

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

JOÃO MARCELO COSTA BARBOSA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA VÁLVULA ANTECIPADORA DE ONDA
COMO MECANISMO DE ALÍVIO PARA O GOLPE DE ARÍETE**

FORTALEZA

2010

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA VÁLVULA ANTECIPADORA DE ONDA COMO MECANISMO DE ALÍVIO PARA O GOLPE DE ARÍETE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Orientador: Professor Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD.

Fortaleza, 12 de maio de 2010.

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

João Marcelo Costa Barbosa

Dissertação aprovada em 12 de maio de 2010.

Examinadores:

Professor Marco Aurélio Holanda de Castro (Orientador), PhD.
Universidade Federal do Ceará - UFC

Professor John Kenedy de Araújo, Doutor.
Universidade Federal do Ceará - UFC

Professor Antônio Clésio Fontelles Thomaz, Doutor.
Universidade Estadual do Ceará - UECE

*Este trabalho é dedicado à minha esposa **Ely Costa**, de cujo imenso Amor e Paciência me faz muito feliz; e por estar sempre ao meu lado nessa minha caminhada acadêmica.*

AGRADECIMENTOS

Antes de ser uma mera formalidade, considero um privilégio poder agradecer àqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a concretização desta dissertação de mestrado. Portanto, agradeço:

À Deus, em primeiro lugar, e acima de tudo, por me fazer forte diante às dificuldades, e recompensar-me com momentos de glória.

À Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP) pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador, Prof. Marco Aurélio, por todo o apoio em termos de estrutura e orientação; por ter me direcionado e guiado para o aperfeiçoamento deste trabalho; pela sinceridade, companheirismo e tratamento profissional e competente durante todo o curso.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, em especial ao professor Kennedy, por ministrar a disciplina Hidráulica Transiente, de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao professor Osny por ter disponibilizado dados de diversas adutoras, sendo de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

À minha família, aos meus pais por sempre terem me incentivado nos estudos e às minhas irmãs, sempre presentes, sob qualquer forma, em todos os momentos, inclusive neste.

À família da minha esposa, pelo carinho e confiança.

À minha esposa Ely pelo apoio e amor incondicional, sempre, e em todos os momentos.

À minha amiga Viviane Monteiro, por ter demonstrado sua amizade, em momentos que só se pode contar com amigos verdadeiros.

Aos meus amigos João Assêncio Neto, Rafael Teixeira, e Clarissa Melo, por terem caminhado junto comigo por tanto tempo no curso de Graduação em Engenharia Química, e me encorajado ao curso de Mestrado em Recursos Hídricos.

Ao Erivelton que, através de seus conhecimentos em Informática e grande atenção, foi de grande auxílio no desenvolvimento da dissertação.

Aos meus colegas do Grupo de Estudo em Hidráulica Computacional (GEHC):
Marcus Vinícius, Mauro, Magno, Alessandro, Shirley.

À Fernando Peroba e Marcus Vinícius, por suas dissertações e apresentações
servirem como padrão para o meu trabalho.

Poder-se-ia ainda citar muitas pessoas, entretanto, por contingências várias, não
fazem mais parte da minha vida. Mesmo assim, deixo meus sinceros agradecimentos
àqueles que compartilharam comigo alguma coisa com um sim e me ensinaram tanto com
um não.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 - Caso I	2
FIGURA 1. 2 - Caso II	3
FIGURA 1. 3 - Caso III.....	3
FIGURA 1. 4 - Caso IV	4
FIGURA 1. 5 - Variação da pressão (sem atrito)	4
FIGURA 1. 6 – Sistema interrupção do bombeamento (Bomba a montante e reservatório a jusante) ...	5
FIGURA 1. 7 – Interrupção do bombeamento (Caso I)	6
FIGURA 1. 8 – Interrupção do bombeamento (Caso II)	7
FIGURA 1. 9 - Interrupção do bombeamento (Caso III)	7
FIGURA 1. 10 - Interrupção do bombeamento (Caso IV)	8
FIGURA 2. 1 - Tipos de tensão.....	11
FIGURA 2. 2 - Curva de tensão deformação	12
FIGURA 2. 3 - Tensão de tração.....	14
FIGURA 2. 4 - Curva de tensão deformação na zona elástica e plástica	15
FIGURA 2. 5 - Ductilidade do material	16
FIGURA 2. 6 - Representação do módulo de resiliência	17
FIGURA 2. 7 - Cavitação devido ao fechamento de válvulas	18
FIGURA 2. 8 - Contornos de intensidade aparente para a audição humana	22
FIGURA 2. 9 - Pêndulo oscilatório.....	26
FIGURA 2.10 - Vibração da corda	31
FIGURA 2.11 - Análise das forças envolvidas no escoamento transiente.....	35
FIGURA 2.12 - Linhas características	45
FIGURA 2.13 - Reservatório a montante.....	49
FIGURA 2.14 - Reservatório com nível variável.....	51
FIGURA 2.15 - Reservatório de nível constante a jusante	52
FIGURA 