de transitórios hidráulicos em condutas

Existem duas equações fundamentais que permitem caracterizar matematicamente o comportamento de uma onda de pressão devido a um transitério hidráulico. Estas equações dizem respeito à equação de quantidade de movimento e a equação da conservação de massa. A partir destas equações são obtidas as equações diferenciais de primeira ordem fundamentais do escoamento compressível no modelo elástico em condutas, em que Wylie et al. (1993) e Chaudhry (1987) tiveram uma importante contribuição.

Na Figura 2.3 (a) e (b) representam-se os volumes de controlo correspondentes às grandezas que permitem obter as equações simplificadas para o balanço de quantidade de movimento e conservação de massa, respetivamente.

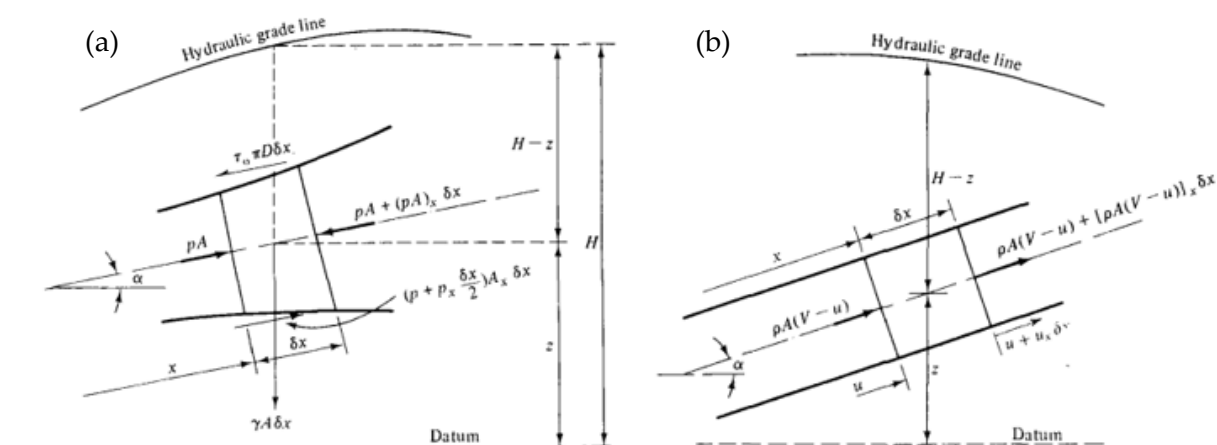


Figura 2.3 - Volumes de controlo. (a) Balanço de quantidade de movimento, (b) Conservação de massa (Wylie & Streeter, 1978)

Para estabelecer o sistema de equações diferenciais, têm de ser admitidas as seguintes hipóteses simplificativas:

- O escoamento é unidimensional e o perfil de velocidades é uniforme;
- As paredes da conduta e o fluido são linearmente elásticos (a tensão é proporcional à deformação);
- Os efeitos elásticos na conduta e fluido são moderados;
- Os modelos usados para o cálculo das perdas por atrito em regime permanente são válidos para o regime transitório (lei de Darcy-Weisbach).

Assim, consideradas as hipóteses acima apresentadas, os balanços infinitesimais da quantidade de movimento e conservação de massa permitem obter as seguintes equações diferenciais:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.6)$$

Uma vez que velocidade do escoamento é pequena relativamente à celeridade da onda de pressão, os termos convectivos ($V \frac{\partial p}{\partial x}$ e $V \frac{\partial V}{\partial x}$) podem ser desprezados, assim como o termo resultante da inclinação da conduta ($g \sin \theta$). Desta forma, são obtidas as equações em termos de altura já simplificadas relativamente aos termos referidos, do qual se tem que:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.8)$$

Pelo facto das equações (2.5) e (2.6) não apresentarem solução analítica geral, torna-se necessário aplicar métodos numéricos para a resolução deste tipo de equações, de forma a poder obter uma aproximação da solução das equações referidas. O método numérico utilizado denomina-se por método das características, sendo este método que permite simular os regimes transitórios através de vários softwares comerciais. Na secção 2.3 apresentam-se os modelos matemáticos que apoiam o método das características e permitem resolver estas mesmas equações.

2.3 Método das características

2.3.1 Discretização do método

As equações (2.5) e (2.6), apresentadas na secção 2.2.2, são resolvidas numericamente através do método das características, sendo assim combinadas linearmente com um multiplicador λ , o que permite obter um sistema de equações correspondentes às equações C^+ e C^- , que descrevem as linhas características no plano $(x-t)$, dado a velocidade e a altura serem funções de x e t (variáveis dependentes). Para a discretização destas equações, utilizando o esquema de diferenças finitas apresentado em Wylie & Streeter (1978), a conduta é dividida em N elementos iguais, com passo de tempo igual a $\Delta t = \Delta x/a$ e passo ao longo da conduta igual a $\Delta x = L/N$, com $a = c$. A malha $(x-t)$ utilizada para a discretização das equações características C^+ e C^- encontra-se apresentada na Figura 2.4 (Wylie & Streeter, 1978).

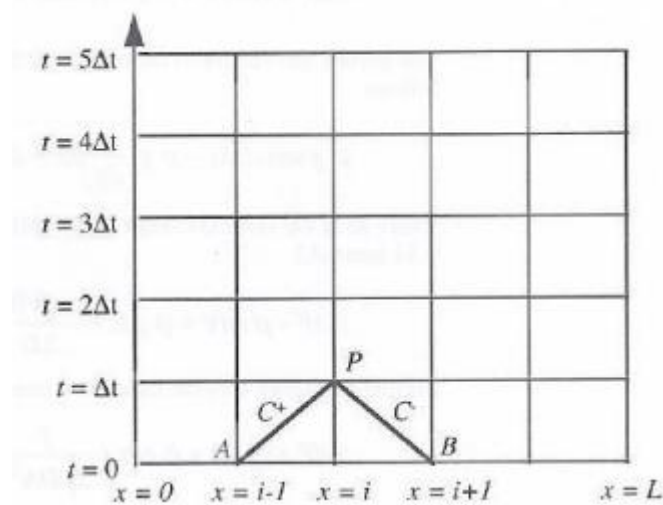


Figura 2.4 - Malha (método das características) (Wylie et al., 1993)

Integrando as equações diferenciais através das duas linhas características C^+ e C^- , pode-se obter as seguintes equações em ordem ao caudal e cota piezométrica:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA}(Q_p - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (2.9)$$

$$H_P - H_B + \frac{a}{gA}(Q_p - Q_B) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (2.10)$$

Resolvendo estas equações em ordem à cota piezométrica no ponto P, obtém-se:

$$C^+: H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A|Q_A| \quad (2.11)$$

$$C^-: H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) - RQ_B|Q_B| \quad (2.12)$$

Com,

$$B = \frac{a}{gA} \quad (2.13)$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (2.14)$$

Sendo B a impedância característica da tubagem e R o coeficiente de resistência da tubagem.

Como os valores de caudal e cota piezométrica são conhecidos para regime permanente, ou seja, para $t = 0$, é possível calcular através do método os valores de H e Q para o nó interior i no instante $t = \Delta t$, por serem já conhecidos os valores no nós correspondentes a $i - 1$ e $i + 1$ para $t = 0$ (regime permanente).

Deste modo, as equações (2.13) e (2.14) podem ser escritas da seguinte forma simplificada:

$$C^+: H_i = C_p - B_P Q_i \quad (2.15)$$

$$C^-: H_i = C_M + B_M Q_i \quad (2.16)$$

Onde C_p e C_M são constantes, dadas por:

$$C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (2.17)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (2.18)$$

Pelo que resolvendo as equações em ordem a H e Q para o nó interior i , tem-se:

$$H_i = (C_P + C_M)/2 \quad (2.19)$$

$$Q_i = (C_P - C_M)/2B \quad (2.20)$$

Nas fronteiras da malha, apenas uma das equações das características pode ser aplicada, sendo necessário introduzir uma equação que relacione o caudal e a cota piezométrica.

Conforme representado na malha da Figura 2.4, os nós das extremidades influenciam os nós interiores após a primeira iteração, pelo que se torna necessário introduzir condições de fronteira apropriadas.

2.3.2 Condições de fronteira

2.3.2.1 Reservatórios

Para um reservatório de grandes dimensões transversais, tem-se a condição de fronteira dada pelo valor de pressão à entrada da conduta, o qual é dependente da altura da junção conduta-reservatório. Conhecido este valor, tem-se o valor da pressão referida, donde é possível solucionar a condição de fronteira, dada por,

$$H_i = H_R \rho g + P_{Sup} \quad (2.21)$$

No qual H_R corresponde à cota piezométrica na junção do reservatório com a conduta relativamente à superfície livre, sendo considerado constante este valor. Caso este valor não seja constante, deverá ser inserido nas equações para cada passo de tempo o seu valor.

Para o caudal as condições são dadas pelas equações de compatibilidade, o que para o caso de um reservatório na extremidade a montante, tem-se pela equação de compatibilidade negativa C^- ,

$$Q_i = \frac{H_R - C_M}{B_M} \quad (2.22)$$

Da mesma forma, para um reservatório na extremidade a jusante, tem-se pela equação de compatibilidade C^+ ,

$$Q_i = \frac{C_P - H_R}{B_P} \quad (2.23)$$

2.3.2.2 Válvulas

Assumindo escoamento em regime permanente, o caudal pode ser aproximado através da seguinte expressão,

$$Q_0 = \pm(C_d A)\sqrt{2g\Delta H_0} \quad (2.24)$$

Sendo C_d o coeficiente de caudal para regime permanente, no qual o índice 0 diz respeito ao valor das variáveis para este regime.

Dado a presença de uma válvula estar associada a uma perda de carga localizada denominada por ΔH_0 , tem-se que a equação que relaciona a queda de pressão em função do caudal é dada por,

$$H_{i,montante} - H_{i,jusante} = R_{v\u00e1lvula} Q_{v\u00e1lvula}^2 \quad (2.25)$$

Onde $R_{v\u00e1lvula}$ representa a resist\u00eancia da v\u00e1lvula.

Substituindo as equa\u00e7\u00f5es de compatibilidade na equa\u00e7\u00e3o 2.34 apresentada, tem-se as solu\u00e7\u00f5es para escoamento positivo e negativo respectivamente dadas por,

$$Q_{v\u00e1lvula} = -\frac{1}{R_{v\u00e1lvula}}(B_{P,mont} - B_{P,jus}) - \sqrt{\frac{1}{R_{v\u00e1lvula}^2}(B_{P,mont} - B_{P,jus})^2 + \frac{4}{R_{v\u00e1lvula}}(C_{P,mont} - C_{P,jus})} \quad (2.26)$$

$$Q_{v\u00e1lvula} = \frac{1}{R_{v\u00e1lvula}}(B_{P,mont} - B_{P,jus}) - \sqrt{\frac{1}{R_{v\u00e1lvula}^2}(B_{P,mont} - B_{P,jus})^2 + \frac{4}{R_{v\u00e1lvula}}(C_{P,mont} - C_{P,jus})} \quad (2.27)$$

2.3.2.3 Válvulas de retenção

Para as válvulas de retenção, sendo conhecido o seu coeficiente de caudal C_v , a sua condição de fronteira é semelhante às válvulas descritas na secção anterior, à exceção de quando existe reversão do escoamento.

Para estimar a desaceleração do fluido que pode ser calculada a partir da velocidade inicial em regime permanente, quando o fluido começa a desacelerar e para o instante e velocidade em que o fluido inverte pela primeira vez através da válvula.

Nas curvas adimensionais utilizam-se as seguintes equações,

$$\text{Desaceleração adimensional} = \left(\frac{V_0 - V_{inv}}{t_{inicial} - t_{inv}} \right) \frac{D}{V_{min}^2} \quad (2.28)$$

Onde,

- V_0 - Velocidade do fluido em regime permanente
- V_{inv} - Velocidade do fluido após inversão
- $t_{inicial}$ - Instante do início da desaceleração
- t_{inv} - Instante em que o fluido inverte o sentido
- D - Diâmetro da conduta
- V_{min} - Velocidade mínima para manter a válvula totalmente aberta

E,

$$\text{Velocidade máxima inversa adimensional} = \left(\frac{V_{max,inv}}{V_{min}} \right) \quad (2.29)$$

Onde,

- $V_{max,inv}$ - Velocidade máxima inversa para a qual a válvula fecha

A velocidade máxima a que a válvula irá fechar é determinada a partir do gráfico de Velocidade Máxima Inversa vs. Desaceleração do fluido especificado, utilizando a desaceleração do fluido calculada.

Aplicando este modelo, pode conhecer-se o caudal no nó da válvula ao longo do tempo. Esta informação utiliza-se como condição de fronteira.

2.3.2.4 Reservatório de ar comprimido

Num reservatório hidropneumático, o balanço de massa é idêntico a uma junção tripla. Assim, para todas as condutas ao qual está ligado,

$$H_i = \frac{S_C + Q_{ext}}{S_B} \quad (2.30)$$

Onde, Q_{ext} representa que entra ou sai do reservatório hidropneumático.

Por seu lado, as perdas de carga na conduta de ligação são introduzidas da seguinte forma,

$$H_i = H_{i,ar} - C_1 - C_2 Q_i \quad (2.31)$$

Onde C_1 e C_2 são valores dependentes da perda de carga na ligação da conduta principal ao reservatório hidropneumático.

No contexto deste trabalho, apresenta-se apenas o caso em que a perda de carga é introduzida por orifício calibrado,

$$C_1 = H_3 - H_1 \quad (2.32)$$

$$C_2 = \frac{1}{|\rho C_D^2 A_0^2|} |Q_2| \quad (2.33)$$

O volume de ar e pressão no interior do reservatório relacionam-se considerando um processo politrópico,

$$P_{i,ar} \forall_{i,ar}^n = C_{ar} \quad (2.34)$$

Aplicando a conservação de massa,

$$\forall_{i,ar} = \forall_{i-1,ar} - (Q_{i,ar} + Q_{i-1,ar}) \frac{\Delta t}{2\rho} \quad (2.35)$$

Combinando e simplificando,

$$(C_3 + C_4 Q_{i,ar}) + (C_5 + C_6 Q_{i,ar})^n = C_{ar} \quad (2.36)$$

Em que,

$$C_3 = \frac{S_C}{S_B} + C_1 \quad (2.37)$$

$$C_4 = \frac{1}{S_B} + C_2 \quad (2.38)$$

$$C_5 = V_{i-1,ar} + Q_{i-1,ar} \frac{\Delta t}{2\rho} \quad (2.39)$$

$$C_6 = \frac{\Delta t}{2\rho} \quad (2.40)$$

Para a determinação de $Q_{i,ar}$, a equação (2.35) resolve-se aplicando um método numérico. Em (Lousa, 2011), esta equação resolve-se numericamente aplicando o método de Newton-Raphson.

2.4 Código numérico

O código numérico usado no presente trabalho é baseado no método das características e permite a modelação, simulação e resolução de problemas para regime permanente e transitório em sistemas hidráulicos. Através da discretização do sistema, o programa fornece ao utilizador os valores de velocidade e pressão para qualquer instante e em qualquer secção da instalação, assim como as características de válvulas e dispositivos de proteção. Antes de ser calculada a solução para regime transitório, têm de ser satisfeitas as condições para regime permanente, no qual são definidas as condições iniciais do sistema, através da equação de Bernoulli, sendo estas condições utilizadas no método das características para simular o regime transitório.

Para a simulação em regime transitório é necessário definir os dados a introduzir associados ao sistema hidráulico a estudar.

- Fluido:
 - Fluido considerado;
 - Temperatura do fluido.
- Reservatórios:
 - Cota piezométrica da superfície livre do reservatório;
 - Pressão da superfície livre;
 - Cota piezométrica da conduta de ligação;
 - Perdas de carga.
- Condutas:
 - Comprimento de cada conduta;
 - Diâmetro;
 - Material;
 - Velocidade de propagação da onda de pressão.
- Válvulas de seccionamento:
 - Perda de carga;
 - Cota da válvula;
 - Lei de fecho da válvula.
- Válvula antirretorno:
 - Perda de carga;
 - Cota da válvula;
 - Velocidade para fechar a válvula;
 - Variação de pressão para reabertura da válvula.
- Reservatório de ar comprimido:
 - Constante politrópica;
 - Volume de gás inicial.
- Acessórios de ligação:
 - Perda de carga;
 - Cota do acessório.
- Discretização do sistema:
 - Número de nós na conduta de menor comprimento;
 - Tempo de simulação;
 - Modelo de cavitação.

INSTALAÇÃO

3.1 Enquadramento

Até a água chegar ao consumidor final, é necessário que várias etapas sejam satisfeitas. Estas etapas compreendem a sua captação, tratamento, adução/transporte, armazenamento, distribuição e utilização.

A captação de água, nomeadamente para consumo humano, pode ser feita através de origens superficiais ou subterrâneas. As fontes de origem subterrânea, podem ser por meio de aberturas de poços profundos, galerias de minas e nascentes e as de origem superficial por meio de captação em rios, lagos, albufeiras e por vezes, no mar (Santos, 2017).

Para que as etapas do processo de abastecimento sejam cumpridas, as necessidades de consumo devem ser tidas em conta no projeto de um sistema de abastecimento. Estas podem ser divididas em necessidades de consumo doméstico, comercial, industrial e público.

Atendendo ao consumo doméstico, para satisfazer as necessidades básicas diárias, um ser humano necessita de aproximadamente 110 litros, de acordo com as Nações Unidas, sendo o consumo médio diário em Portugal de 190 litros por habitante.

De acordo com o Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto Do Ministério Das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 1995 (Título II, Capítulo I, Artigo 13.º), as captações na distribuição exclusivamente domiciliária, não devem, qualquer que seja o horizonte de projeto ser inferiores aos seguintes valores:

- a) 80 l/habitante/dia até 1000 habitantes;
- b) 100 l/habitante/dia de 1000 a 10000 habitantes;
- c) 125 l/habitante/dia para valores de 10000 a 20000 habitantes;
- d) 150 l/habitante/dia para valores de 20000 a 50000 habitantes;

e) 175 l/habitante/dia acima de 50000 habitantes.

Relativamente ao sistema de abastecimento, este consiste no conjunto de infraestruturas, serviços e equipamentos com o propósito de servir água para o consumidor. Este sistema é, normalmente composto pelas seguintes infraestruturas e serviços: Captação de água bruta (ou não tratada); Adução de água bruta e tratada; Estações elevatórias; Estações de tratamento de água; Reservatórios; Rede de distribuição.

A adução designa o transporte de água entre as unidades que precedem a rede de distribuição. Estas condutas desempenham um papel fundamental para o abastecimento, principalmente quando constituídas por uma só linha, sendo que qualquer interrupção que venham a sofrer, implicará consequências no abastecimento de toda a população.

Quanto à energia utilizada para movimentação da água, as adutoras podem ser classificadas em:

- Adutoras por gravidade;
- Adutoras por bombeamento;
- Adutoras mistas (com percursos por bombeamento e por gravidade).

Relativamente ao período de funcionamento, as adutoras por gravidade podem satisfazer um período de 24h/dia, enquanto que para as adutoras por bombeamento este período pode variar entre 16 a 20h/dia, de forma a prevenir eventuais avarias ou faltas de energia, em virtude da necessidade de bombeamento.

3.2 Problema proposto

O sistema de adução a projetar caracteriza-se por ser gravítico e pretende-se abastecer uma vila com uma população de 17000 habitantes, tendo sido considerada uma capitação (consumo diário por habitante) de 260 l/habitante/dia.

Assim, o caudal diário de água (volume diário de água) a transportar é estimado em:

$$Q_d = 17000 \times 260 = 4420000 \text{ l/dia}$$

Donde vem, o caudal médio volúmico, em l/s, correspondente às necessidades diárias, considerando um horário de fornecimento uniforme:

$$Q = \frac{4420000 \text{ l/dia}}{24 \text{ h} \times 3600 \text{ s}} = 51 \text{ l/s}$$

A solução proposta, de forma a satisfazer as respetivas necessidades acima calculadas, consiste numa instalação de distribuição de água a partir de um reservatório superior (A) que abastece os dois reservatórios inferiores (C) e (D).

Neste contexto, os reservatórios (C) e (D) deverão assegurar 75 % e 25 % das necessidades diárias, respetivamente. Deste modo, os caudais médios diários para cada reservatório deverão ser no mínimo iguais a:

$$Q_C = 0,75 \times 51 = 38 \text{ l/s}$$

$$Q_D = 0,25 \times 51 = 13 \text{ l/s}$$

Para a instalação representada na Figura 3.1 analisam-se 3 casos de estudo:

1. Abastecimento simultâneo dos dois reservatórios;
2. Abastecimento exclusivo do reservatório (C);
3. Abastecimento exclusivo do reservatório (D).

Para a definição das características da instalação, nomeadamente comprimento das condutas e acessórios a instalar, é necessário fazer um levantamento da topologia do terreno e o respetivo estudo geológico e geotécnico do mesmo.

Estes estudos não estão no âmbito desta dissertação, desta forma foi definida a geometria da instalação, no que diz respeito ao comprimento e posicionamento das condutas, conforme representado na figura abaixo.

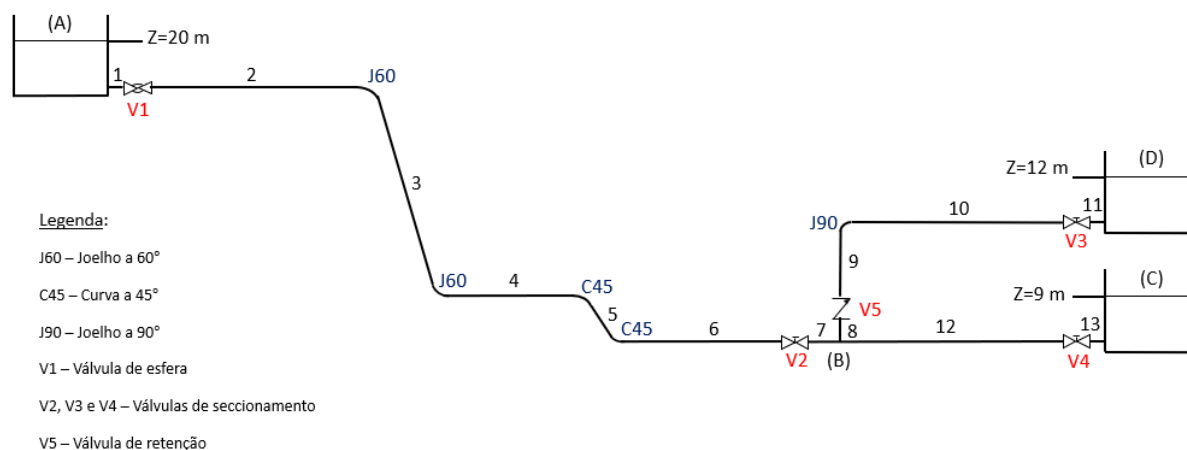


Figura 3.1 - Instalação adutora de abastecimento

Relativamente ao traçado geométrico da instalação, utilizaram-se diversos acessórios de ligação entre as condutas (numeradas de 1 a 13 na figura), tais como dois joelhos com uma inclinação de 60° para a interligação das condutas 2 e 3 e das condutas 3 e 4, duas curvas com uma inclinação de 45° para a interligação das condutas 4 e 5 e das condutas 5 e 6, assim como um joelho com uma inclinação de 90° no troço superior da ramificação para ligação das condutas 9 e 10. Por qualquer alteração na direção do escoamento provocar forças sobre as condutas, todos os acessórios que alteram a direção do escoamento devem ser ancorados por forma a resistir às forças devidas às alterações da quantidade de movimento (que ocorrem quer para regime permanente quer para regime transitório).

Foram ainda introduzidas duas válvulas de seccionamento na proximidade dos reservatórios de receção (V3 e V4) e uma válvula de esfera na proximidade do reservatório de alimentação (V1), para que, no caso de rompimento ou manutenção de alguma das condutas da instalação, a quantidade de água perdida seja a menor possível. Para o procedimento de saída de serviço da instalação introduziu-se uma válvula de seccionamento (V2) a montante da ramificação.

Neste procedimento, irá existir escoamento do reservatório superior (D) para o reservatório inferior (C), pelo que se introduziu uma válvula de retenção no troço BD (V5), para impedir a reversão do escoamento nessa mesma direção.

3.3 Dimensionamento para regime permanente

Para o pré-dimensionamento da instalação, torna-se necessário escolher o diâmetro da conduta mais adequado, o qual terá como objetivo uma minimização do custo de aquisição e montagem, assim como da perda de carga e consequentemente da energia associada. Como, por um lado, um aumento do diâmetro implicará uma menor perda de carga, mas terá um maior custo, é fundamental definir o diâmetro que proporcionará uma otimização destes dois parâmetros, designado de "diâmetro económico".

Para a definição deste diâmetro, primeiramente, optou-se por impor uma velocidade média. Para a definição da velocidade importa que esta não seja demasiado baixa que promova a formação de depósitos, nem demasiado elevada que aumente a perda de carga, o que depende do tipo de aplicação. Para circuitos de água estas velocidades deverão estar compreendidas normalmente entre 0,9 m/s e 2,4 m/s (*The Engineering ToolBox*, 2003). Dado o problema ser um sistema de adução, foi definida uma velocidade de 1,5 m/s, valor este utilizado como padrão para este tipo de sistemas de forma geral (Trifunovic, 2006). Assim, tem-se um diâmetro dado por:

$$Q = V \times A = V \times \frac{\pi D^2}{4} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \times 51 \times 10^{-3}}{\pi \times 1,5}} = 0,208 \text{ m}$$

Para a obtenção de outra estimativa para o diâmetro económico, recorreu-se à fórmula apresentada em (Lencastre, 1996), obtendo-se:

$$D(m) = 0,95 Q^{0,43} (m^3/s) \quad (3.1)$$

Donde, vem,

$$D = 0,95 \times (51 \times 10^{-3})^{0,43} = 0,264 \text{ m}$$

Dado terem sido obtidos diâmetros distintos utilizando os métodos anteriormente apresentados, utilizou-se o primeiro valor obtido como referência, dado o sistema de adução ser gravítico e a expressão (3.1) ter sido obtida para sistemas com bombagem. De acordo com as secções 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, o primeiro valor de diâmetro obtido permitirá assegurar o caudal necessário, não existindo nenhuma consequência em ter sido utilizado este valor.

Deste modo, optou-se pelo diâmetro normalizado de 8 polegadas para as condutas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (troço AB) e de 6 polegadas para as condutas 7, 8, 9, 10 e 11 (troço BC e troço BD).

Para os diâmetros interiores correspondentes, a velocidade corrigida, para o caudal considerado, será dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Troço AB} \rightarrow 8 \text{ polegadas} \rightarrow V = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 51 \times 10^{-3}}{\pi \times 0,215^2} = 1,4 \text{ m/s} \\ \text{Troço BC} \rightarrow 6 \text{ polegadas} \rightarrow V = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 38 \times 10^{-3}}{\pi \times 0,161^2} = 1,9 \text{ m/s} \end{array} \right.$$

Obtidos os valores de velocidade de 1,4 m/s nas condutas anteriores à ramificação e de 1,9 m/s nas condutas posteriores à ramificação, importa ficar atento no impacto que estes valores poderão ter aquando da ocorrência de transitórios hidráulicos. De referir que, em virtude da imposição de um menor diâmetro nas condutas posteriores à ramificação, ou seja, as condutas associadas aos troços BC e BD, existirá um aumento da velocidade.

Tendo em consideração o tipo de aplicação em estudo, como material das condutas optou-se por ferro fundido classe 51.

As características dos troços AB, BC e CD encontram-se apresentadas nas seguintes tabelas. Os valores dos coeficientes de perdas localizadas (ξ) foram obtidos em (KSB, 2005).

Tabela 3.1 - Características do troço AB

Troço AB	
Diâmetro interno [m]	0,215
Rugosidade [mm]	0,122
Comprimento das Conduitas [m]	
Conduta 1	5
Conduta 2	120
Conduta 3	10
Conduta 4	95
Conduta 5	3
Conduta 6	85
Conduta 7	10
Coeficientes de perdas de carga localizada (ξ)	
Saída do reservatório (A)	0,5
2 Joelhos 60°	1,4
2 Curvas 45°	0,7
Válvula de seccionamento	0,3
Válvula de esfera	0
$\sum \xi$ (AB)	2,9

Tabela 3.2 - Características do troço BC

Troço BC	
Diâmetro interno [m]	0,161
Rugosidade [mm]	0,122
Comprimento das Conduitas [m]	
Conduta 12	115
Conduta 13	5
Coeficientes de perda de carga localizada (ξ)	
Subdivisão "T" (ξ)	1,1
Válvula de retenção	1,6
Válvula de seccionamento	0,3
Entrada do reservatório (C)	1
$\sum \xi$ (BC)	4

Tabela 3.3 - Características do troço BD

Troço BD	
Diâmetro interno [m]	0,161
Rugosidade [mm]	0,122
Comprimento das Conduas [m]	
Conduto 8	0,5
Conduto 9	2,5
Conduto 10	115
Conduto 11	5
Coeficientes de perda de carga localizada (ξ)	
Subdivisão "T" (ξ)	0,21
Joelho 90°	1,15
Válvula de seccionamento	0,3
Entrada do reservatório (D)	1
$\sum \xi$ (BD)	2,66

De referir que para os reservatórios de receção (C) e (D) foram adotadas as características apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características dos reservatórios de receção

Reservatórios de receção	
Cota do reservatório (C) [m]	9
Cota de entrada do reservatório (C) [m]	8
Pressão de superfície	Atmosférica
Coeficiente de perda de entrada do reservatório (ξ)	1
Cota do reservatório (D) [m]	12
Cota de entrada do reservatório (D) [m]	11
Pressão de superfície	Atmosférica
Coeficiente de perda de entrada do reservatório (ξ)	1

Já em relação ao reservatório de alimentação (A) são apresentadas as suas características na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características do reservatório de alimentação

Reservatório de alimentação	
Cota do reservatório (A) [m]	20
Cota de saída do reservatório (A) [m]	19
Pressão de superfície	Atmosférica
Coeficiente de perda de carga à saída da conduta (ξ)	0,5

De referir que os reservatórios considerados neste estudo são considerados de grandes dimensões e a variação do seu nível é negligenciável.

Dado a instalação funcionar para três casos distintos, apresenta-se nas secções 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 os respetivos caudais em regime permanente. Na secção 3.3.1 considera-se o abastecimento dos dois reservatórios em simultâneo e nas secções 3.3.2 e 3.3.3 é considerado o abastecimento de forma exclusiva para cada um dos reservatórios (C) e (D), respetivamente, obtendo-se desta forma os caudais máximos.

3.3.1 Abastecimento simultâneo dos dois reservatórios

Considerando que o abastecimento para ambos os reservatórios é realizado apenas por ação da gravidade, optou-se por utilizar o código numérico em regime permanente para obtenção dos caudais nos reservatórios, sabendo que estes podem ser calculados analiticamente por processo iterativo. Assim, obteve-se os caudais para cada um dos reservatórios (C) e (D):

$$Q_C = 50 \text{ l/s}$$

$$Q_D = 27 \text{ l/s}$$

Através dos valores obtidos para os caudais, é possível verificar que as necessidades diárias de abastecimento (correspondentes a um caudal de 38 l/s para o reservatório (C) e 13 l/s para o reservatório (D)) são asseguradas apenas por meio gravítico, não necessitando de bombagem.

Verificado que as necessidades diárias são satisfeitas para ambos os reservatórios, determina-se nas secções seguintes os valores dos caudais máximos para a situações de abastecimento exclusivo para cada um dos reservatórios.

3.3.2 Abastecimento exclusivo do reservatório (C)

Considerando o abastecimento exclusivo para o reservatório (C) por ação da gravidade, utilizou-se o código numérico para regime permanente, tendo-se obtido um caudal máximo para este mesmo reservatório:

$$Q_{máxC} = 61 \text{ l/s}$$

Conforme mencionado na secção anterior, as necessidades diárias são satisfeitas por meio gravítico. Evidentemente, se pretender transferir para o reservatório (C) apenas o caudal necessário (38 l/s), recorre-se ao fecho parcial da válvula 4 (V4).

3.3.3 Abastecimento exclusivo do reservatório (D)

Considerando o abastecimento exclusivo para o reservatório (D) por ação da gravidade, utilizou-se o código numérico para regime permanente, tendo-se obtido um caudal máximo para este mesmo reservatório:

$$Q_{máxD} = 50 \text{ l/s}$$

Analogamente à secção anterior, as necessidades diárias são satisfeitas por meio gravítico. Evidentemente, se pretender transferir para o reservatório (D) apenas o caudal necessário (13 l/s), recorre-se ao fecho parcial da válvula 3 (V3).

DIMENSIONAMENTO PARA REGIME TRANSITÓRIO

4.1 Considerações iniciais

No presente capítulo apresentam-se as simulações numéricas em regime transitório para a instalação pré-dimensionada na secção anterior em regime permanente.

Na Figura 4.1 representa-se a instalação utilizando a interface gráfica do software utilizado.

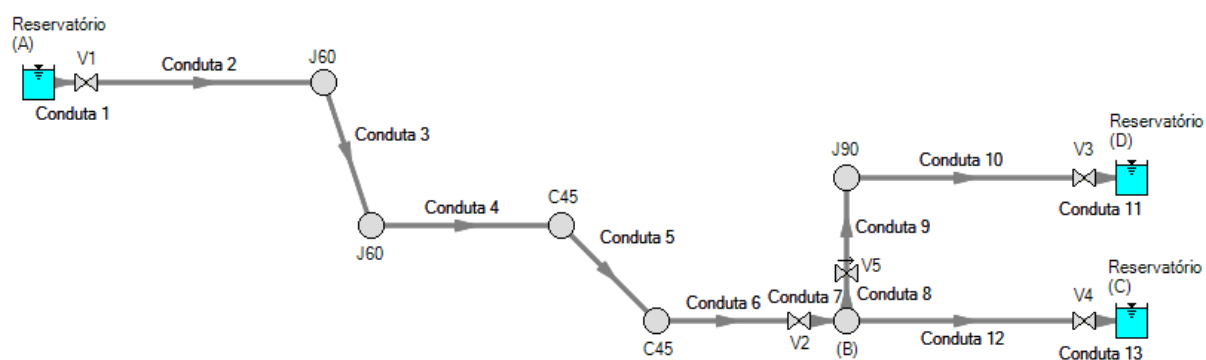


Figura 4.1 - Representação da instalação (Interface gráfica do software)

Seguidamente, analisaram-se os cenários inerentes ao funcionamento da instalação ('Entradas em serviço', 'Saídas de serviço' e 'Fornecimento alternado dos reservatórios'). Estes cenários estão intimamente ligados à operação das válvulas. Os cenários considerados são:

1. 'Entradas em serviço' (ES): Para este caso, as válvulas 1 e 2 encontram-se abertas ao longo de toda a simulação, e as válvulas 3 e 4 encontram-se inicialmente fechadas. São implementadas leis de abertura nas mesmas, de forma a:
 - ES1: Abastecer os dois reservatórios simultaneamente, por meio da abertura das válvulas 3 (V3) e 4 (V4);
 - ES2: Abastecer exclusivamente o reservatório (C), por meio da abertura da válvula 4 (V4);
 - ES3: Abastecer exclusivamente o reservatório (D), por meio da abertura da válvula 3 (V3);

2. 'Saídas de serviço' (SS): Neste caso, estudam-se seis cenários. Dois respeitantes à saída de serviço conjunta dos dois reservatórios, outros dois correspondentes à saída de serviço para condição inicial de abastecimento exclusivo e dois cenários referentes à saída de apenas um dos reservatórios, prosseguindo o fornecimento ao outro reservatório.

A saída de serviço conjunta dos dois reservatórios, realiza-se, num primeiro cenário (SS1) através do fecho simultâneo das válvulas 3 (V3) e 4 (V4). No segundo cenário (SS2), por meio do fecho de uma válvula única a montante da ramificação (V2).

Para os dois cenários referentes ao abastecimento exclusivo, as válvulas 1 e 2 encontram-se abertas ao longo de toda a simulação. Sendo implementadas leis de fecho nas mesmas de forma a:

- SS3: Saída de serviço do reservatório (C), por meio do fecho da válvula 4 (V4);
- SS4: Saída de serviço do reservatório (D), por meio do fecho da válvula 3 (V3);

Já nos dois cenários respeitantes à saída de serviço de apenas um dos reservatórios (continuando o abastecimento do outro), todas as válvulas de seccionamento encontram-se inicialmente abertas. Assim, estes cenários realizam-se:

- SS5: Por meio de fecho da válvula 3 (V3);
 - SS6: Por meio de fecho da válvula 4 (V4).
3. 'Fornecimento alternado dos reservatórios' (FA): Neste caso, estudam-se dois cenários correspondentes à troca do reservatório de recepção:
- FA1: Alteração do fornecimento exclusivo do reservatório (D) para o reservatório (C), por meio de abertura da válvula 4 e fecho da válvula 3;
 - FA2: Alteração do fornecimento exclusivo do reservatório (C) para o reservatório (D), por meio de abertura da válvula 3 e fecho da válvula 4.

4.2 Leis de fecho e de abertura

Para a simulação numérica dos casos apresentados no subcapítulo anterior, foi necessário especificar as leis de fecho e abertura aplicadas na operação das válvulas.

A eficácia do fecho depende da relação entre a perda de carga localizada da válvula de seccionamento e a perda de carga total da instalação. A válvula de seccionamento e a instalação restante podem ser interpretadas como duas perdas de carga em série. Portanto, a operação na válvula só tem influência sob o caudal escoado quando a sua perda de carga tem a mesma ordem de grandeza ou superior que o resto da instalação. Portanto, a lei de fecho da válvula só tem relevância quando os respectivos coeficientes de caudal conduzem a perdas de carga da mesma ordem de grandeza ou superior à restante instalação. Neste trabalho, as leis de fecho foram ajustadas de acordo com o exposto.

Considerou-se que o coeficiente de caudal varia com uma lei logarítmica. Os respectivos coeficientes foram estimados por observação da evolução temporal do caudal obtido por simulação numérica. As leis de fecho eleitas provocavam evoluções suaves no caudal escoado.

Nesta dissertação, definiram-se três leis de fecho, que são utilizadas em função do coeficiente de perda de carga dos troços da instalação. Nas Figuras 4.2 e 4.3 apresentam-se as leis de fecho 1 e 2, com um tempo de operação de 12 segundos e 16 segundos, respectivamente. Na Tabela 4.1 apresentam-se os tempos de fecho útil, tempos de operação e expressões matemáticas para os fechos 1 e 2.

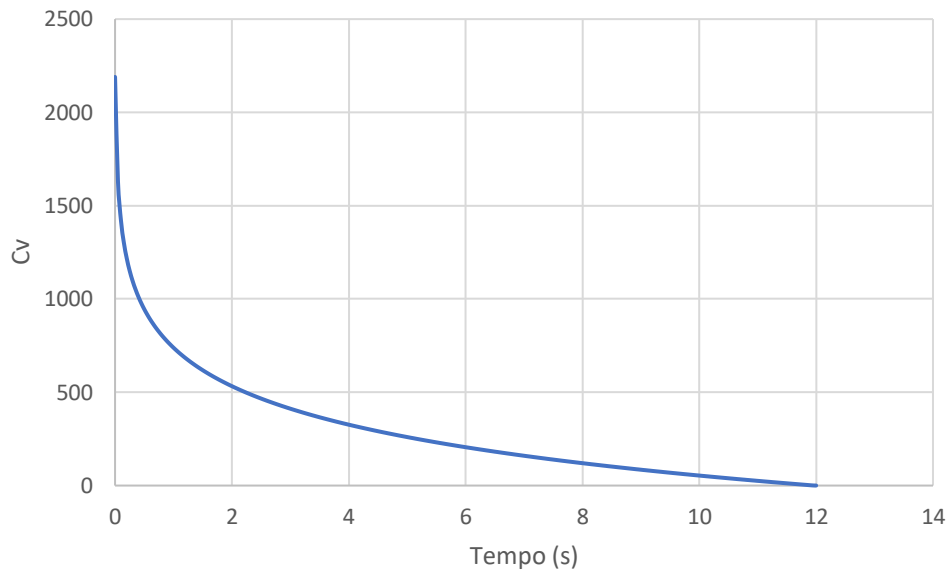


Figura 4.2 - Lei de fecho 1

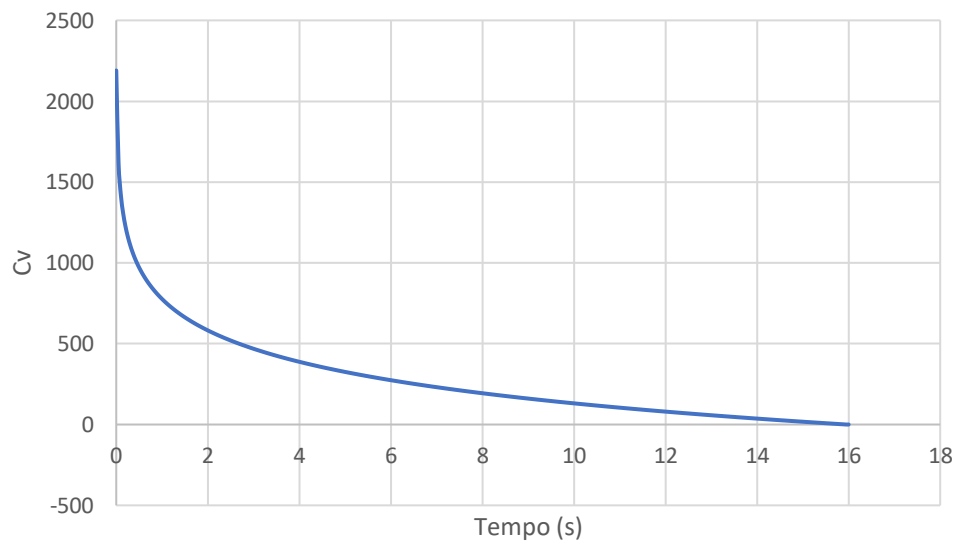


Figura 4.3 - Lei de fecho 2

Tabela 4.1 - Características das leis de fecho 1 e 2

	Tempo de fecho útil	Tempo de operação	Equação matemática
Lei de fecho 1	8 segundos	12 segundos	$C_v = -297,7 \ln(t) + 739$ (4.1)
Lei de fecho 2	12 segundos	16 segundos	$C_v = -280,4 \ln(t) + 776,6$ (4.2)

Para ilustrar que a eficácia do fecho não ocorre durante toda a operação, representa-se na Figura 4.4 a evolução do caudal para a situação de saída de serviço e abastecimento exclusivo do reservatório (C), por meio do fecho da válvula 3 (V3), utilizando a lei de fecho 1. A observação conjunta das Figuras 4.2 e 4.4 permite identificar que o tempo útil de fecho é de aproximadamente 8 segundos. Assim, aos quatro segundos iniciais do fecho 1, a operação na válvula provoca uma redução de apenas 5 % de caudal.

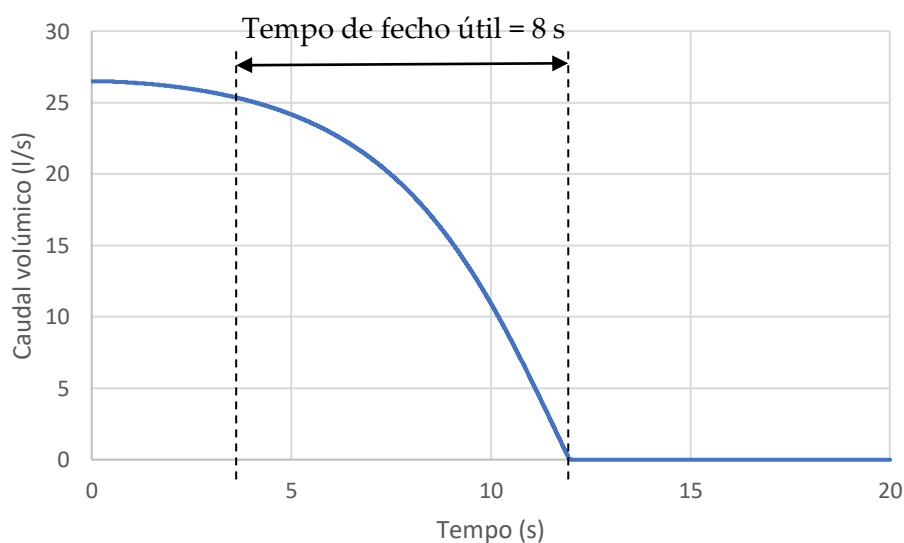


Figura 4.4 - Caudal na válvula 3 (Saída de serviço para abastecimento exclusivo do reservatório (C))

A utilização da lei de fecho 2 permite alargar para 12 segundos o tempo eficaz de fecho, sendo utilizada quando se pretende reduzir os efeitos do transitório. Como a ordem de grandeza das perdas de carga totais dos vários troços é semelhante, recorreu-se apenas a estas duas leis de fecho para todas as situações de saída de serviço.

Assim, a escolha entre as duas leis de fecho foi feita por observação dos resultados das simulações numéricas, optando pela lei de fecho que induzia um transitório de menor intensidade.

Foi ainda utilizada outra lei de fecho para o caso de fornecimento alternado dos reservatórios. A lei de fecho 3 representada na Figura 4.5 é linear nos dez segundos iniciais, na restante operação de fecho obedece a uma função logarítmica, de forma a que o fecho seja eficaz a partir do instante $t = 22$ s.

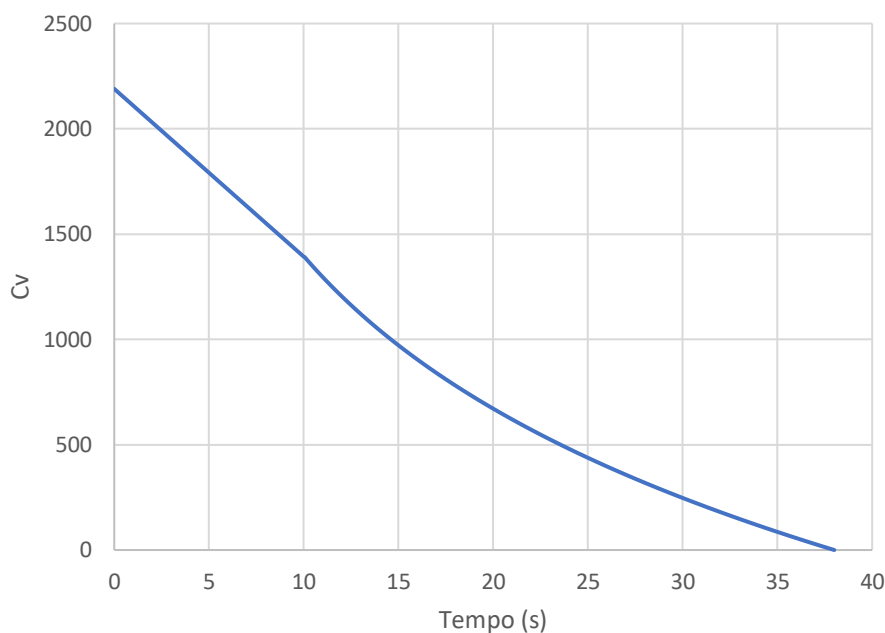


Figura 4.5 - Lei de fecho 3 (Fornecimento alternado dos reservatórios)

Na Tabela 4.2 apresenta-se os tempos de fecho útil, tempos de operação e expressões matemáticas para o fecho 3.

Tabela 4.2 - Características da lei de fecho 3

	Tempo de fecho útil	Tempo de operação	Equação matemática
Lei linear (0-10 s)	16 segundos	38 segundos	$C_v = -79,7t + 2190$ (4.3)
Lei logarítmica (10-38 s)			$C_v = 3803,8 - 1045,7 \ln(t)$ (4.4)

Na secção 4.5 é possível verificar a eficácia desta lei de fecho numa situação de fornecimento alternado combinada com uma lei de abertura.

Para as 'Entradas em serviço' utilizou-se uma única lei de abertura, representada na Figura 4.6. Para maior generalidade e permitir a operação simultânea de várias válvulas, optou-se por introduzir um período neutro (de 2 segundos) antes do início da manobra.

Durante a operação da válvula o seu coeficiente de caudal é dado pela expressão (4.5).

$$C_v = 0,0005 e^{3,6414t} \quad (4.5)$$

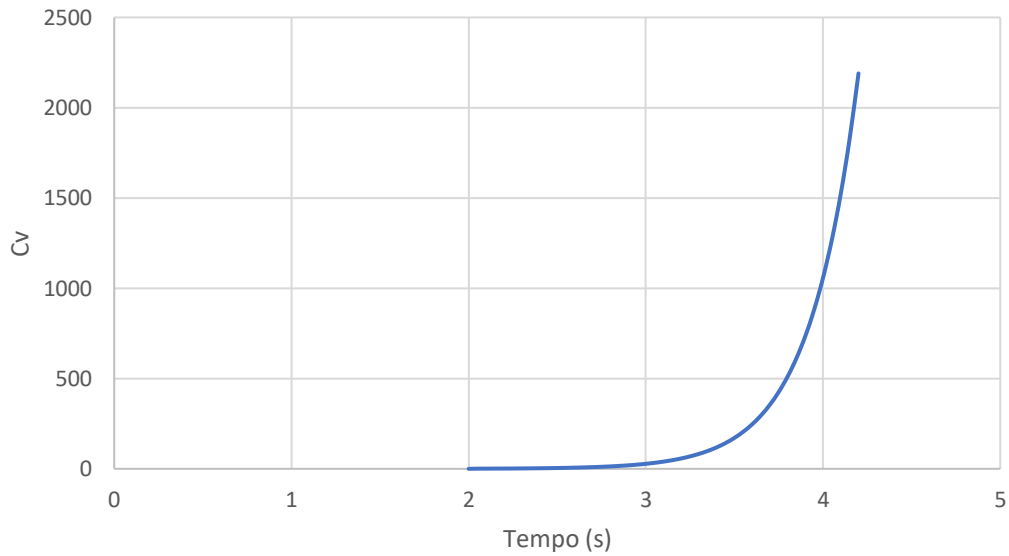


Figura 4.6 - Lei de abertura 1

Na Tabela 4.3 apresenta-se o tempo de espera, o tempo de operação e o tempo de fecho útil para a lei de abertura 1.

Tabela 4.3 - Características da lei de abertura 1

	Tempo de espera	Tempo de operação	C_v final
Lei de abertura 1	2 segundos	2,2 segundos	2190

Nas secções referentes às 'Entradas em serviço', é possível verificar a eficiência desta lei de abertura.

4.3 Entradas em serviço

Os cenários correspondentes às 'Entradas em serviço' representam as situações de arranque da instalação, estas ocorrem frequentemente.

De referir que para os cenários de entrada de serviço definidos na secção 4.1, as válvulas 1 e 2 encontram-se abertas em todas as simulações, enquanto que as válvulas 3 e 4 se encontram inicialmente fechadas.

4.3.1 Abastecimento simultâneo dos dois reservatórios

Nesta secção efetua-se a simulação numérica de uma entrada em serviço dos dois reservatórios simultaneamente (cenário ES1). Neste cenário, aplica-se a lei de abertura 1 (equação (4.5)) às válvulas 3 e 4 (V3 e V4).

Nas Figuras 4.7 e 4.8 representa-se a evolução temporal do caudal volúmico para os reservatórios (C) e (D), respetivamente.

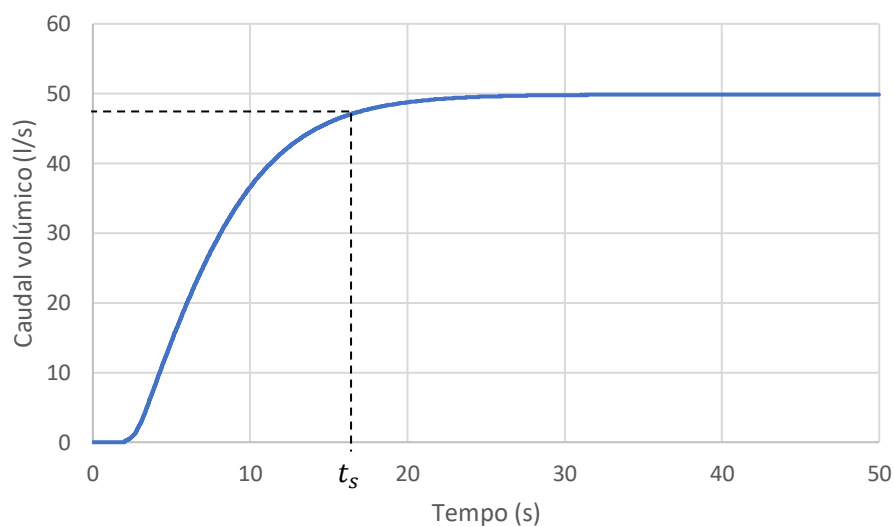


Figura 4.7 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário ES1)

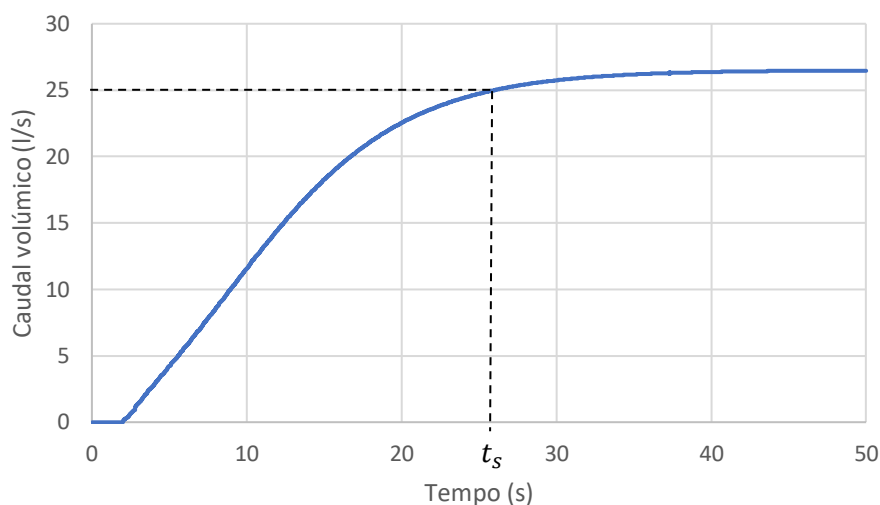


Figura 4.8 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário ES1)

Como se pode visualizar pelas figuras acima, só existe variação de caudal a partir do instante $t = 2$ s, correspondente ao tempo de espera da lei de abertura 1 descrita na secção 4.2.

Na Figura 4.7 pode verificar-se que ao fim de 17 segundos o caudal atinge cerca de 95 % do valor para regime permanente (tempo de estabilização t_s de 17 segundos). Desta mesma figura obtém-se o caudal de 50 l/s como valor limite. Evidentemente, foi este o caudal obtido para regime permanente na secção 3.3.1.

Na Figura 4.8 o caudal atinge 95 % do valor para regime permanente para um tempo de estabilização t_s de aproximadamente 26 segundos. Neste caso, o caudal atinge um valor máximo de 27 l/s, conforme obtido na secção 3.3.1.

Uma vez que o tempo de abertura (2,2 segundos) é bastante menor que o tempo de estabilização para ambos os reservatórios, pode-se concluir que a inércia da instalação tem maior influência sobre o escoamento do que a lei de abertura da válvula.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 representam-se as envolventes da cota piezométrica e a elevação da conduta para os troços AC e AD.

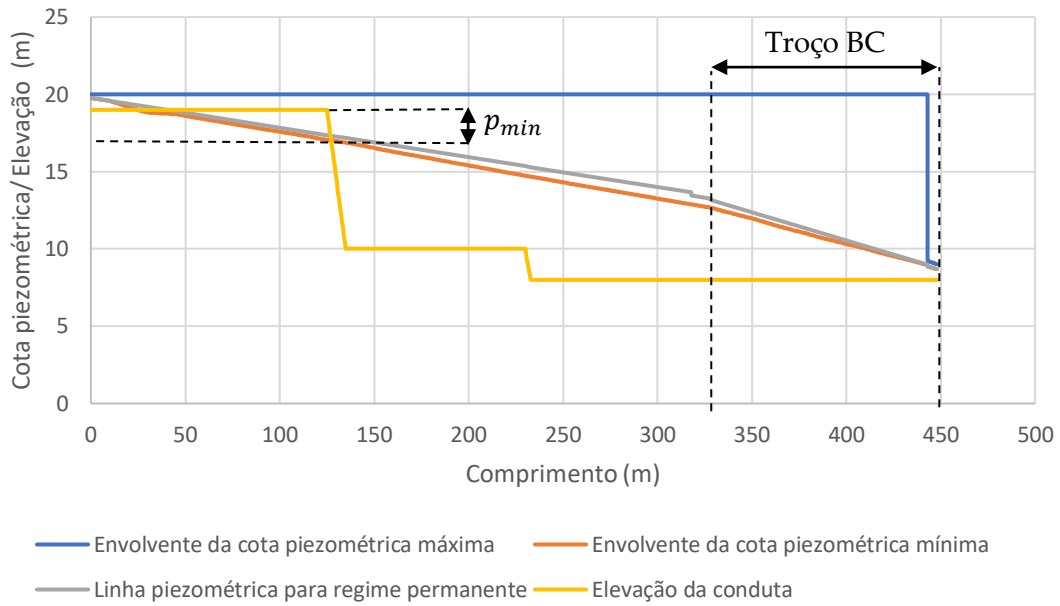


Figura 4.9 - Envolvertes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário ES1)

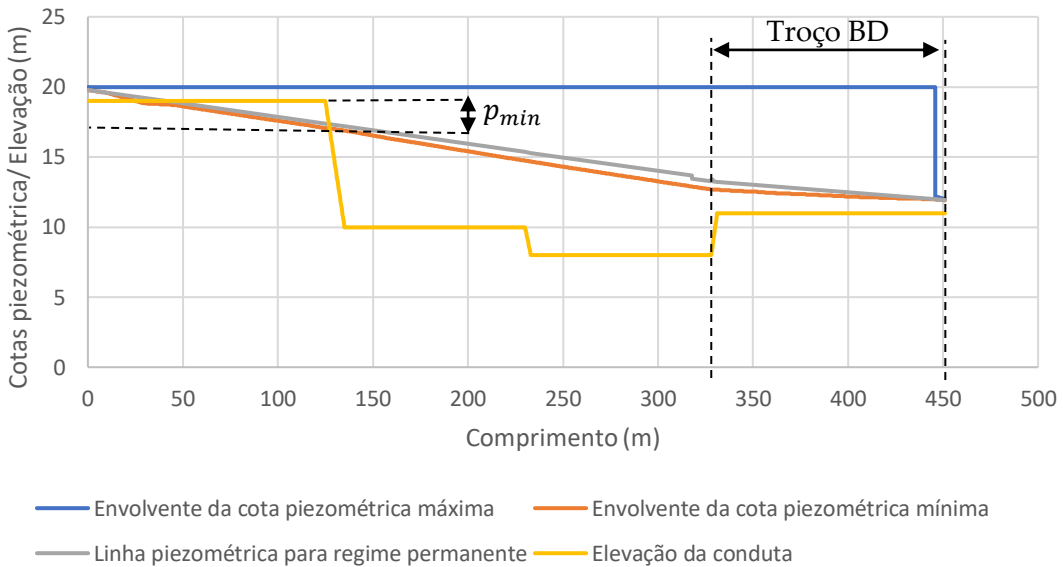


Figura 4.10 - Envolvertes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário ES1)

As Figuras 4.9 e 4.10 apenas após a secção B são diferentes (secção correspondente ao comprimento de 328 m nas Figuras), o troço AB é comum aos dois circuitos.

Os valores obtidos para a envolvente de cota piezométrica máxima são coerentes, pois correspondem ao sistema estático inicial. Desta forma, a montante da válvula de secionamento a cota piezométrica tem um valor constante e igual à cota do reservatório de ali-

mentação. Já a jusante da mesma válvula o valor da cota piezométrica coincide com o valor dos reservatórios de recepção.

No que diz respeito às envolventes de cota piezométrica mínimas, estas permitem identificar os troços da conduta que em algum instante ficam em depressão. Estas zonas da conduta correspondem aquelas em que a curva da envolvente de cota piezométrica mínima se situa abaixo da curva de elevação da conduta (a diferença entre as duas curvas corresponde ao valor da depressão), nas Figuras 4.9 e 4.10 o valor máximo está indicado para pressão mínima p_{min} . No entanto, para melhor deteção da ocorrência do fenómeno de cavitação representam-se nas Figuras 4.11 e 4.12 a envolvente da pressão absoluta mínima ao longo da instalação para os troços AC e AD.

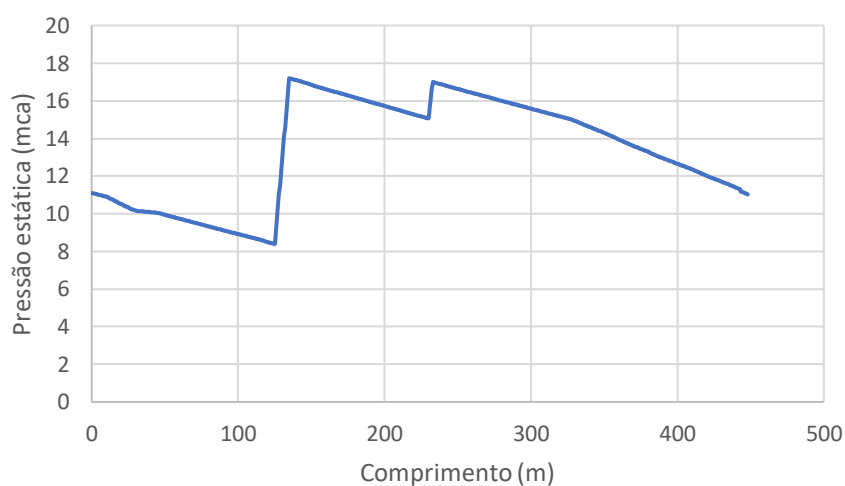


Figura 4.11 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário ES1)

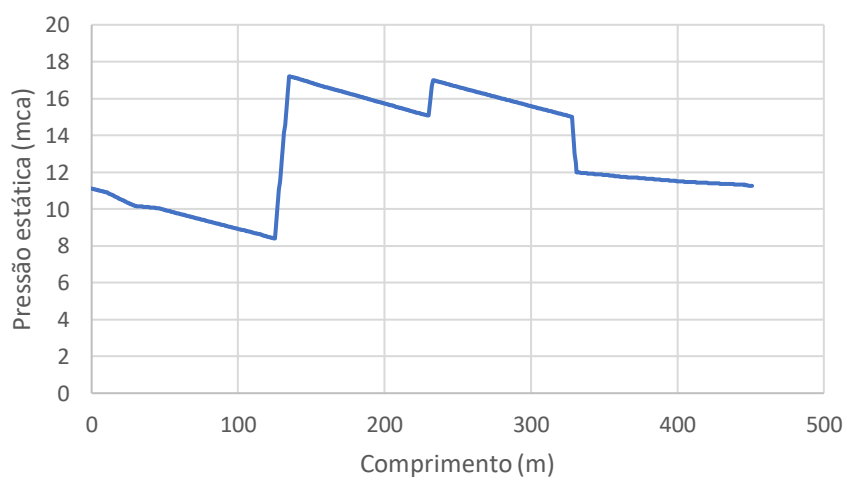


Figura 4.12 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário ES1)

Em consonância com os resultados das envolventes da cota piezométrica, a evolução da pressão absoluta mínima permite confirmar os troços da conduta que ficam, em algum momento, em depressão. Assim sendo, pode registar-se o menor valor de pressão absoluta mínima de 8,4 metros na secção final da conduta 2 (correspondente a um comprimento de 125 metros).

A cavitação ocorre quando a pressão absoluta for inferior à tensão de vaporização do líquido à temperatura do escoamento. Como o valor mínimo de pressão absoluta obtido é sempre superior ao valor da tensão de vaporização do líquido ao longo de toda a instalação, conclui-se que não ocorre cavitação.

Fica assim demonstrado para o cenário ES1 que o dimensionamento efetuado é adequado.

4.3.2 Abastecimento exclusivo do reservatório (C)

Na presente secção efetua-se a simulação numérica de uma entrada em serviço exclusiva do reservatório (C) (cenário ES2). Neste cenário, aplica-se a lei de abertura 1 (equação (4.5)) à válvula 4 (V4).

Na Figura 4.13 representa-se a evolução temporal do caudal volúmico no reservatório (C).

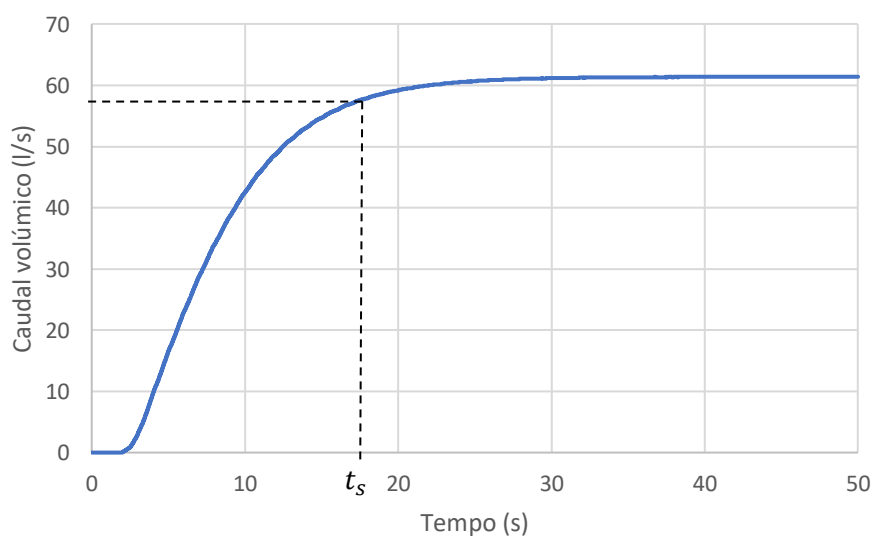


Figura 4.13 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário ES2)

Na Figura 4.13 pode verificar-se através da linha representada que o caudal atinge 95 % do valor para regime permanente para um tempo de estabilização t_s de 18 segundos. Da mesma figura, obtém-se ainda um valor limite de caudal de 61 l/s. Este caudal é, evidentemente, igual ao obtido para regime permanente na secção 3.3.2.

À semelhança do cenário ES1, o tempo de abertura (2,2 segundos) é bastante inferior ao tempo de estabilização para o reservatório (C) (18 segundos). Assim sendo, pode-se concluir que a inércia da instalação tem maior influência sobre o escoamento do que a lei de abertura da válvula.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 representam-se as envolventes da cota piezométrica para os troços AC e AD da instalação, respetivamente.

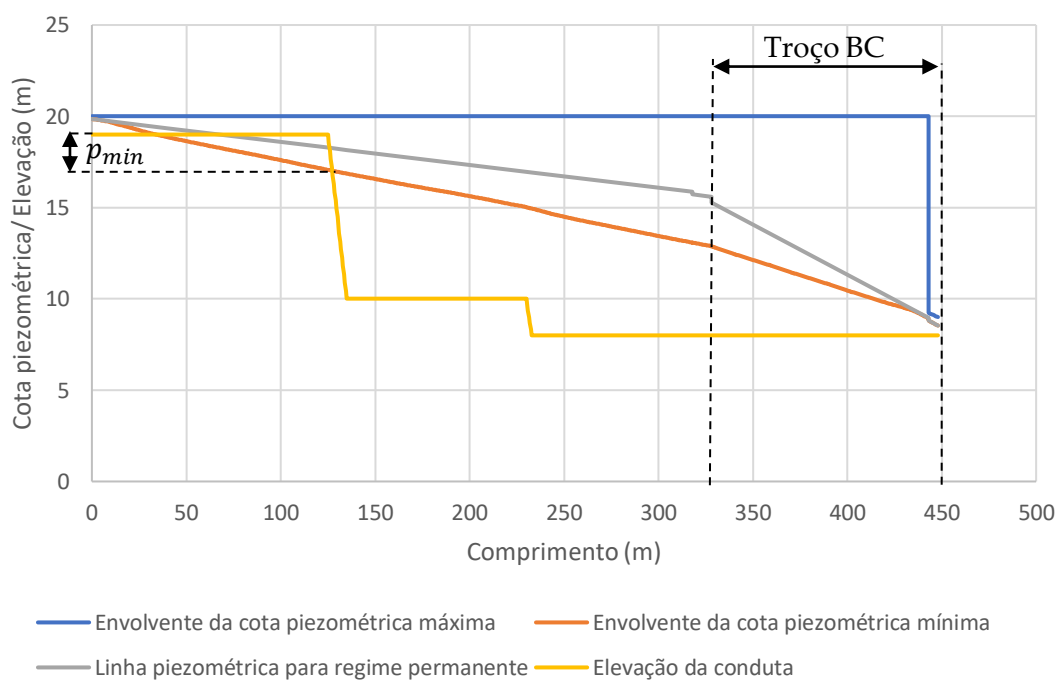


Figura 4.14 - Envoltentes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário ES2)

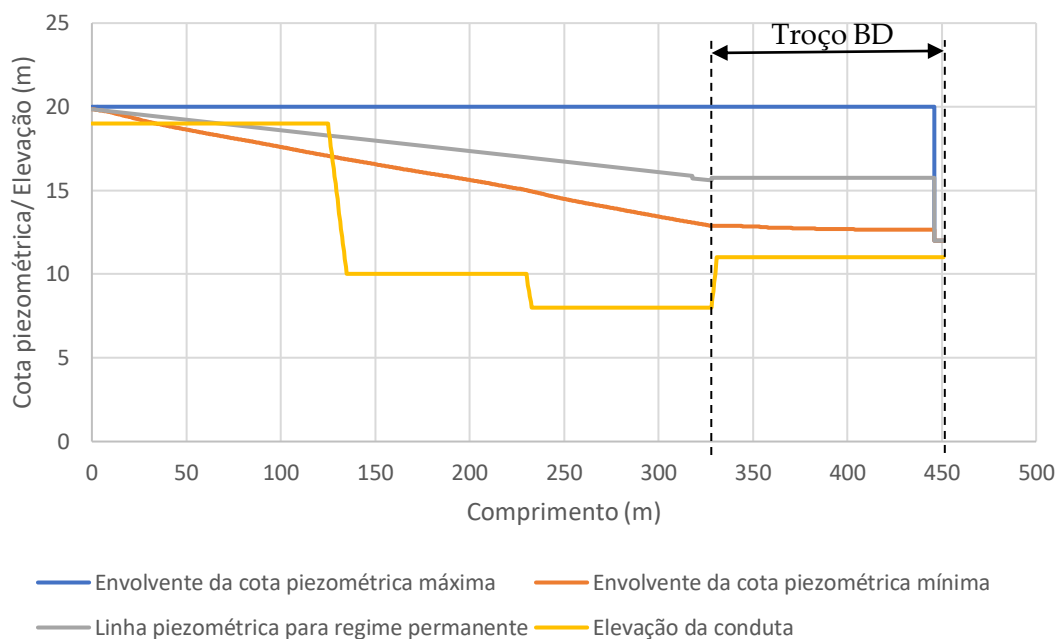


Figura 4.15 - Envoltentes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário ES2)

À semelhança do cenário ES1, os resultados obtidos para a envoltura da cota piezométrica máxima estão de acordo com o esperado, por corresponderem ao sistema estático inicial.

Relativamente às envolturas da cota piezométrica mínimas, pode identificar-se os troços da conduta que em algum instante ficam em depressão. Nas Figuras 4.14 e 4.15 representa-se o valor da depressão máxima obtida no final da conduta 2 (de aproximadamente 2 metros).

Para melhor visualização dos valores de depressão a que as condutas podem ser sujeitas representam-se nas Figuras 4.16 e 4.17 os valores das envolturas da pressão absoluta mínima nos troços AC e AD, respetivamente.

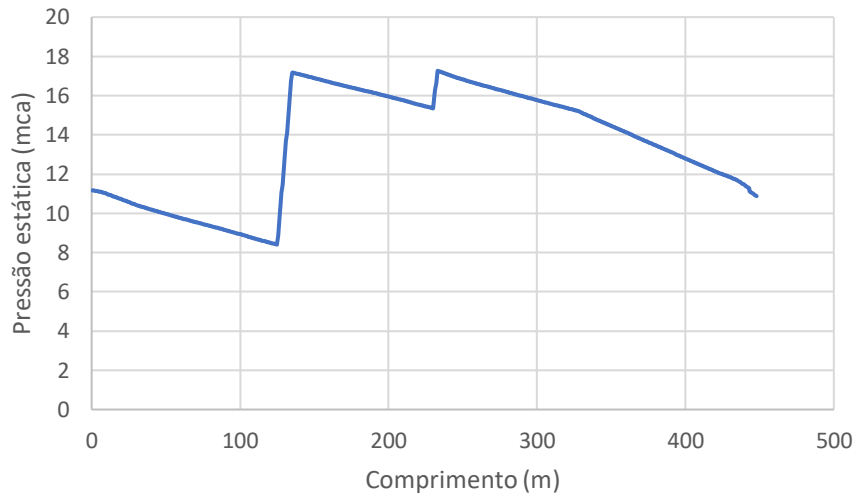


Figura 4.16 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante trecho AC (cenário ES2)

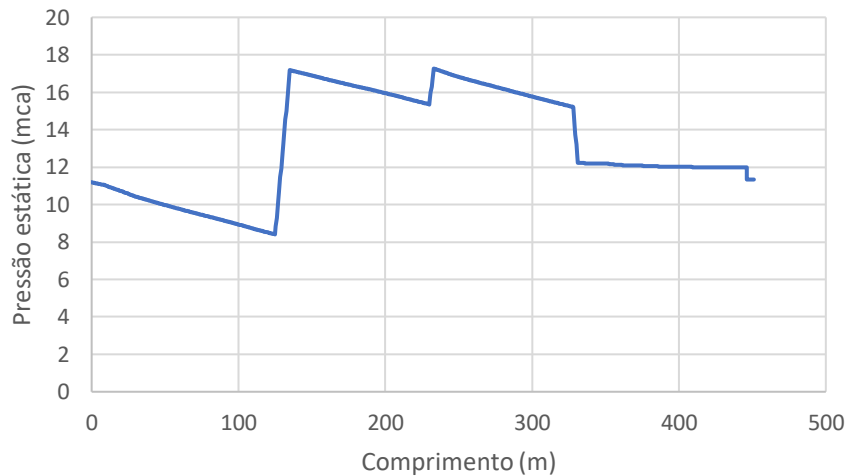


Figura 4.17 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante trecho AD (cenário ES2)

Através das Figuras 4.16 e 4.17 pode aferir-se que a envolvente da pressão absoluta mínima atinge o seu menor valor no final da conduta 2. Este valor é de 8,4 metros na secção relativa a um comprimento de 125 metros. Conforme anteriormente obtido, os resultados das envolventes da cota piezométrica estão de acordo com os valores mínimos das envolventes de pressão absoluta.

Assim, pode concluir-se que não ocorre cavitação, por o valor mínimo da envolvente da pressão absoluta ser sempre superior ao valor da tensão de vaporização do líquido.

Fica assim demonstrado para o cenário ES2 que o dimensionamento efetuado é adequado.

4.3.3 Abastecimento exclusivo do reservatório (D)

A presente simulação numérica diz respeito à entrada de serviço do reservatório (D) (cenário ES3). Neste cenário, aplicou-se a mesma lei de abertura 1 (equação (4.5)), à válvula 3.

Na Figura 4.18 representa-se a evolução temporal do caudal no reservatório (D).

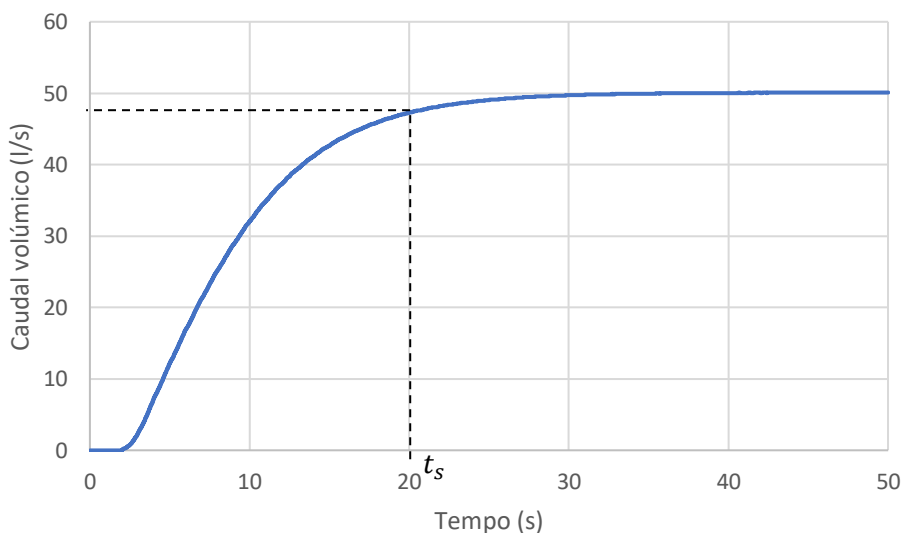


Figura 4.18 - Caudal volumétrico, reservatório (D) (cenário ES3)

Da Figura 4.18 obtém-se um caudal de 95 % do valor para regime permanente para um tempo de estabilização t_s de 20 segundos. No reservatório (D) o caudal atinge um valor máximo de 50 l/s. Este valor é, evidentemente, igual ao obtido para regime permanente na secção 3.3.3.

À semelhança dos cenários ES1 e ES2, o tempo de abertura (2,2 segundos) é bastante inferior ao tempo de estabilização para o reservatório (D) (20 segundos). Deste modo, pode-se concluir que a inércia da instalação tem maior influência sobre o escoamento do que a lei de abertura da válvula.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 representam-se as envolventes da cota piezométrica para os troços AC e AD.

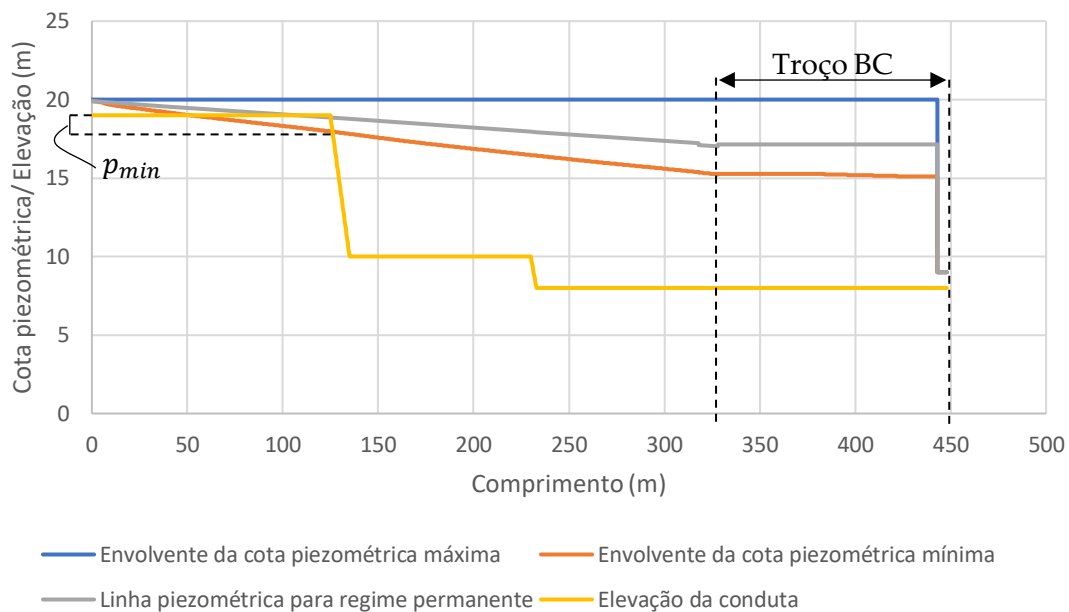


Figura 4.19 - Envoltentes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário ES3)

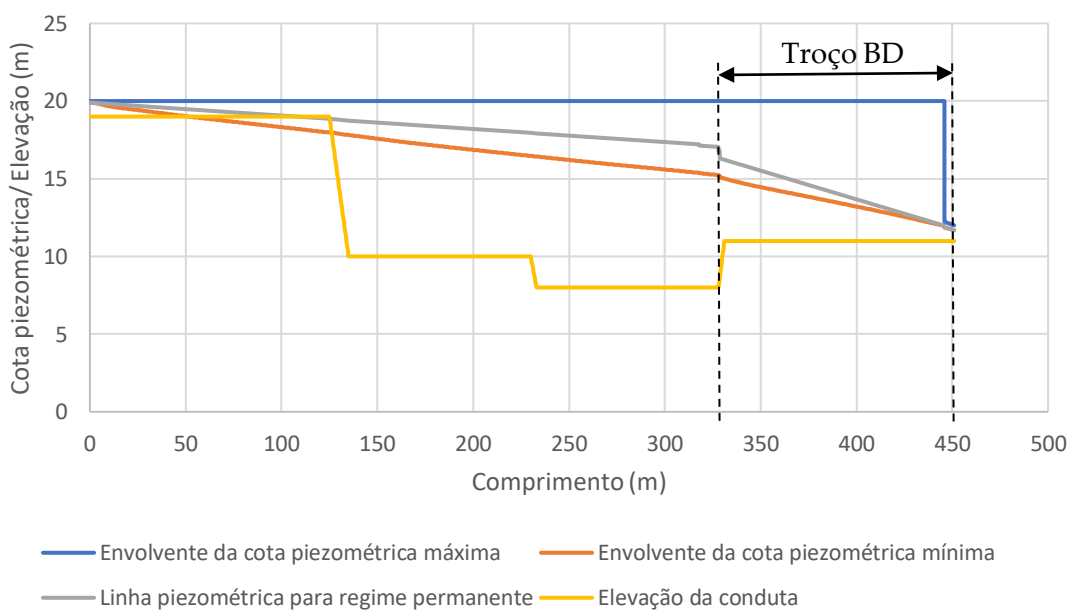


Figura 4.20 - Envoltentes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário ES3)

Através das Figuras 4.19 e 4.20, pode observar-se uma evolução coerente dos resultados das envoltentes da cota piezométrica máxima, por corresponderem ao sistema estático inicial.

Em relação às envoltentes da cota piezométrica mínimas, obtém-se um valor máximo de depressão no final da conduta 2 de aproximadamente 0,5 metros.

Nas Figuras 4.23 e 4.24 representam-se a evolução das envolventes de pressão absoluta mínima para os troços AC e AD, respetivamente.

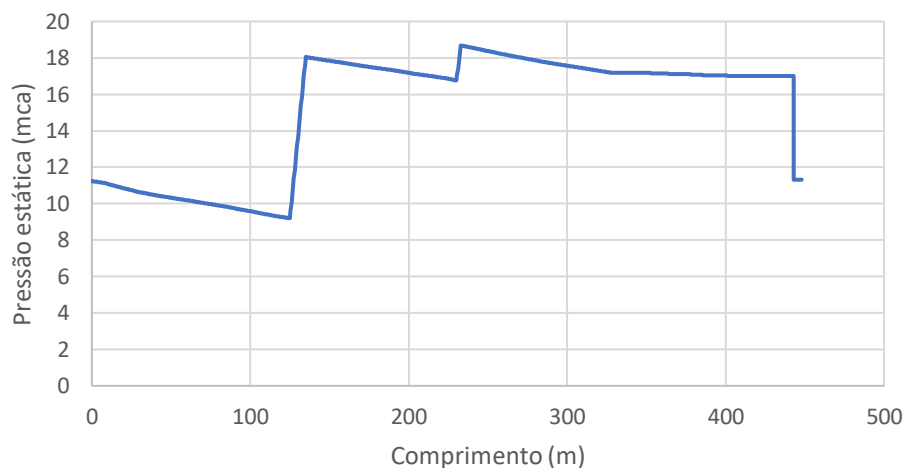


Figura 4.21 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário ES3)

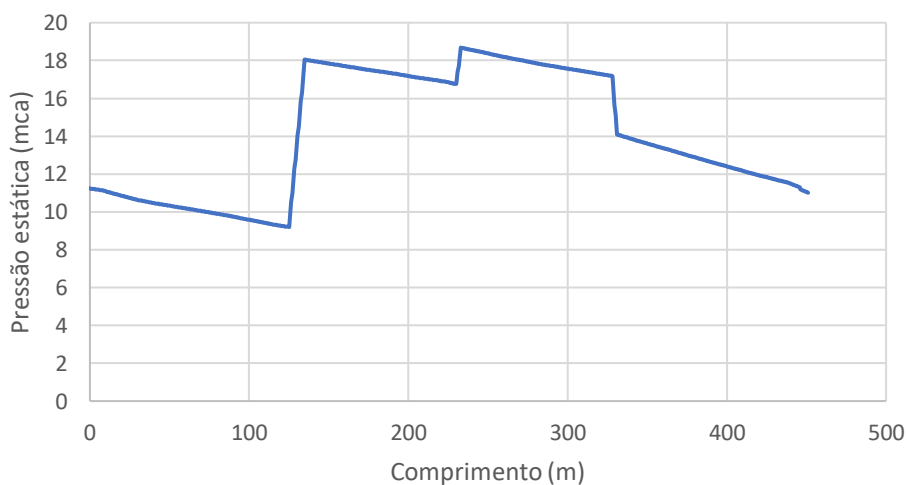


Figura 4.22 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário ES3)

Nas Figuras 4.21 e 4.22 pode verificar-se que a envolvente de pressão absoluta mínima atinge o seu menor valor no final da conduta 2. Este valor é de 9,2 metros na secção relativa a um comprimento de 125 metros. Evidentemente, este valor está de acordo com o valor de depressão obtido anteriormente.

Por o valor mínimo da envolvente da pressão absoluta ser sempre superior ao valor da tensão de vaporização do líquido, pode concluir-se que não ocorre cavitação.

Fica assim demonstrado para o cenário ES3 que o dimensionamento efetuado é adequado.

No que diz respeito às 'Entradas em serviço', conclui-se que não existem problemas de cavitação.

4.4 Saídas de serviço

As 'Saídas de serviço' analogamente às 'Entradas em serviço' são operações que ocorrem recorrentemente durante a vida de uma instalação.

Foram assim realizados dois cenários respeitantes à saída de serviço conjunta dos dois reservatórios e os outros dois referentes ao abastecimento exclusivo de cada um dos reservatórios.

4.4.1 Saída de serviço conjunta dos dois reservatórios

Para o procedimento de saída de serviço conjunta da instalação foram realizados dois cenários. O primeiro correspondente ao fecho simultâneo das duas válvulas 3 e 4 (V3 e V4) (cenário SS1). O segundo correspondente ao fecho da válvula 2 (V2) (cenário SS2).

Para o primeiro cenário, utilizou-se a lei de fecho 1 (equação (4.1)) para a válvula 3 (V3) e a lei de fecho 2 (equação (4.2)) para a válvula 4 (V4).

Nas Figuras 4.23 e 4.24 representa-se a evolução temporal do caudal nos reservatórios (C) e (D), respetivamente.

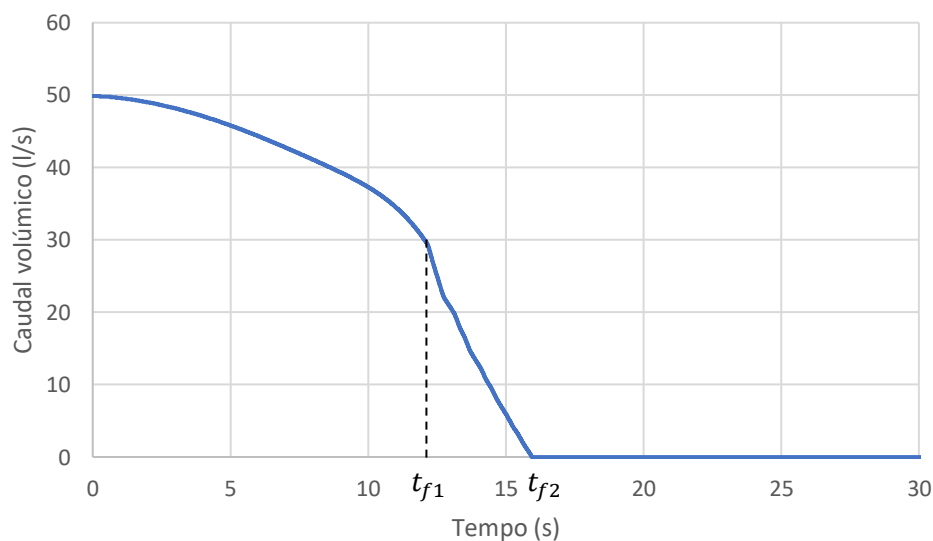


Figura 4.23 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário SS1)

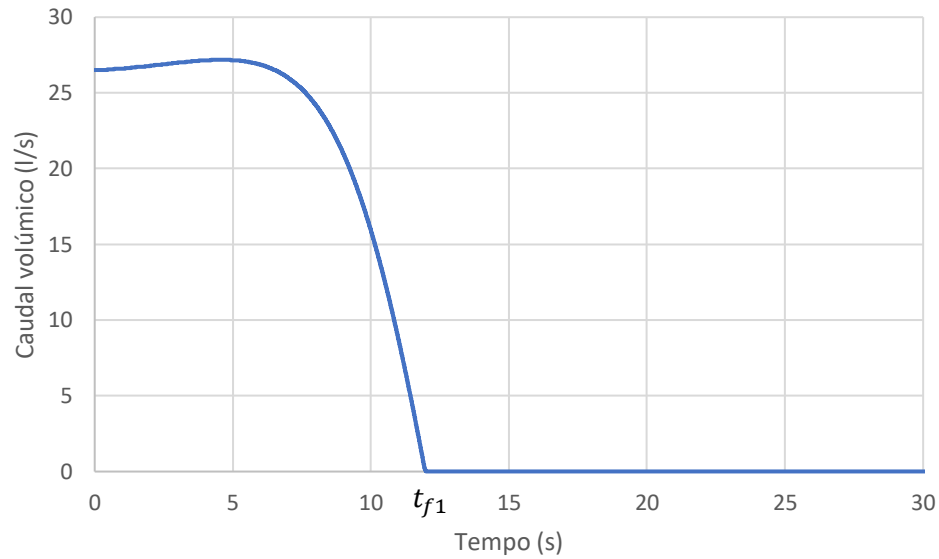


Figura 4.24 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário SS1)

Na Figura 4.23 pode verificar-se que o caudal apresenta duas evoluções distintas antes e após o instante $t_{f1} = 12 \text{ s}$, que corresponde ao tempo de operação da válvula 3 indicado na figura por t_{f1} . O tempo t_{f1} associa-se à lei de fecho 1. Na primeira fase, a evolução do caudal no reservatório (C) é influenciada pelo fecho da válvula 3 e da válvula 4. Na segunda fase, a evolução do caudal é, evidentemente, mais acentuada, consequência apenas do final do fecho da válvula 4. O tempo de operação da válvula 4 identifica-se na figura por t_{f2} . O tempo t_{f2} associa-se à lei de fecho 2.

Na Figura 4.24 constata-se inicialmente um pequeno aumento de caudal no reservatório (D), seguido da sua expectável diminuição até ao tempo final de fecho da válvula 3. Este aumento inicial de caudal representa a interação entre os dois reservatórios, consequência do fecho da válvula 4 e da inércia do fluido em movimento.

Nas Figuras 4.25 e 4.26 representam-se as envolventes da cota piezométrica para os troços AC e AD, respetivamente.

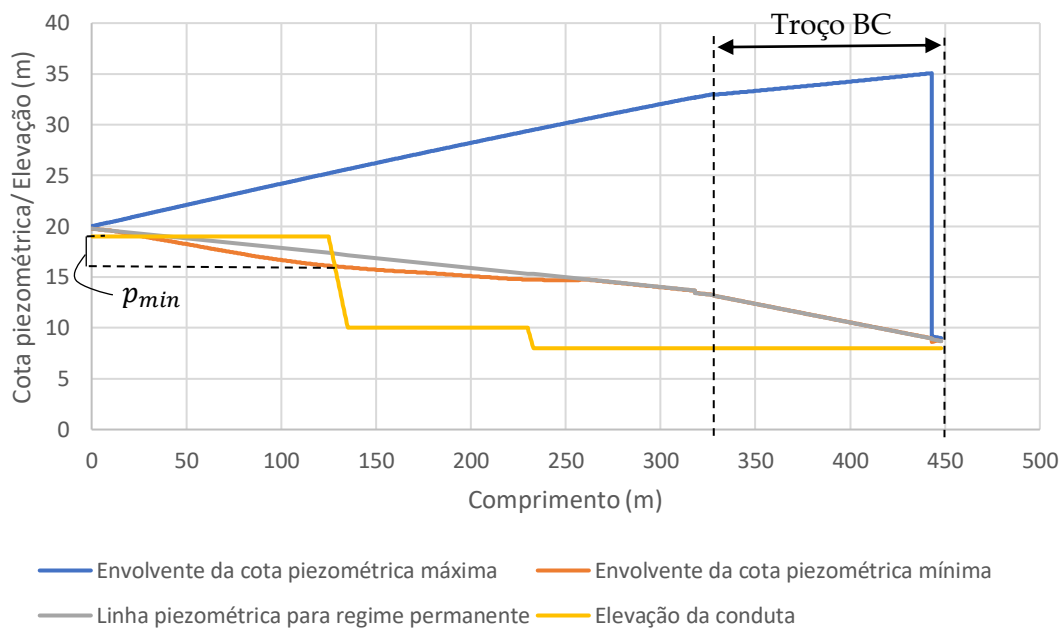


Figura 4.25 - Envoltentes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS1)

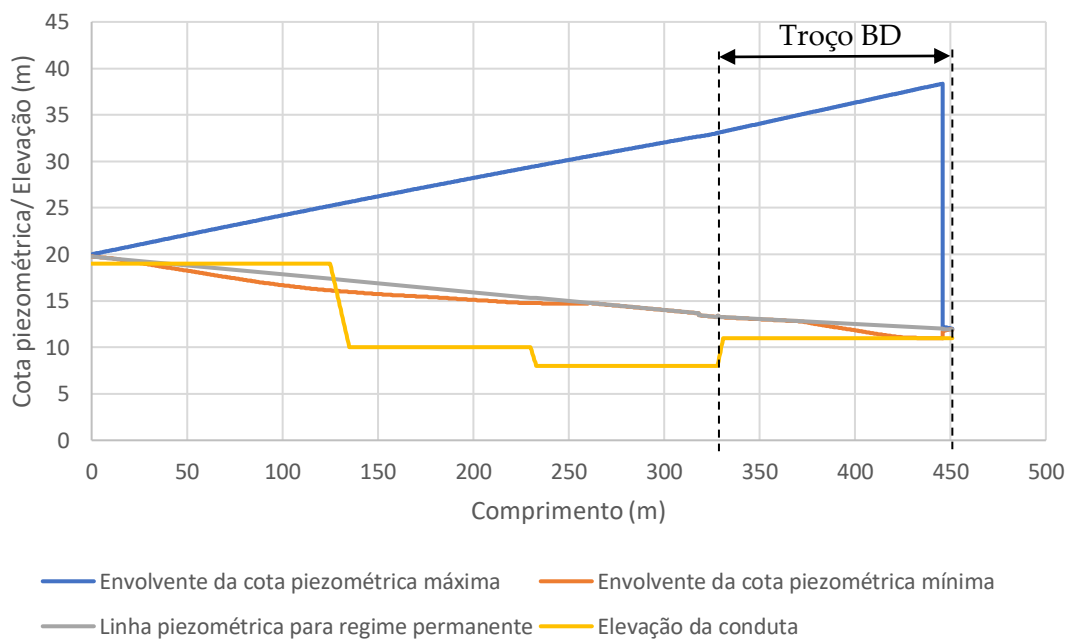


Figura 4.26 - Envoltentes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS1)

Por observação das figuras, conclui-se que a integridade estrutural da instalação não é posta em causa. A envolvente da cota piezométrica máxima coincide com os valores da pressão quando não existe escoamento (situação estática), isto para as secções relativas aos reservatórios de alimentação e receção. Pode notar-se que esta envolvente evolui de forma crescente desde o reservatório de alimentação, até atingir o seu valor máximo nas secções

imediatamente a montante das válvulas. Este valor não levanta, no entanto, preocupação aparente quanto à integridade estrutural da instalação.

Para a envolvente da cota piezométrica mínima, pode verificar-se que a instalação experimenta depressões ao longo da conduta 2, atingindo o seu valor máximo no final desta conduta. Ainda assim, não existe tendência à ocorrência de cavitação, dado o valor máximo de depressão ser de aproximadamente 3 metros.

Para melhor visualização de ocorrência do fenómeno de cavitação representam-se, nas Figuras 4.27 e 4.28, a evolução das envolventes de pressão absoluta mínima para os troços AC e AD, respetivamente.

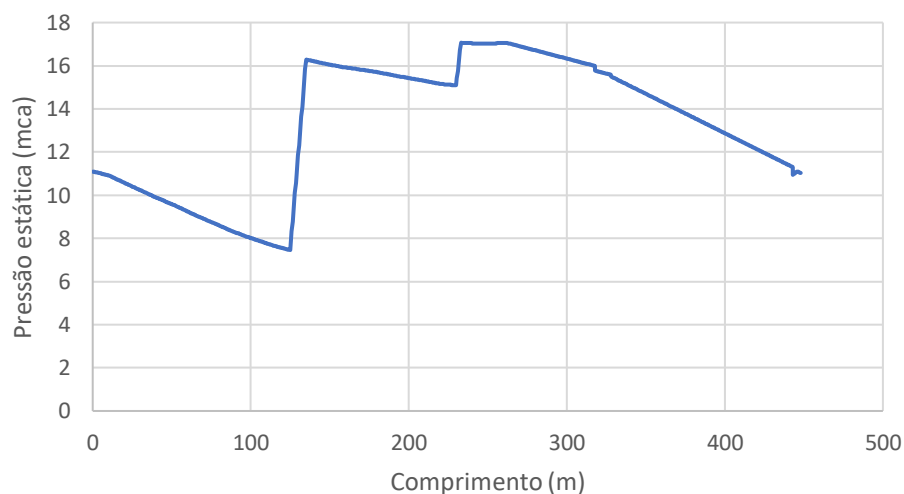


Figura 4.27 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS1)

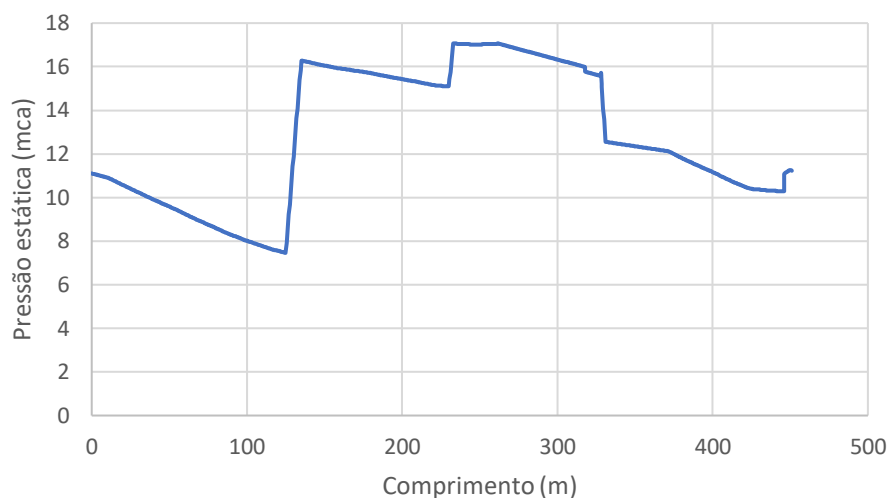


Figura 4.28 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante trecho AD (cenário SS1)

Por análise das figuras, pode confirmar-se que o valor mínimo da envolvente de pressão absoluta é sempre superior ao valor da tensão de vaporização do líquido, pelo que não se verifica a ocorrência de cavitação.

Neste cenário, regista-se um valor limite de pressão absoluta mínima de 7,4 metros.

Fica assim demonstrado para o cenário SS1 que o dimensionamento efetuado é adequado.

O cenário SS2 consiste no fecho da válvula 2 situada antes da ramificação. Para este cenário aplicou-se a lei de fecho 2 (equação (4.2)) à válvula 2 (V2). Aquando da realização deste fecho, o fluido que se encontra no reservatório (D) irá escoar na direção do reservatório (C), sendo necessária a atuação da válvula de retenção (V5) de forma a impedir a reversão do escoamento no sentido do reservatório (C). Para a entrada de dados da válvula de retenção, selecionou-se a 'Velocidade para a válvula fechar' e 'Variação de altura para a válvula reabrir' como definida pelo utilizador. Assim sendo, depois de realizadas algumas simulações numéricas, definiu-se uma velocidade de 0,1 m/s no sentido do escoamento e uma variação de altura de 15 metros.

De forma a analisar o comportamento da válvula de retenção, representa-se na Figura 4.29, a evolução temporal do caudal a jusante da mesma.

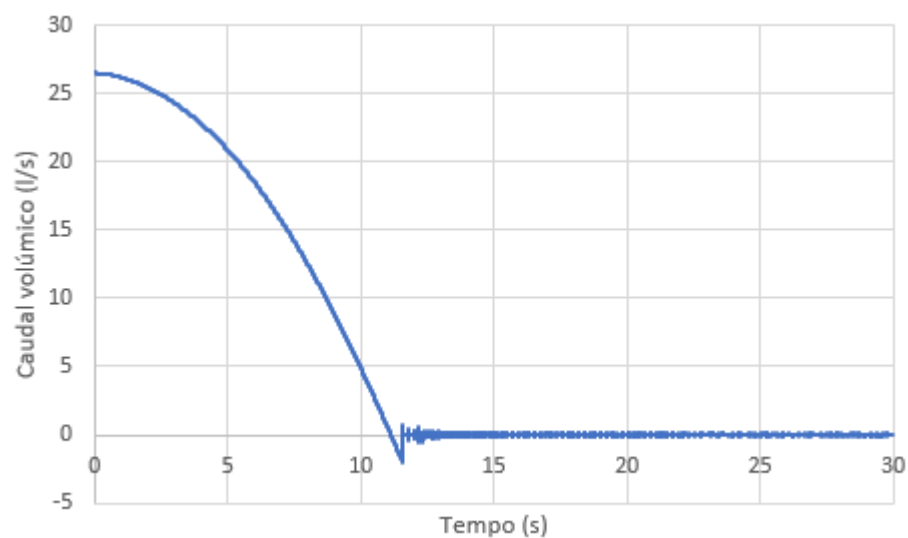


Figura 4.29 - Caudal volúmico a jusante da válvula de retenção (cenário SS2)

Na Figura 4.29 observa-se que a evolução do caudal está de acordo com o esperado. Pode verificar-se que a válvula fecha para a velocidade definida, seguido de variações de caudal pouco significativas.

Na Figura 4.30 representa-se a evolução temporal do caudal a jusante da válvula 2 (V2).

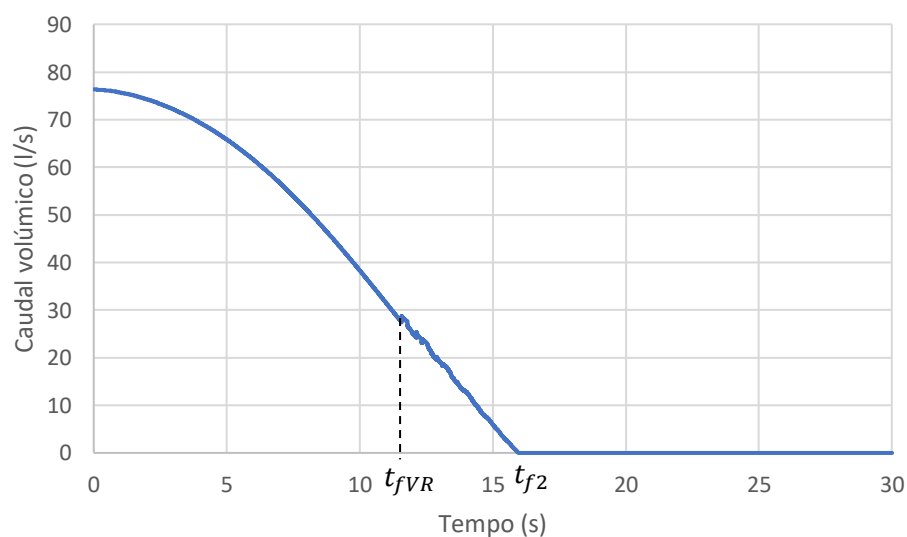


Figura 4.30 - Caudal volúmico a jusante da válvula 2 (cenário SS2)

Na Figura 4.30 verifica-se que o fecho introduz uma variação do caudal de acordo com o esperado. O tempo de operação associado à lei de fecho 2 indica-se na Figura 4.30 por t_{f2} .

Pode observar-se na mesma figura ligeiras oscilações de caudal a partir do instante $t_{fVR} = 11,6$ s. A observação conjunta das Figuras 4.29 e 4.30 permite verificar que estas pequenas oscilações ocorrem no mesmo instante do fecho da válvula de retenção. O instante de fecho da válvula de retenção indica-se na Figura 4.30 por t_{fVR} . Assim sendo, pode concluir-se que as oscilações registadas ocorrem devido ao transitório causado pelo fecho da válvula de retenção.

Nas Figuras 4.31 e 4.32 representam-se as envolventes da cota piezométrica para os troços AC e AD.

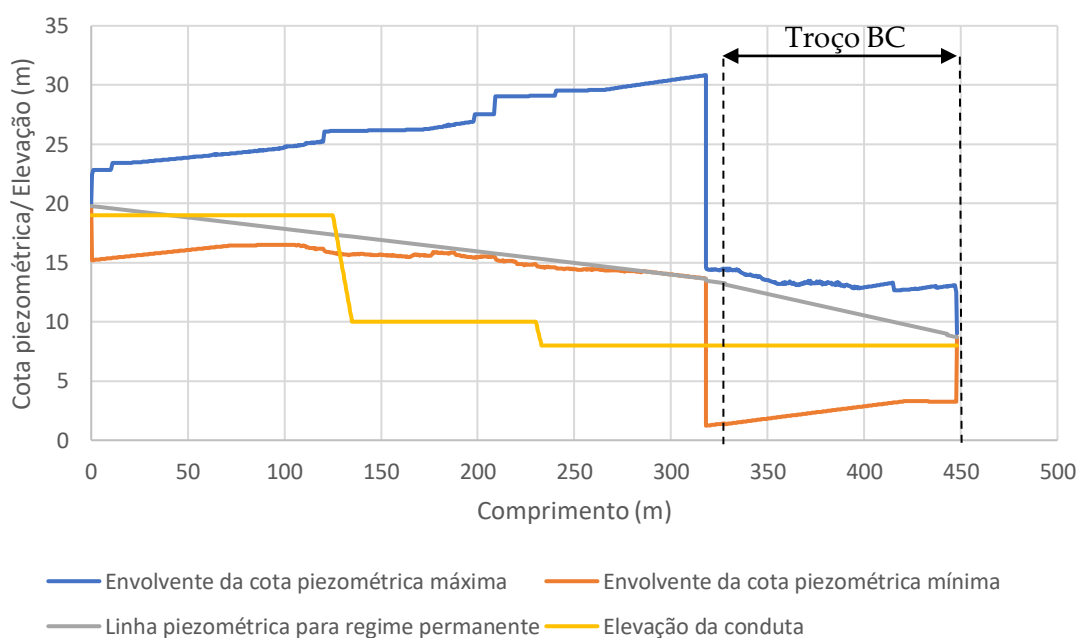


Figura 4.31 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS2)

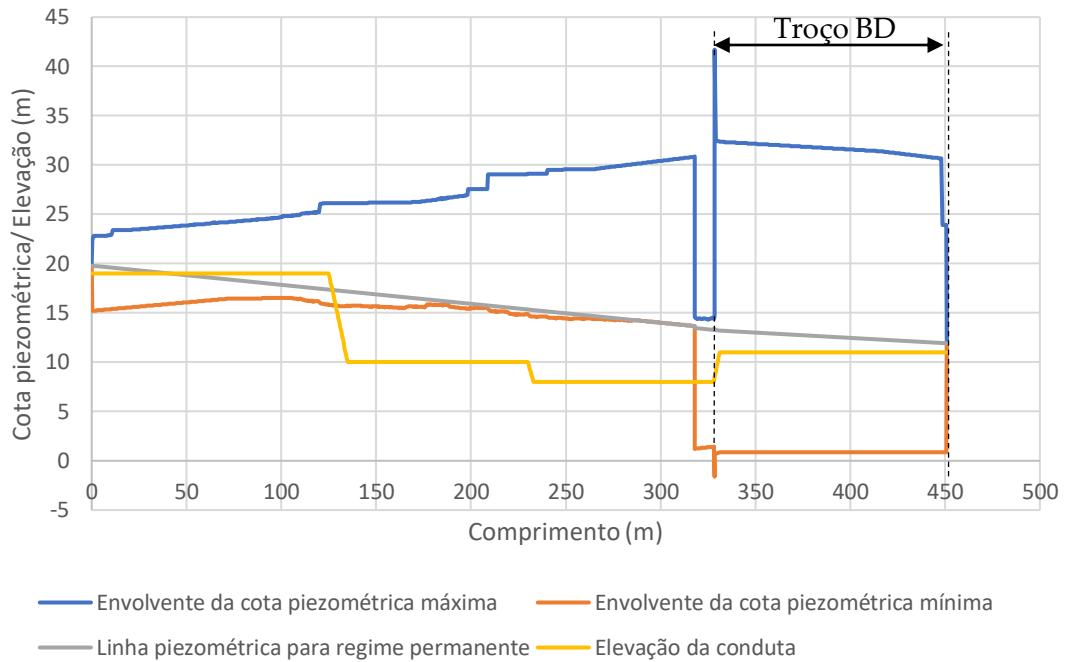


Figura 4.32 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS2)

Por análise das Figuras 4.31 e 4.32 constata-se que o fenómeno envolvido é mais complexo que os estudados anteriormente.

A representação das pressões ao longo do comprimento nas Figuras 4.31 e 4.32 facilita a análise das sobrepressões e cavitação.

No que concerne à evolução da envolvente da cota piezométrica mínima, pode verificar-se que o sistema experimenta depressões nas condutas 1 e 2, assim como em todas as condutas a jusante da válvula 2 (condutas 7 a 13).

Na Figura 4.32, nomeadamente no troço correspondente à conduta 8, verifica-se que pode ocorrer cavitação.

Desta forma, pode concluir-se que o transitório provocado pelo fecho da válvula de retenção introduz no sistema importantes variações de pressão.

De modo a verificar se ocorre cavitação, representam-se nas Figuras 4.33 e 4.34, os valores mínimos das envolventes de pressão absoluta para os troços AC e AD, respetivamente.

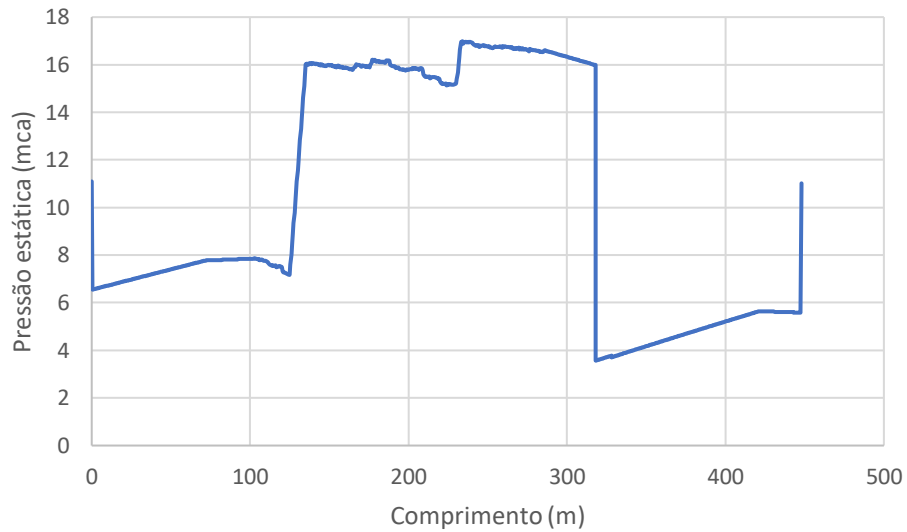


Figura 4.33 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante trecho AC (cenário SS2)

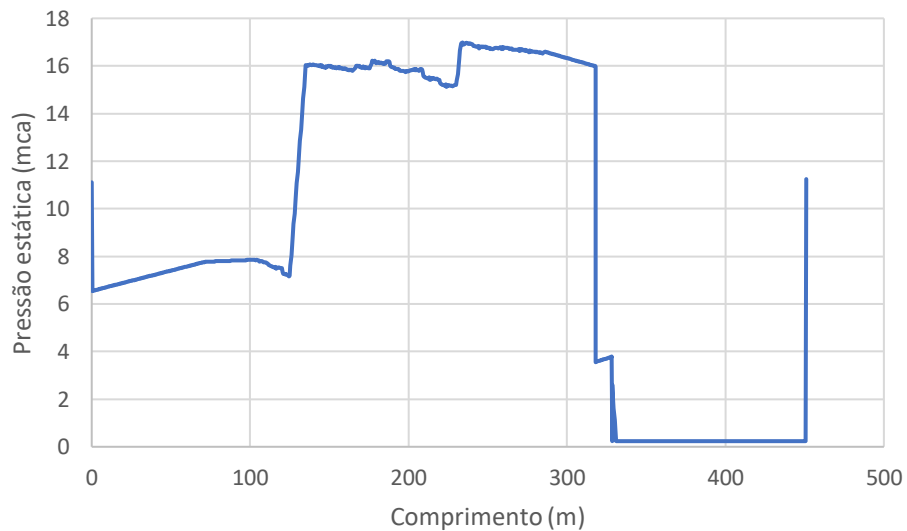


Figura 4.34 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante trecho AD (cenário SS2)

Por observação das figuras pode confirmar-se que os resultados obtidos estão de acordo com as envolventes da cota piezométrica anteriormente apresentadas.

Na Figura 4.34 observa-se que a envolvente de pressão absoluta mínima atinge o seu valor limite nas condutas a jusante da válvula de retenção (condutas 9, 10 e 11). Este valor corresponde aproximadamente à tensão de vaporização do fluido.

Visto que os valores de depressão são bastante próximos da pressão de vaporização, seguidamente escolhe-se e dimensiona-se um dispositivo de proteção que evite a cavitação.

Para o efeito, o equipamento de proteção eleito foi um reservatório de ar comprimido (RAC). O respetivo dimensionamento foi efetuado utilizando o código numérico iterativamente. Desta forma, foi admitido um volume de gás inicial, e analisando os resultados da respetiva simulação referentes às depressões, otimizaram-se as dimensões do reservatório.

O processo permitiu identificar a posição do RAC: a um metro a jusante da válvula de retenção e o seu volume de ar inicial e respetiva constante politrópica (Tabela 4).

Tabela 4.4 - Entrada de dados para o RAC

Constante politrópica do ar	1,3
Volume de ar inicial (m ³)	0,25

Na Figura 4.35 representa-se a instalação com a introdução do reservatório hidropneumático.

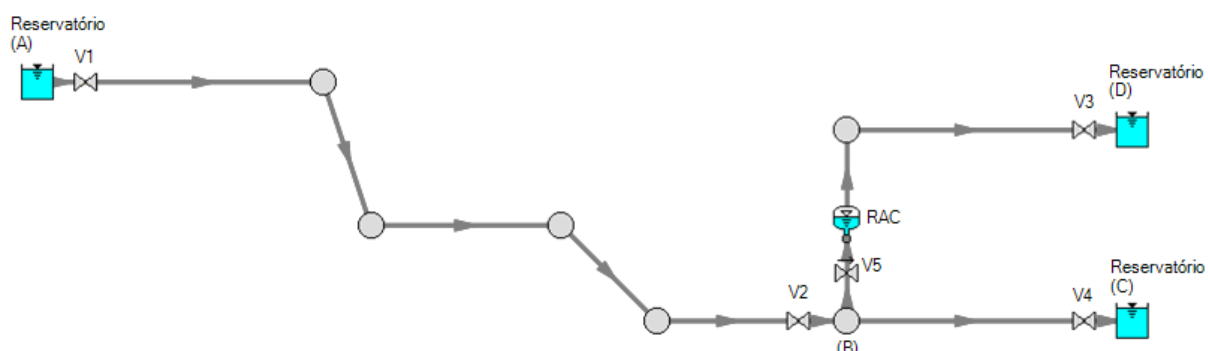


Figura 4.35 - Representação da instalação com reservatório hidropneumático

Para comparar os resultados obtidos, representam-se na Figura 4.36 as envolventes da cota piezométrica no troço AD.

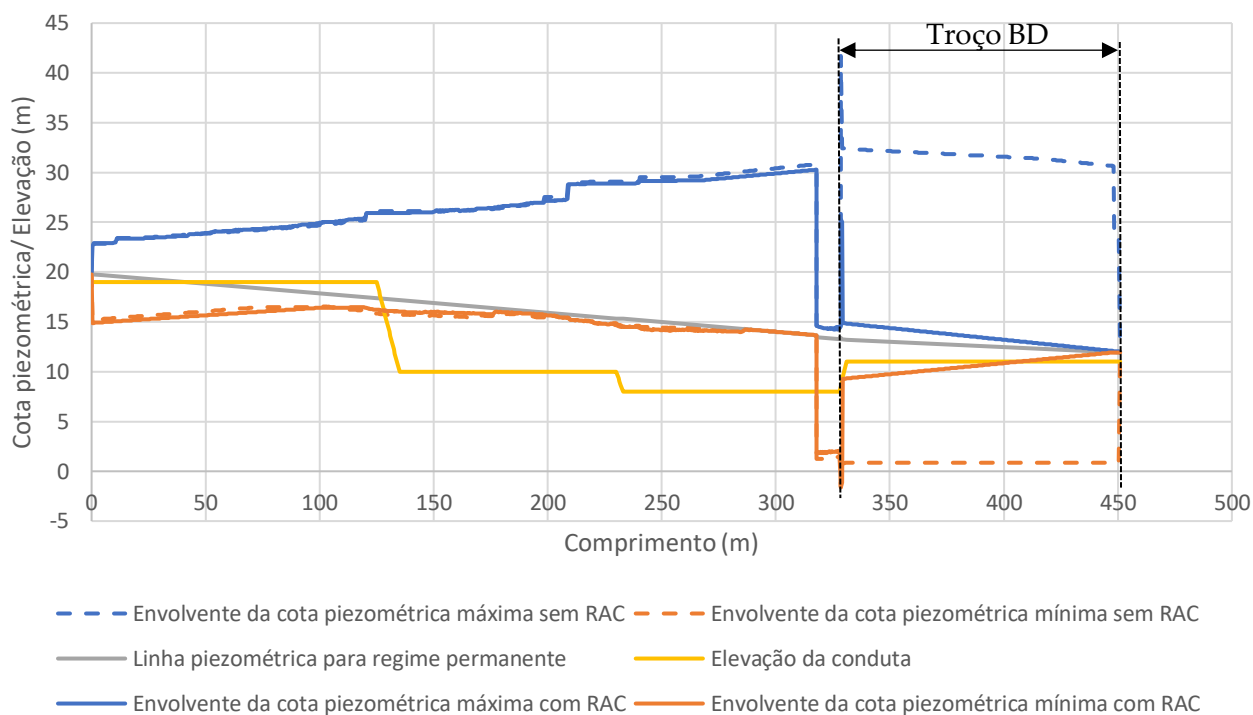


Figura 4.36 - Envoltentes da cota piezométrica sem e com RAC, variante troço AD (cenário SS2)

Por observação da Figura 4.36 verifica-se que a montante da ramificação o RAC tem um pequeno efeito. A jusante da ramificação verifica-se que as pressões máximas e mínimas são atenuadas de forma significativa.

Para melhor visualização do impacto da introdução do reservatório hidropneumático na ocorrência de cavitação, representa-se na Figura 4.37 a envoltente de pressão absoluta mínima desde a secção imediatamente a jusante da válvula de seccionamento 2 (V2) até ao reservatório (D). Na Figura 4.37 a escala de comprimento apresentada corresponde ao troço compreendido de 318 a 451 metros de comprimento representados na Figura 4.34.

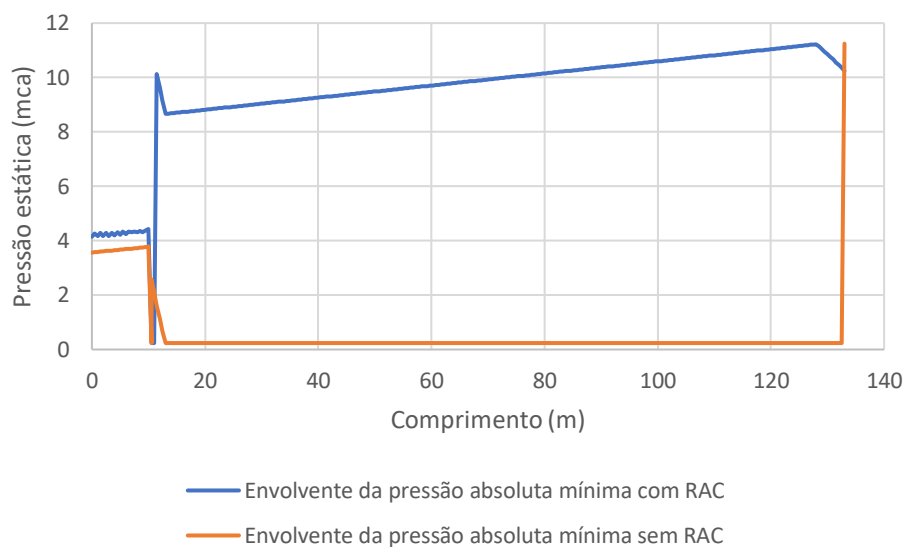


Figura 4.37 - Envolvente da pressão absoluta mínima sem e com RAC, desde V2 até reservatório (D) (cenário SS2)

Como se pode verificar na figura acima, a jusante do reservatório hidropneumático as pressões absolutas mínimas variam entre aproximadamente 9 e 11 metros. Desta forma, a introdução do reservatório hidropneumático revela-se eficaz, pois evita a ocorrência de cavitação.

Na secção com comprimento de 0,5 m localizada entre a válvula de retenção e o reservatório hidropneumático o efeito do RAC não é relevante. Neste troço as pressões podem aproximar-se do valor da tensão de vaporização do fluido, no entanto apenas em períodos de muito curta duração, pelo que a cavitação não pode ser generalizada. Assim, para prevenir danificar a conduta, esta deve ser sobredimensionada.

Para melhor compreender o regime transitório introduzido pela válvula de retenção, representa-se na Figura 4.38 a evolução temporal da pressão absoluta estática na secção imediatamente a montante da válvula de retenção.

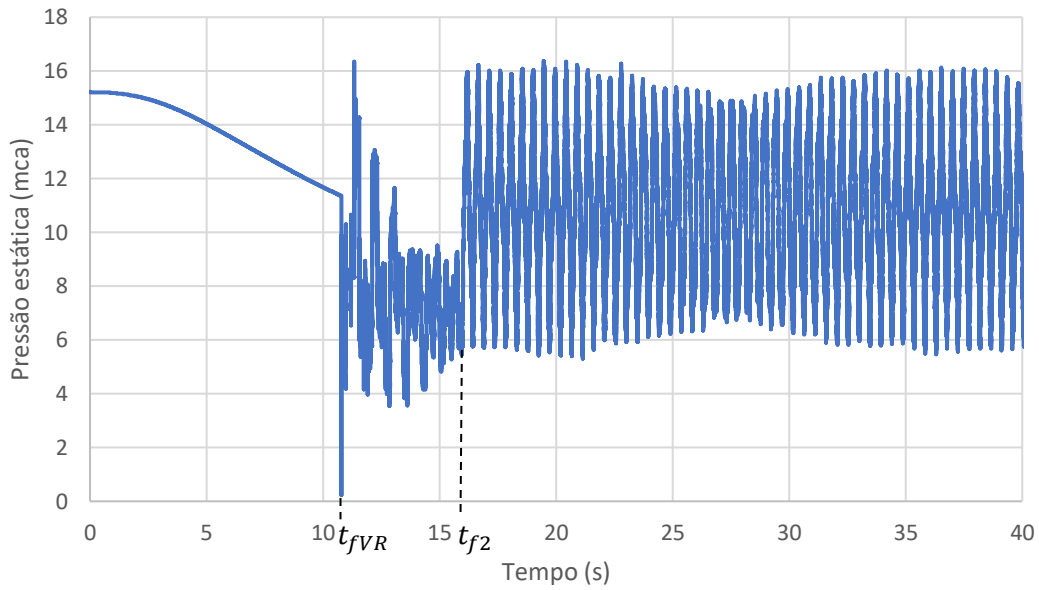


Figura 4.38 - Pressão absoluta estática a montante da válvula de retenção com RAC (cenário SS2)

Até ao instante do fecho da válvula de retenção ($t_{fVR} = 11,6 s$), a pressão diminui suavemente de acordo com a lei de fecho 2. Desde este instante até ao instante final do fecho da válvula 2 ($t_{f2} = 16 s$), é notório o transitório causado pelo fecho da válvula de retenção. Finalizado o fecho, a onda de pressão consiste no golpe de aríete localizado entre a secção a montante da válvula de retenção e o reservatório (C), correspondente à zona da direita da Figura 4.38. Nesta secção é inexistente a influência do reservatório hidropneumático. O mesmo não se passa na extremidade da secção ligada ao RAC. Na Figura 4.39 representa-se a evolução temporal da pressão absoluta estática nesta secção.

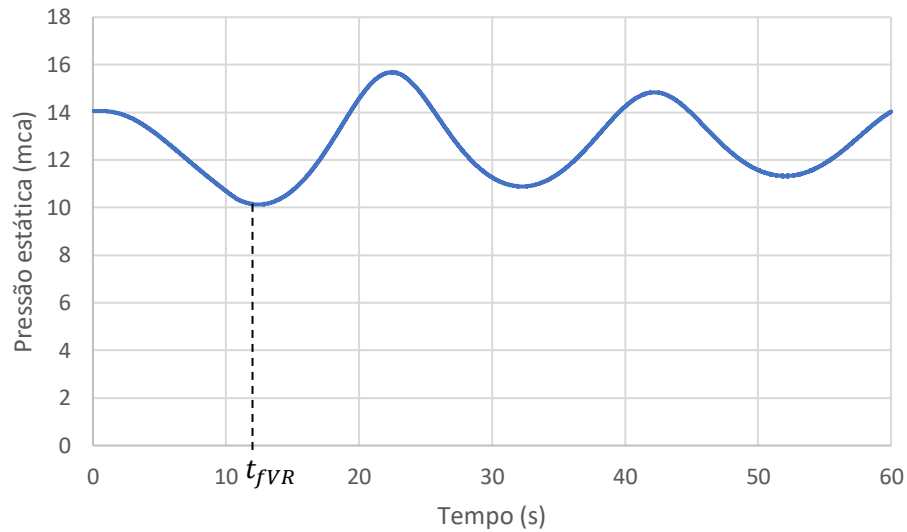


Figura 4.39 - Pressão absoluta estática à entrada do reservatório hidropneumático (cenário SS2)

Nesta Figura verifica-se uma diminuição da pressão até ao instante de fecho da válvula de retenção ($t_{fVR} = 11,6 \text{ s}$), de acordo com a lei de fecho imposta à válvula 2 (V2). Após este instante, a pressão varia com a frequência natural do reservatório hidropneumático, com período correspondente de aproximadamente 20 segundos. Da análise conjunta das Figuras 4.38 e 4.39, fica claro que a introdução do reservatório hidropneumático promove a atenuação dos efeitos do transitório hidráulico provocado pelo fecho da válvula de retenção, evitando a cavitação. Assim, para o cenário SS2 recomenda-se a utilização de um reservatório hidropneumático.

4.4.2 Saída de serviço para condição inicial de abastecimento exclusivo

Para o procedimento de saída de serviço de abastecimento exclusivo foram realizados dois cenários. Nestes cenários inicialmente encontra-se a ser abastecido exclusivamente um dos reservatórios e procede-se ao fecho de uma das válvulas 3 ou 4. Em ambos os cenários utilizou-se a lei de fecho 2 (equação (4.2)).

O primeiro cenário (SS3) corresponde à saída de serviço do abastecimento exclusivo do reservatório (C) através do fecho da válvula 4 (V4).

O segundo cenário (SS4) corresponde à saída de serviço do abastecimento exclusivo do reservatório (D) através do fecho da válvula 3 (V3).

Para o cenário SS3, representam-se na Figura 4.40 as envolventes da cota piezométrica no troço AC.

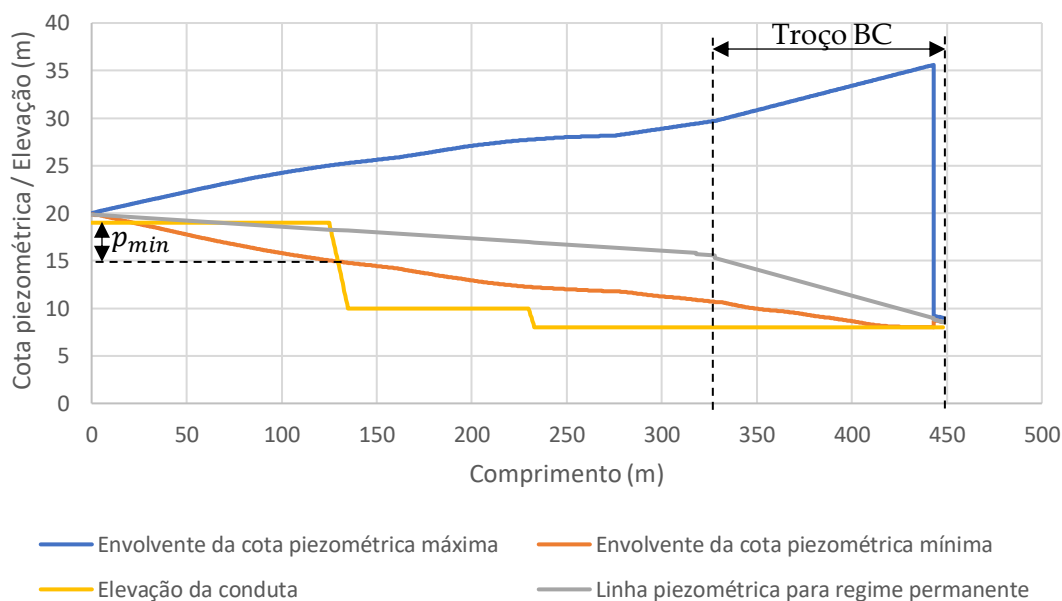


Figura 4.40 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS3)

A representação das pressões ao longo do comprimento permite identificar a sobrepressão na secção imediatamente a montante da válvula 4 (V4), assim como a depressão na conduta 2.

Para a melhor percepção da ocorrência de cavitação, representa-se na Figura 4.41 a envolvente de pressão absoluta mínima no mesmo troço.

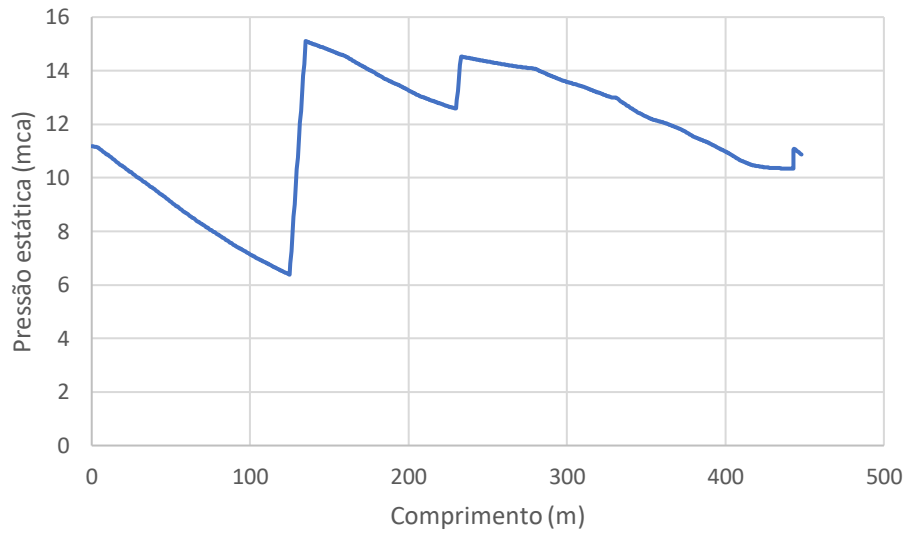


Figura 4.41 - Envoltório de pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário SS3)

Conforme se pode verificar pela Figura 4.41 não ocorre cavitação.

Fica assim verificado para o cenário SS3 que o dimensionamento efetuado é adequado.

Para o cenário SS4, representam-se na Figura 4.42 as envoltórias da cota piezométrica no troço AD.

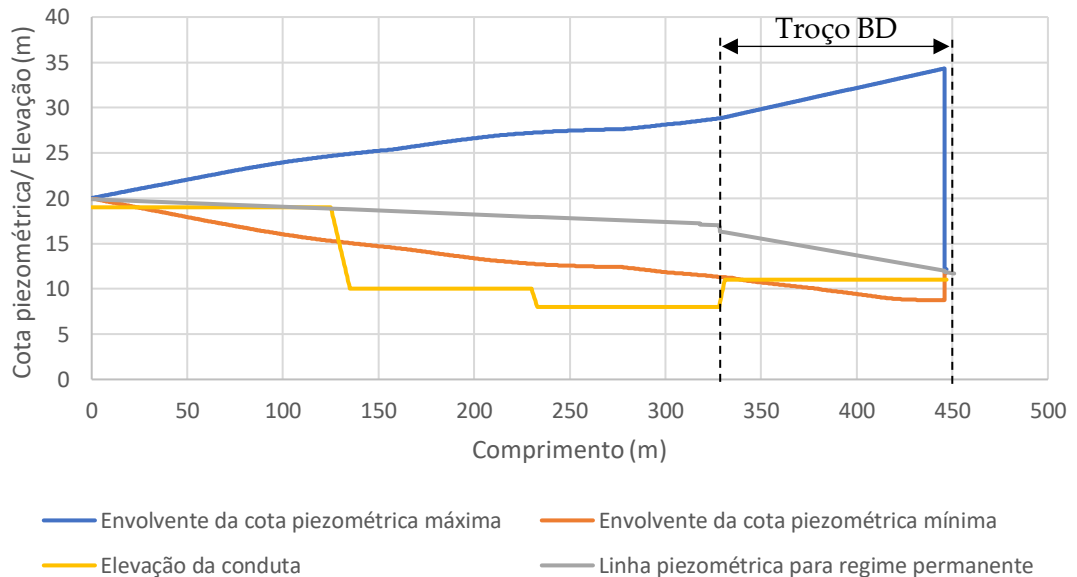


Figura 4.42 - Envoltórias da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS4)

À semelhança do cenário SS3, as envolventes da cota piezométrica no troço AD permitem identificar a sobrepressão na secção a montante da válvula 3 (V3). Pode ainda verificar-se na secção correspondente às condutas 10 e 11 uma ligeira depressão.

Através dos resultados acima expostos é possível verificar que não ocorre cavitação, no entanto para melhor visualização da ocorrência deste fenómeno, representa-se na Figura 4.43 a envolvente de pressão absoluta mínima no mesmo troço.

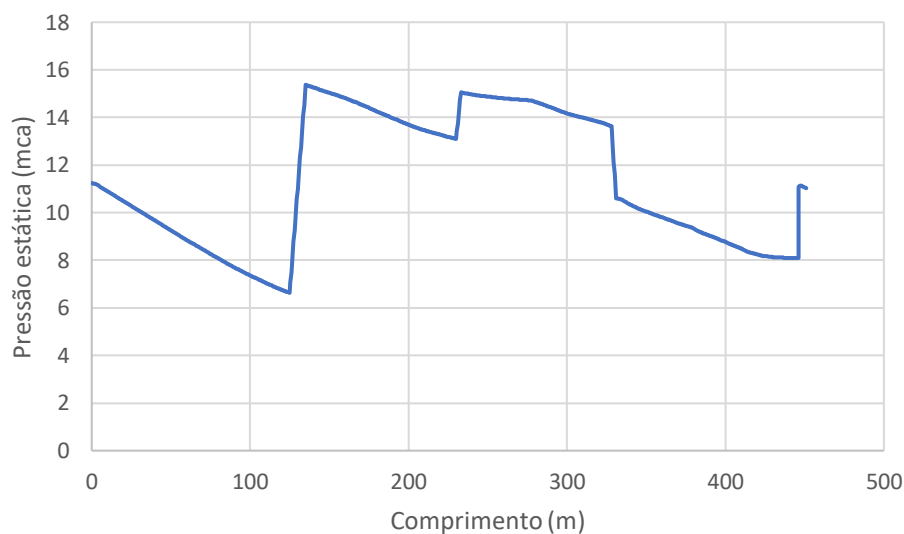


Figura 4.43 - Envolvente de pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS4)

4.4.3 Saída de serviço de apenas um dos reservatórios

A saída de serviço de um dos reservatórios, prosseguindo o fornecimento do outro é realizada a partir do fecho de uma das válvulas 3 (V3) ou 4 (V4). No cenário SS5 correspondente à saída de serviço do reservatório (D) e no cenário SS6 correspondente à saída de serviço do reservatório (C). De referir que todas as válvulas de seccionamento se encontram inicialmente abertas.

No cenário SS5, fecha-se a válvula 3 (V3) interrompendo o escoamento para o reservatório (D), passando o fornecimento a ser exclusivo para o reservatório (C). Assim, aplicou-se a lei de fecho 1 à válvula 3 (V3).

A evolução do caudal volúmico nos reservatórios (D) e (C) é representada nas Figura 4.44 e 4.45, respetivamente.

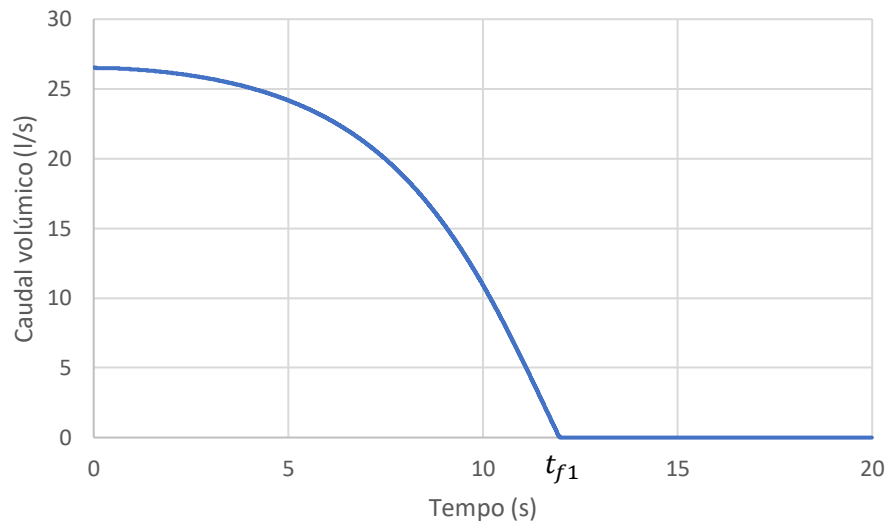


Figura 4.44 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário SS5)

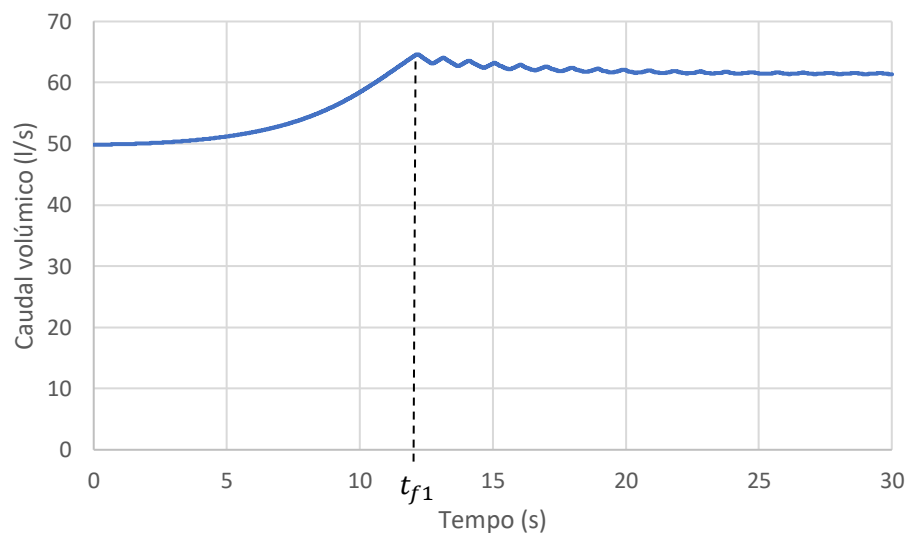


Figura 4.45 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário SS5)

A Figura 4.44 permite confirmar a evolução do caudal expectável, o caudal para o reservatório (C) aumenta inicialmente devido à redução de escoamento para o reservatório (D), atingindo um valor permanente 61 l/s, idêntico ao obtido para abastecimento exclusivo do reservatório (C), na secção 3.3.2.

Concluído o fecho na válvula 3 (V3) ($t_{f1} = 12$ s), observam-se ligeiras oscilações no caudal, que evidentemente são acompanhadas das respetivas oscilações na pressão estática.

As envolventes da cota piezométrica para os troços AC e AD representam-se nas Figuras 4.46 e 4.47, respetivamente.

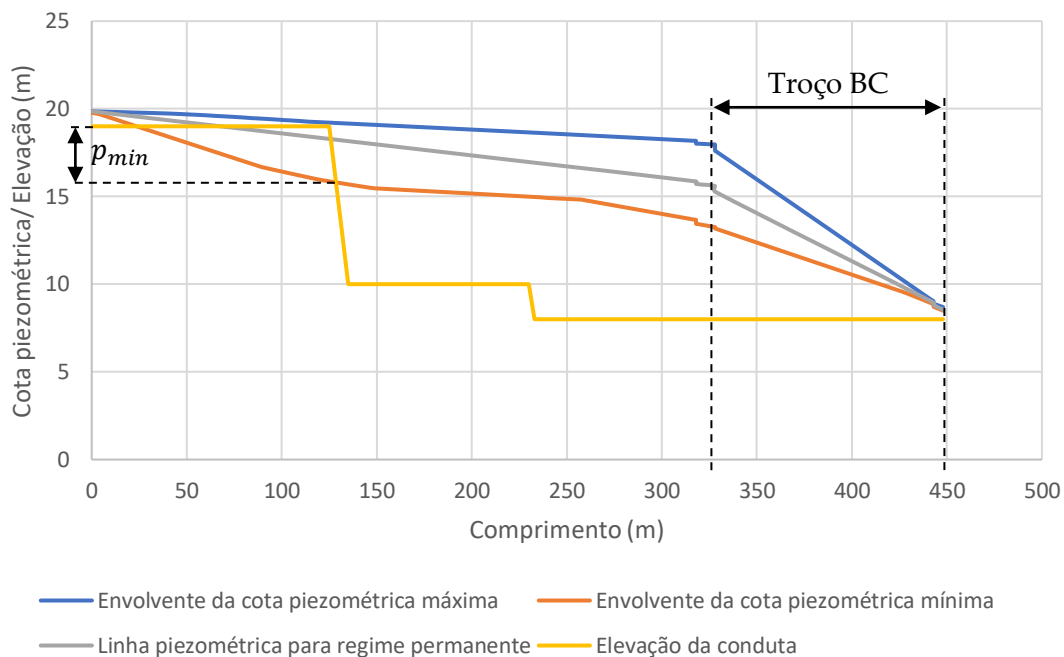


Figura 4.46 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS5)

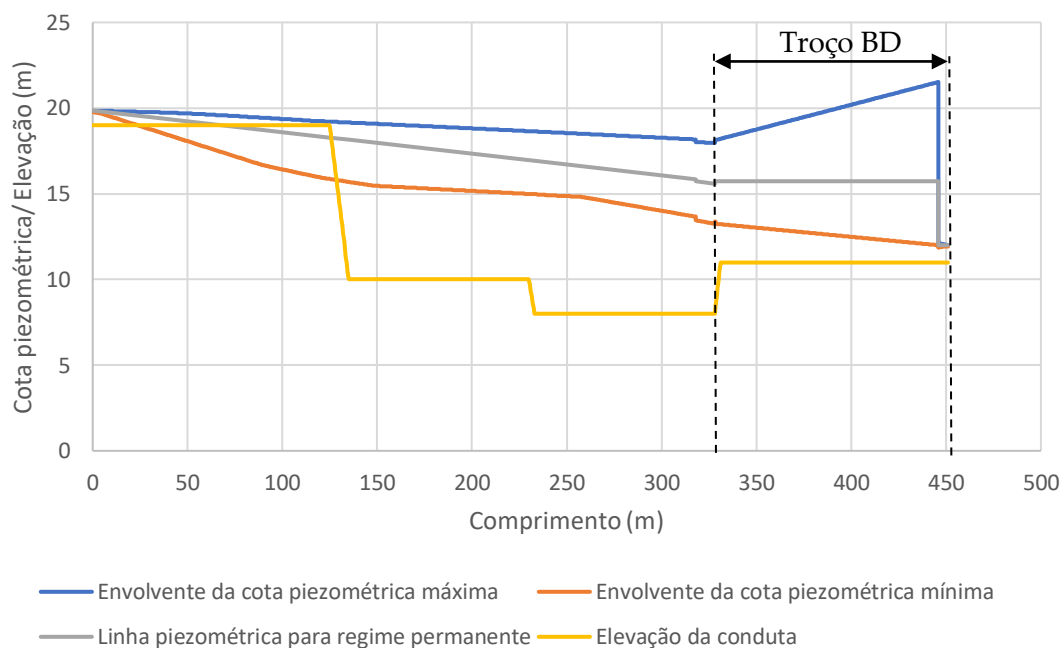


Figura 4.47 - Envolventes da cota piezométrica, variante troço AD (cenário SS5)

Como é possível verificar pelas figuras anteriores, a saída de serviço do reservatório (D) não acarreta problemas no que respeita à pressão.

Relativamente à cavitação representa-se, nas Figuras 4.48 e 4.49, a evolução das envolventes de pressão absoluta mínima para os troços AC e AD, respetivamente.

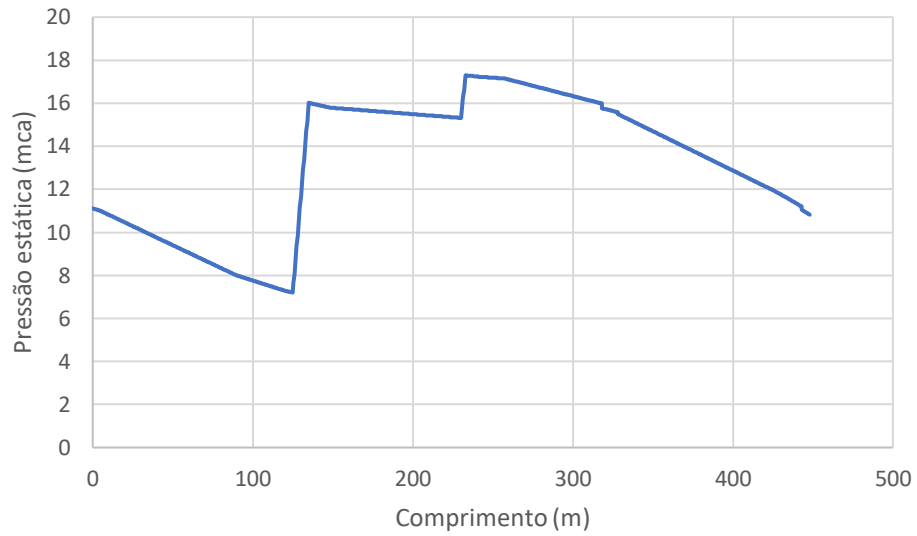


Figura 4.48 - Envoltório de pressão absoluta mínima, variante trecho AC (cenário SS5)

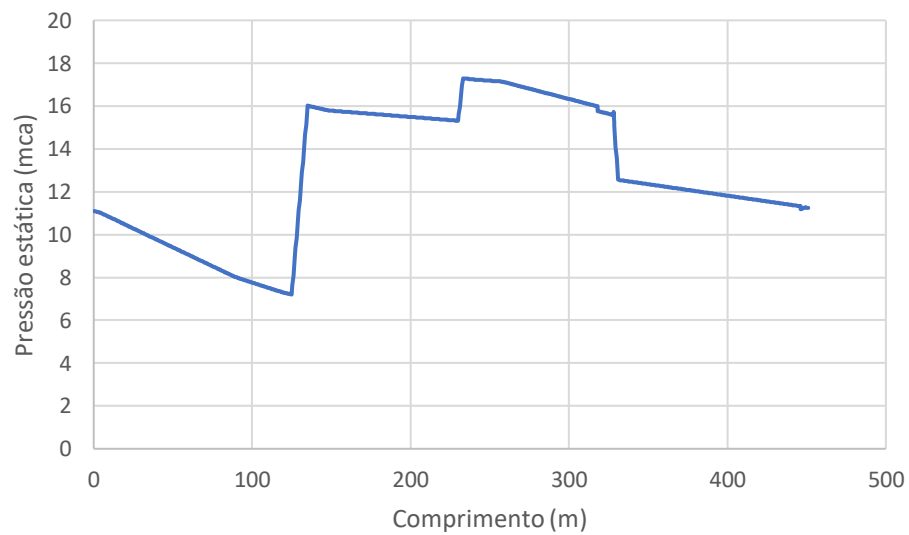


Figura 4.49 - Envoltório de pressão absoluta mínima, variante trecho AD (cenário SS5)

Pelas figuras anteriores, pode notar-se que o valor mínimo de pressão absoluta é sempre superior ao valor da tensão de vaporização do líquido, pelo que não se verifica a ocorrência do fenómeno de cavitação.

Concluindo, também para o cenário SS5 não existem problemas de sobrepessão ou de cavitação.

No cenário SS6, fecha-se a válvula 4 (V4) interrompendo o escoamento para o reservatório (C), passando o fornecimento a ser exclusivo para o reservatório (D). Assim, aplicou-se a lei de fecho 2 à válvula 4 (V4).

Representa-se nas Figuras 4.44 e 4.45 a evolução do caudal volúmico nos reservatórios (C) e (D), respetivamente.

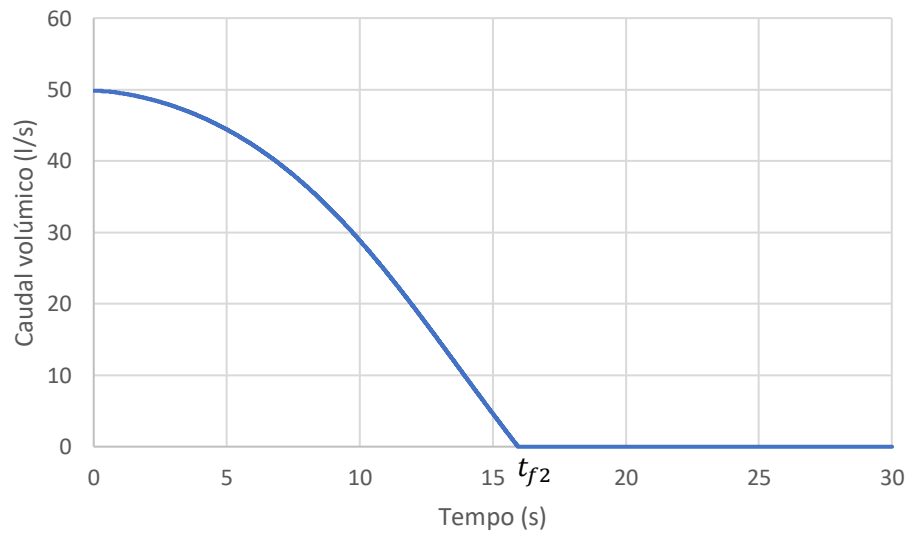


Figura 4.50 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário SS6)

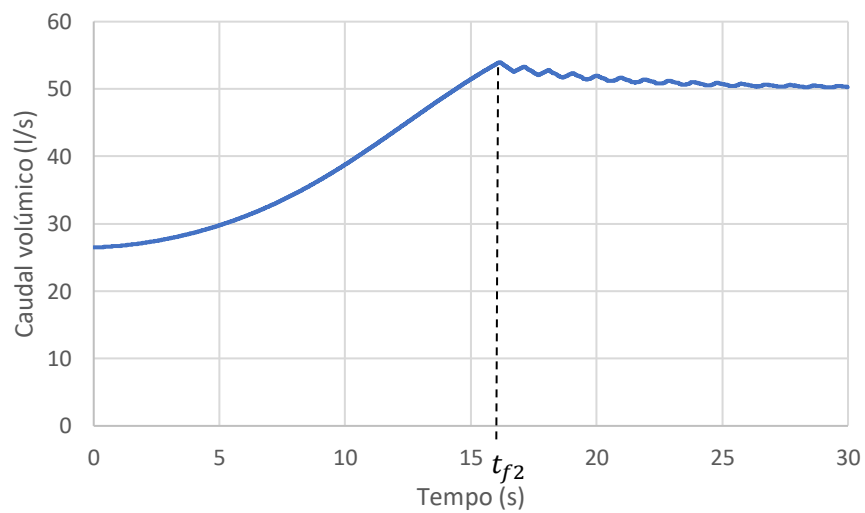


Figura 4.51 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário SS6)

A Figura 4.51 permite confirmar a evolução do caudal expectável, o caudal para o reservatório (D) aumenta inicialmente devido à redução de escoamento para o reservatório (C), atingindo um valor permanente 50 l/s, idêntico ao obtido para abastecimento exclusivo do reservatório (C), na secção 3.3.3.

Concluído o fecho na válvula 4 (V4) ($t_{f1} = 16$ s), observam-se ligeiras oscilações no caudal, que evidentemente são acompanhadas das respetivas oscilações na pressão estática.

As envolventes da cota piezométrica para os troços AC e AD representam-se nas Figuras 4.52 e 4.53, respetivamente.

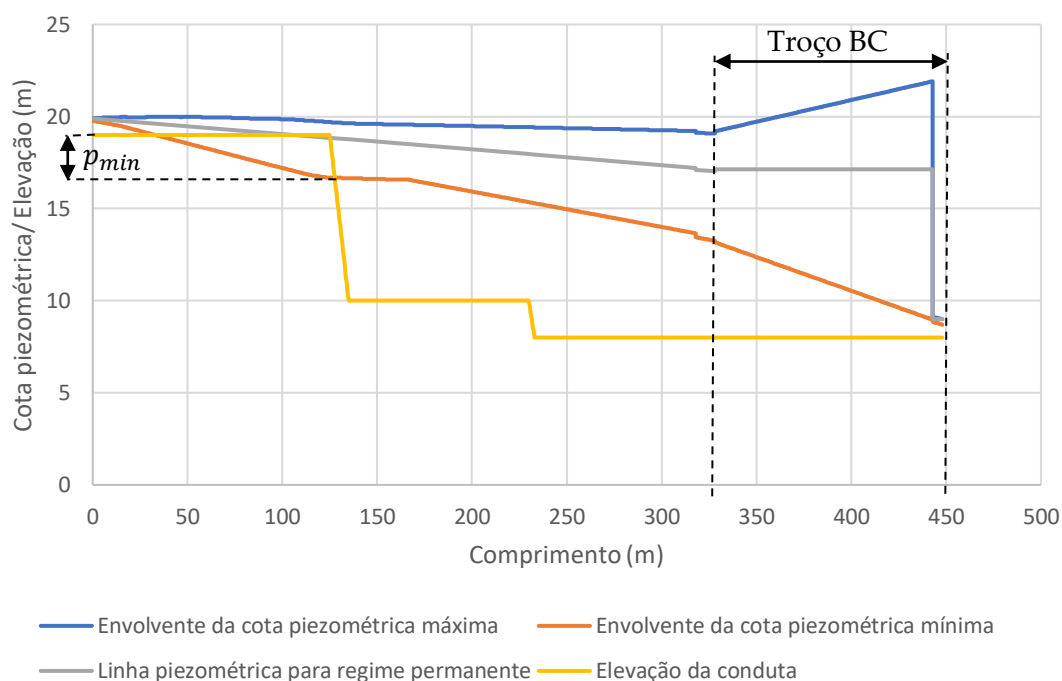


Figura 4.52 - Envolve da cota piezométrica, variante troço AC (cenário SS6)

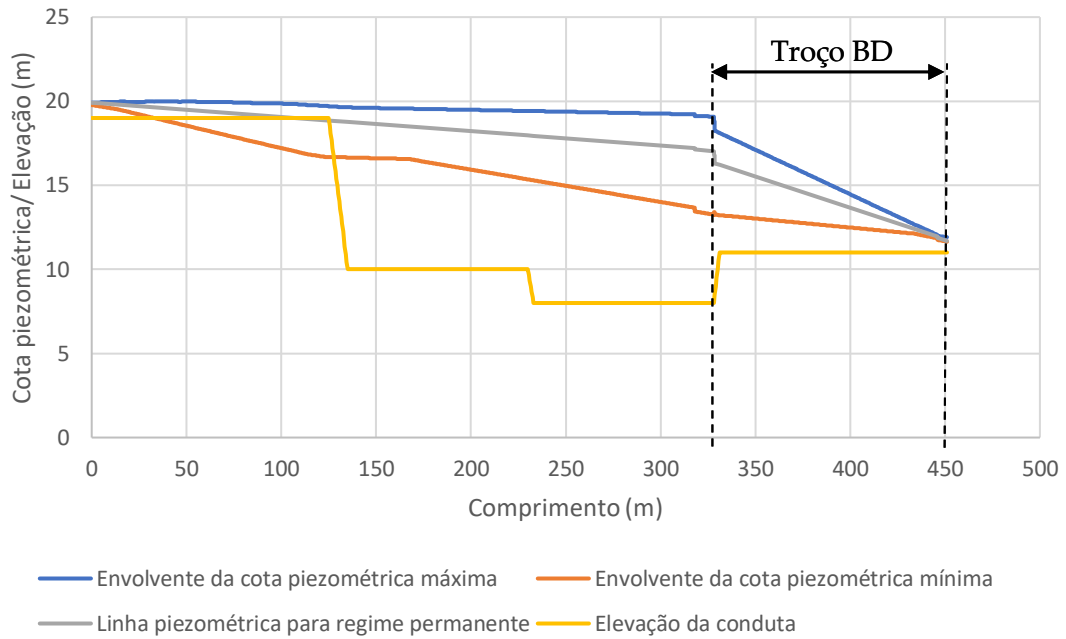


Figura 4.53 - Envoltentes da cota piezométrica, variante trecho AD (cenário SS6)

Por observação das figuras anteriores, a sua análise é semelhante ao cenário anterior, com inversão do reservatório a abastecer, não existindo problemas no que respeita à sobrepressão.

Relativamente à cavitação representa-se, nas Figuras 4.54 e 4.55, a evolução das envoltentes de pressão absoluta mínima para os troços AC e AD, respetivamente.

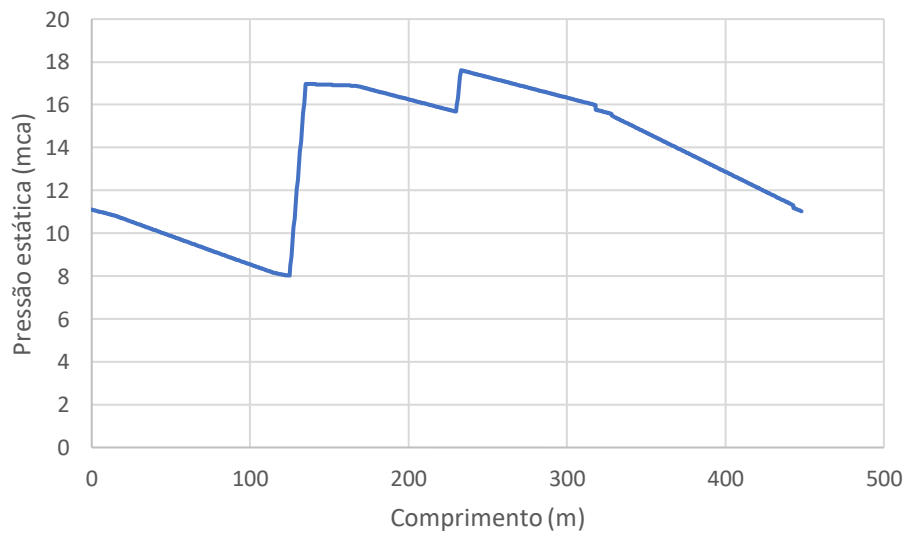


Figura 4.54 - Envoltente de pressão absoluta mínima, variante trecho AC (cenário SS6)

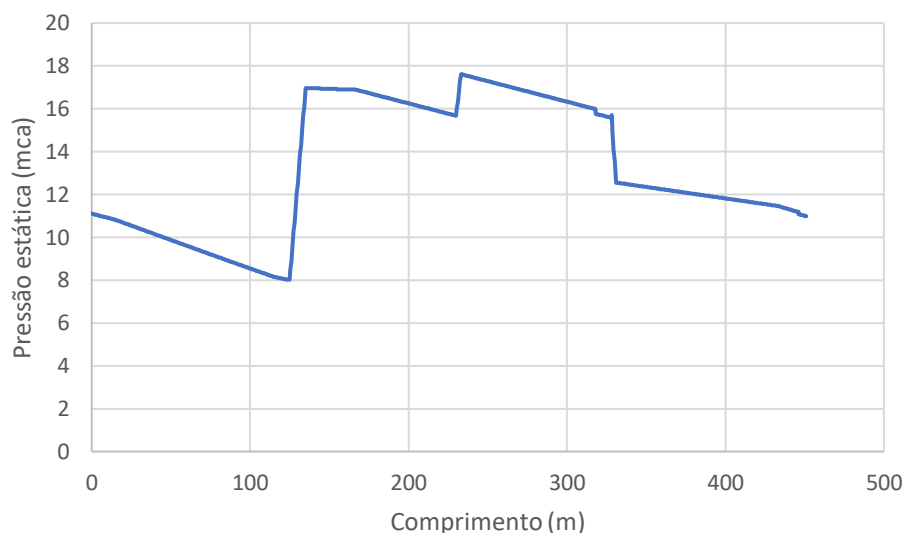


Figura 4.55 - Envoltório de pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário SS6)

Neste cenário o valor de depressão obtido é ligeiramente inferior ao cenário SS5, em virtude do maior tempo de fecho útil utilizado para a lei de fecho 2.

Verificados todos os cenários de 'Saídas de serviço', aborda-se na próxima secção as saídas e entrada de serviço simultâneas.

4.5 Fornecimento alternado dos reservatórios

O 'Fornecimento alternado dos reservatórios' representa os cenários de entrada e saída de serviço simultâneas. Inicialmente um dos reservatórios encontra-se a ser abastecido. Pretende-se terminar este fornecimento e simultaneamente começar o fornecimento do outro reservatório.

Desta forma, é necessário aplicar uma lei de abertura ao reservatório que entra em serviço e simultaneamente uma lei de fecho ao outro reservatório.

Assim, aplicou-se a lei de abertura 1, a que corresponde um tempo de abertura de 2,2 s e tempo de espera de 2 s (equação (4.5)), e a lei de fecho 3, a que corresponde um tempo de fecho de 38 s (equações (4.3) e (4.4)).

No cenário FA1 pretende-se trocar o abastecimento do reservatório (D) para o reservatório (C), sem interromper o fornecimento. Nas Figuras 4.56 e 4.57 representa-se a evolução temporal dos caudais volúmicos nos reservatórios (C) e (D), respetivamente.

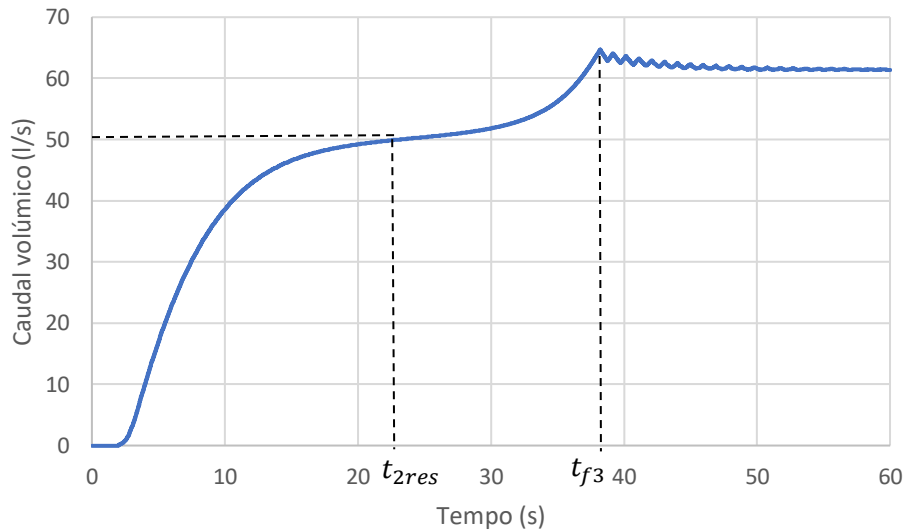


Figura 4.56 - Caudal volumétrico, reservatório (C) (cenário FA1)

Na Figura 4.56 observa-se um aumento inicial de caudal no reservatório (C), resultado da abertura da válvula 4. Aos 23 segundos (t_{2res}) o caudal iguala o de regime permanente para o abastecimento simultâneo dos dois reservatórios (secção 3.3.1). A partir deste instante o caudal continua a aumentar derivado à fase final do fecho da válvula 3 (período de maior eficácia deste fecho). Terminado o fecho da válvula 3 (t_{f3}), verificam-se pequenas oscilações no caudal, até este estabilizar em regime permanente para aproximadamente $t = 50$ s. Este valor de 61 l/s coincide com o obtido para o abastecimento exclusivo do reservatório (C) (secção 3.3.2).

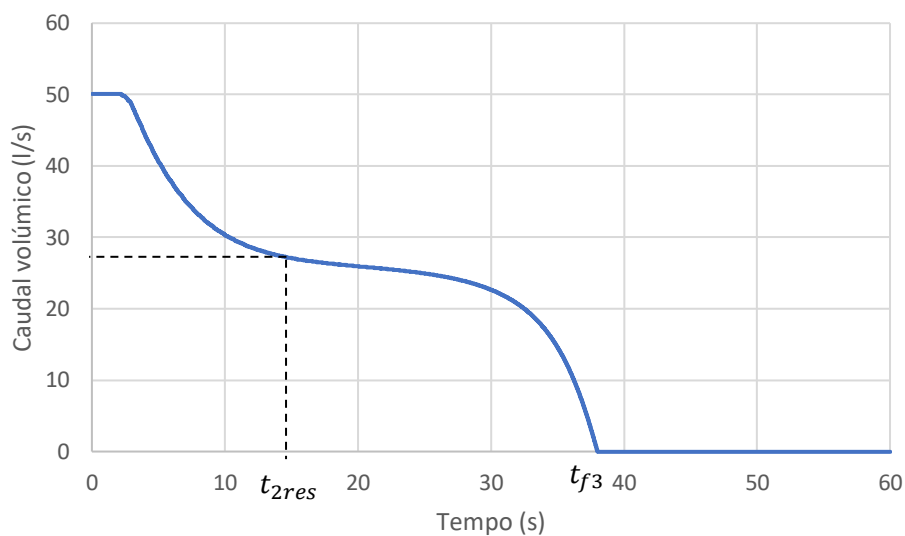


Figura 4.57 - Caudal volumétrico, reservatório (D) (cenário FA1)

Relativamente ao caudal no reservatório (D) (Figura 4.57), o valor inicial de 50 l/s corresponde ao abastecimento exclusivo do reservatório (D) (secção 3.3.3). Inicialmente apenas a abertura da válvula 4 tem relevância, registando-se uma diminuição inicial de caudal no reservatório (D), que evolui até 27 l/s que corresponde ao caudal em regime permanente para a situação de abastecimento simultâneo dos dois reservatórios (secção 3.3.1). Na fase final da Figura 4.57 corresponde ao fecho eficaz da válvula 3 cessando o caudal ao fim de $t_{f3} = 38$ s.

Analisadas as evoluções dos caudais nos reservatórios de receção, importa verificar a ocorrência de fenómenos de sobrepressão e cavitação no sistema. Para o efeito, representam-se nas Figuras 4.58 e 4.59, as envolventes da cota piezométrica nos troços AC e AD, respetivamente (comutação do abastecimento entre os reservatórios (D) e (C)).

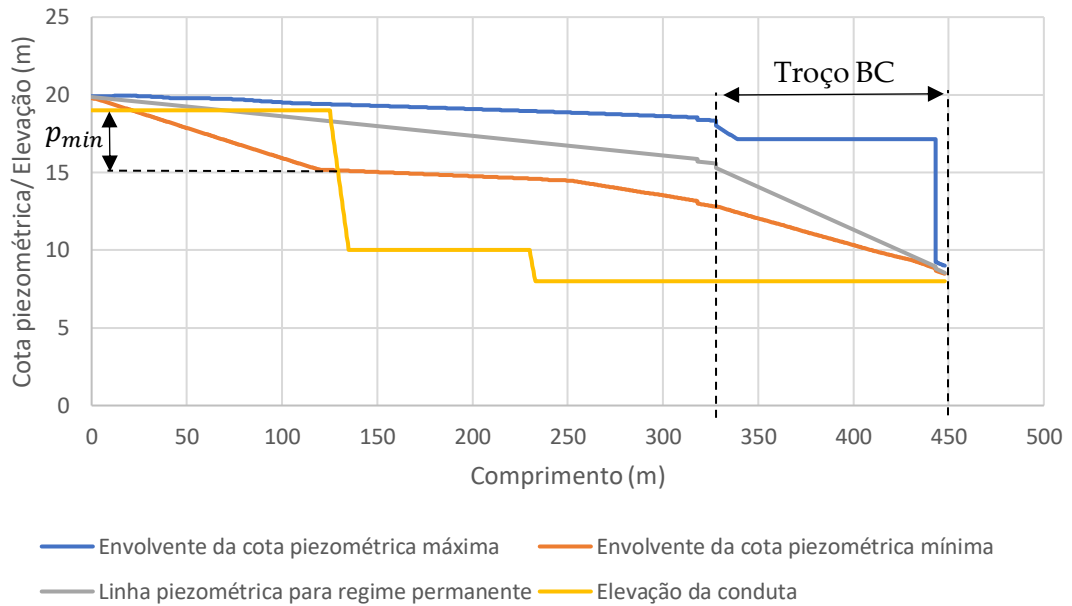


Figura 4.58 - Envoltentes da cota piezométrica, variante trecho AC (cenário FA1)

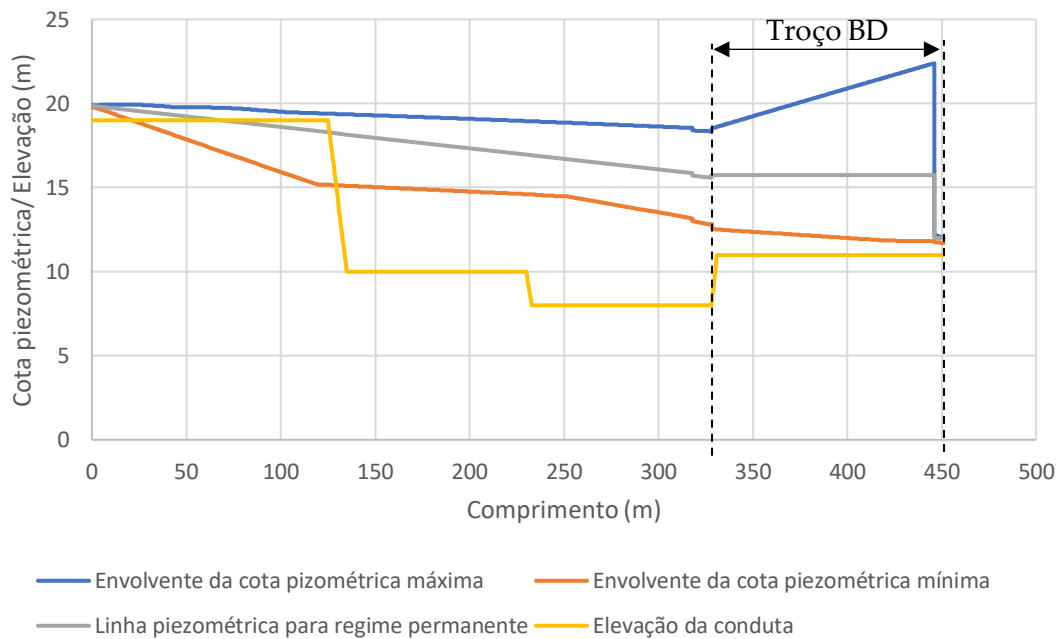


Figura 4.59 - Envoltentes da cota piezométrica, variante trecho AD (cenário FA1)

Através das Figuras 4.58 e 4.59 pode concluir-se que não existem valores de sobre-pressão significativos.

No entanto, à semelhança dos cenários anteriores, de forma a permitir uma melhor visualização da ocorrência do fenómeno de cavitação, representam-se nas Figuras 4.60 e 4.61 as envoltentes da pressão absoluta mínima para os troços AC e AD, respetivamente.

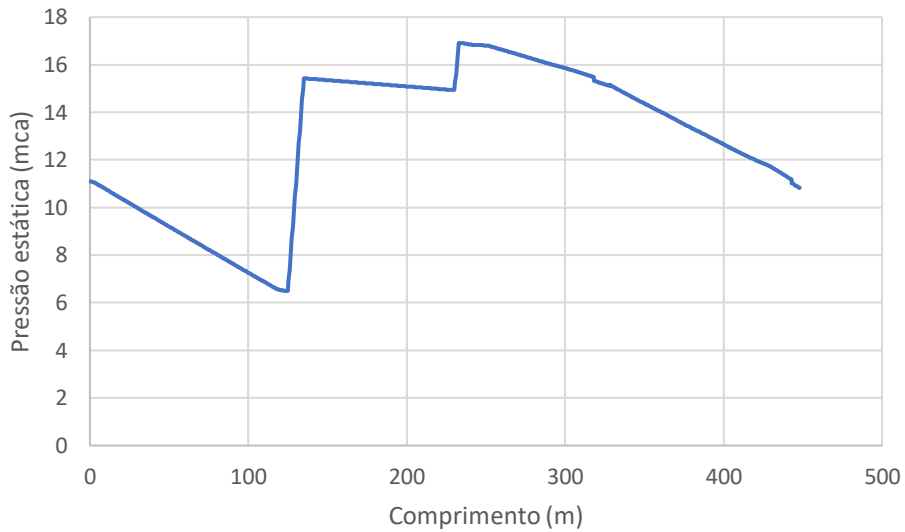


Figura 4.60 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante trecho AC (cenário FA1)

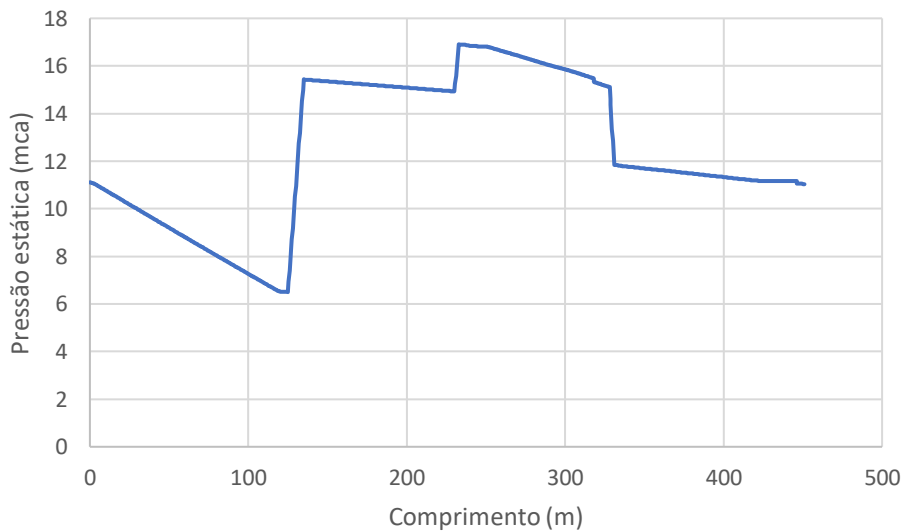


Figura 4.61 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante trecho AD (cenário FA1)

Nas Figuras 4.60 e 4.61 pode verificar-se um valor limite de pressão absoluta mínima de 6,5 metros na secção final da conduta 2 (correspondente à secção de comprimento de 125 metros). Por este valor ser superior à tensão de vaporização do fluido à temperatura do escoamento, pode concluir-se que não à perigo de ocorrência de cavitação.

Pode concluir-se assim que para o cenário FA1 o dimensionamento efetuado é adequado.

No cenário FA2 pretende-se trocar o abastecimento do reservatório (C) para o reservatório (D), sem interromper o fornecimento. A evolução temporal dos caudais volúmicos nos reservatórios (C) e (D), representam-se nas Figuras 4.62 e 4.63, respetivamente.

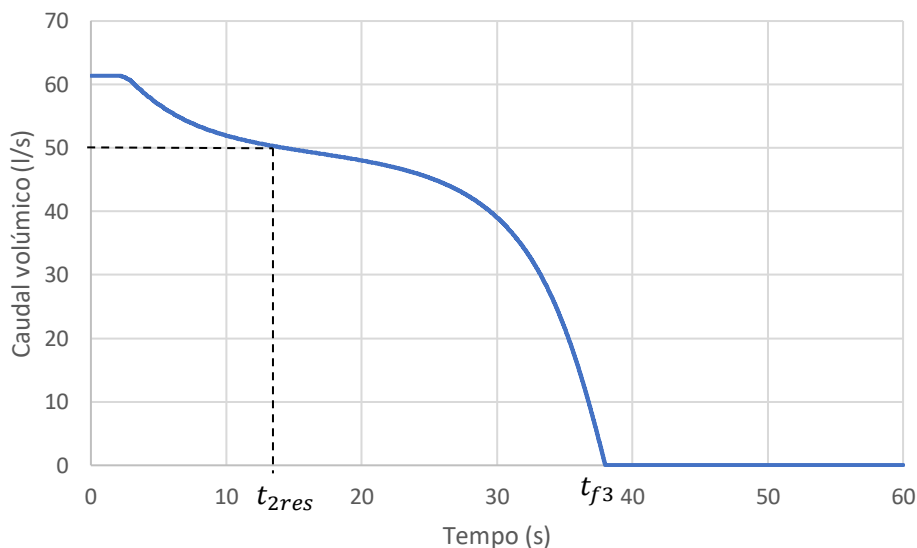


Figura 4.62 - Caudal volúmico, reservatório (C) (cenário FA2)

Na evolução do caudal no reservatório (C) (Figura 4.62), o valor inicial de 61 l/s corresponde à situação de abastecimento exclusivo do reservatório (C) (secção 3.3.2). Inicialmente apenas a abertura da válvula 3 tem relevância, registando-se uma diminuição inicial de caudal no reservatório (C), que evolui até 50 l/s que corresponde ao caudal neste reservatório em regime permanente para a situação de abastecimento simultâneo dos dois reservatórios (secção 3.3.1). Na fase final da Figura 4.62 corresponde ao fecho eficaz da válvula 4 cessando o caudal ao fim de $t_{f3} = 38$ s.

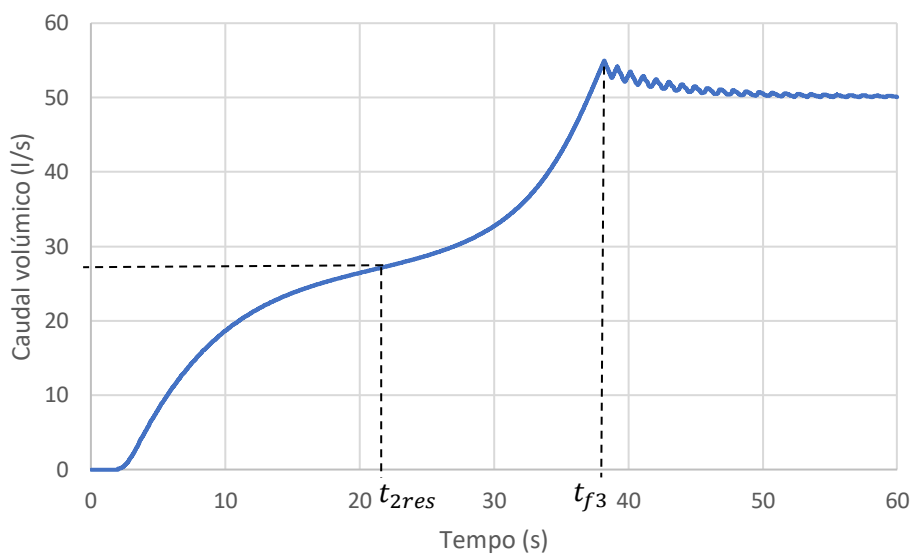


Figura 4.63 - Caudal volúmico, reservatório (D) (cenário FA2)

Na Figura 4.63 observa-se um aumento inicial de caudal no reservatório (D), resultado da abertura da válvula 3. Aos 22 segundos (t_{2res}) o caudal iguala o de regime permanente para o abastecimento simultâneo dos dois reservatórios (secção 3.3.1). A partir deste instante o caudal continua a aumentar derivado à fase final do fecho da válvula 4 (período de maior eficácia deste fecho). Terminado o fecho da válvula 4 (t_{f3}), verificam-se pequenas oscilações no caudal, até este estabilizar em regime permanente para aproximadamente $t = 50$ s. Este valor de 50 l/s coincide com o obtido para o abastecimento exclusivo do reservatório (D) (secção 3.3.3).

Analisadas as evoluções dos caudais nos reservatórios de receção, importa verificar a ocorrência de fenómenos de sobrepressão e cavitação no sistema. Deste modo, representam-se nas Figuras 4.64 e 4.65, as envolventes da cota piezométrica nos troços AC e AD, respetivamente.

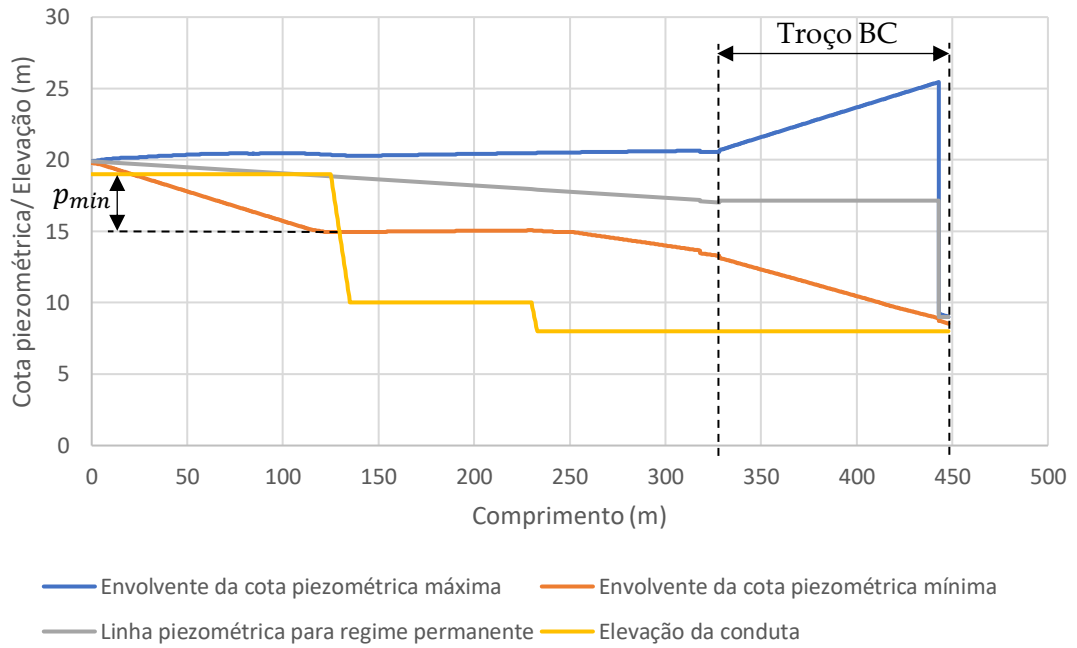


Figura 4.64 - Envoltentes da cota piezométrica, variante trecho AC (cenário FA2)

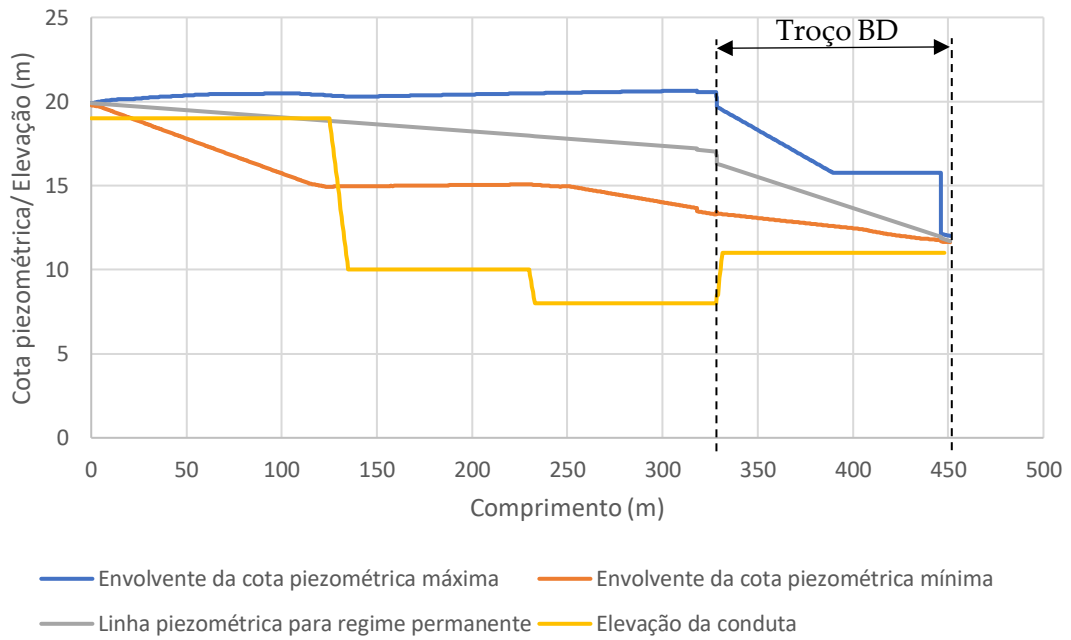


Figura 4.65 - Envoltentes da cota piezométrica, variante trecho AD (cenário FA2)

Por observação das figuras anteriores pode concluir-se que as sobrepressões existentes são pouco significativas.

Para permitir uma melhor visualização da ocorrência do fenómeno de cavitação, representam-se nas Figuras 4.66 e 4.67 as envolventes da pressão absoluta mínima para os troços AC e AD, respetivamente.

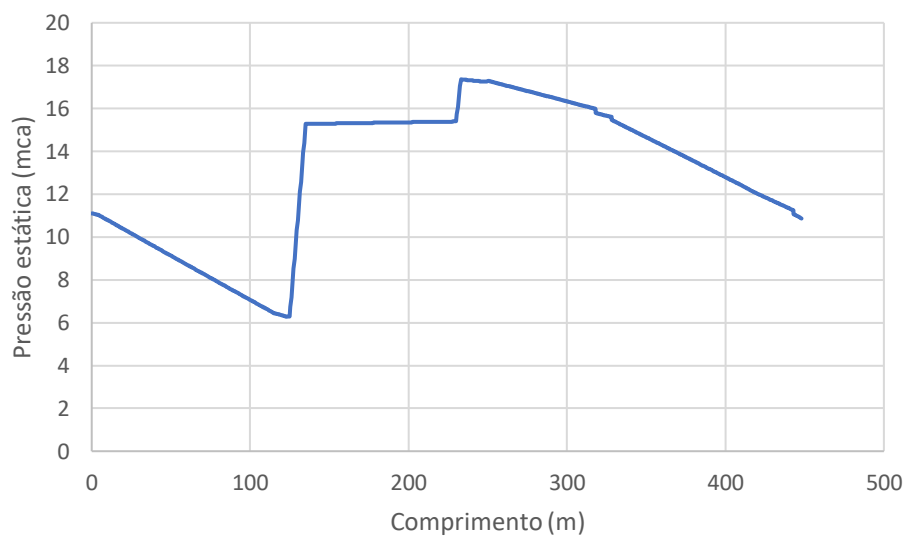


Figura 4.66 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AC (cenário FA2)

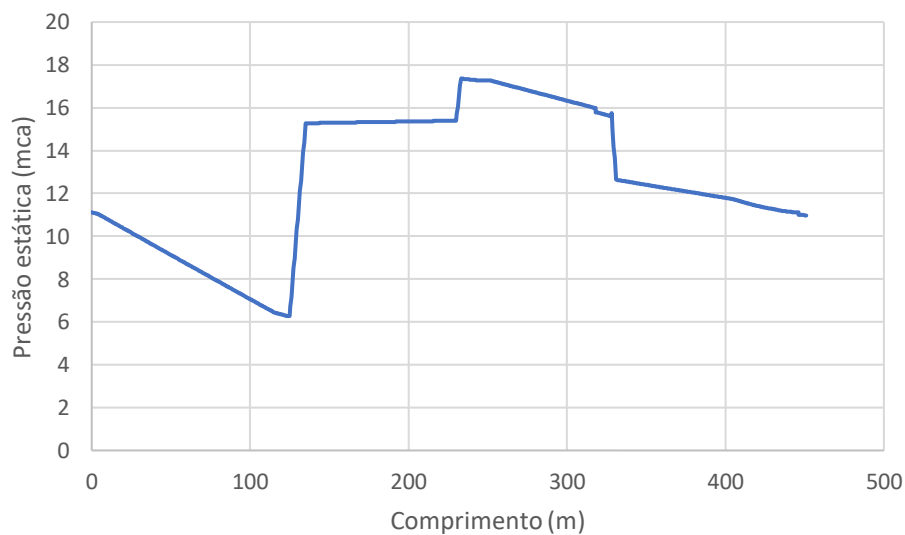


Figura 4.67 - Envolvente da pressão absoluta mínima, variante troço AD (cenário FA2)

Através das figuras anteriores verifica-se que o valor limite da envolvente de pressão absoluta mínima corresponde a 6,3 metros no final da conduta 2. Dado este valor ser superior à tensão de vaporização do fluido à temperatura do escoamento, pode concluir-se que não há perigo de ocorrência de cavitação.

Para os cenários de 'Fornecimento alternado dos reservatórios' pode concluir-se que não existem problemas no que respeita a fenómenos de sobrepressão e cavitação.

Por fim, pode concluir-se que em todos os cenários é garantida a integridade estrutural da instalação e a não ocorrência de cavitação.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como principal objetivo o projeto e dimensionamento de uma instalação adutora de abastecimento para regime permanente e transitório.

Este estudo teve início com uma pesquisa bibliográfica sobre os fenômenos de transitórios hidráulicos, com especial relevância nas equações fundamentais do escoamento em regime permanente e transitório. No que diz respeito ao escoamento em regime transitório, deu-se relevância à discretização das equações fundamentais, nomeadamente ao método das características.

A instalação projetada teve como objetivo o abastecimento de uma vila por ação exclusivamente gravítica. Inicialmente, dimensionou-se a instalação para regime permanente. Posteriormente, dimensionou-se a instalação para regime transitório através de diversas simulações numéricas para os possíveis cenários de funcionamento. Estudaram-se assim três situações típicas: 'Entradas em serviço', 'Saídas de serviço' e 'Fornecimento alternado dos reservatórios'. Estas situações foram realizadas mediante operações de fecho e abertura de válvulas, através da aplicação de leis de fecho e abertura.

Os resultados referentes às 'Entradas em serviço' permitiram verificar que o tempo de abertura da válvula é bastante inferior ao tempo de estabilização no(s) reservatório(s) que se pretende(m) abastecer, o que demonstrou que a inércia da instalação tem maior influência sobre o escoamento do que a lei de abertura.

Relativamente aos resultados das 'Saídas de serviço', apenas o cenário SS2 (correspondente à saída de serviço conjunta dos dois reservatórios por intermédio do fecho da válvula 2 a montante da ramificação) evidenciou perigo de ocorrência de cavitação. Este cenário permitiu verificar que o transitório provocado pelo fecho da válvula de retenção introduz no sistema importantes variações de pressão que proporcionam a ocorrência de cavitação. De forma a limitar as depressões atingidas nas condutas a jusante da válvula de retenção, optou-se por introduzir um RAC, que permitiu atenuar significativamente as envolventes de pressão e proteger as respetivas condutas. Ainda assim, o pequeno troço compreendido entre a válvula de retenção e o RAC fica sujeito a uma depressão elevada, devendo a conduta ser sobredimensionada. Uma vez que só no cenário SS2 se revelou necessária a introdução do RAC, caso não fosse efetuada a operação correspondente, a instalação ficaria adequadamente dimensionada.

Para a situação de 'Fornecimento alternado dos reservatórios' os resultados permitem constatar que não existe ocorrência de sobrepressões ou cavitação.

No que respeita às leis de fecho e abertura, estas revelaram-se satisfatórias, apesar de poderem ser otimizadas, devendo estas ser sempre ajustadas à instalação a estudar, de forma a tornar uma dada lei eficaz na temporização pretendida.

Globalmente, pode-se concluir que a utilização de modelos numéricos permitiu a simulação rápida e precisa dos cenários considerados, o que demonstra a sua grande utilidade no dimensionamento de qualquer sistema hidráulico.

5.2 Trabalhos futuros

Propõem-se para trabalhos futuros a utilização desta metodologia através da introdução de uma bomba, o que permitirá o aumento do caudal pretendido, caso necessário. Sugere-se também a introdução e comparação de outros dispositivos de proteção para a instalação estudada, de forma a tornar o dimensionamento em regime transitório o mais completo possível.

Uma vez ter sido utilizado apenas um modelo de válvula de retenção, considerando o seu fecho para uma velocidade definida de inversão do escoamento, recomenda-se a modelação numérica de outros modelos de válvula de retenção para os cenários estabelecidos.

BIBLIOGRAFIA

- Chaudhry, M. H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto do Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, Pub. L. No. Diário da República: I série B, N.º 194 (1995).
www.dre.pt
- KSB. (2005). Selecting Centrifugal Pumps.
<https://www.ksb.com/blob/52818/2f87b1fd260f81ed17fc6731e173b886/auslegung-en-data.pdf>
- Lencastre, A. (1996). Hidráulica Geral. In *Lisboa, Portugal: Armando Lencastre*.
- Lousa, D. A. D. L. de M. (2011). *Estudo do comportamento dinâmico de um reservatório hidropneumático*. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Santos, A. J. (2017). *Bombas e Instalações Hidráulicas* (Porto: Pub).
- The Engineering ToolBox*. (2003). Water Systems - Maximum Flow Velocities.
https://www.engineeringtoolbox.com/flow-velocity-water-pipes-d_385.html
- Trifunovic, N. (2006). *Introduction to urban water distribution: Unesco-IHE lecture note series*. CRC Press.
- Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1978). *Fluid transients*. McGraw-Hill.
- Wylie, E. B., Streeter, V. L., & Suo, L. (1993). *Fluid transients in systems* (Vol. 1). Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.

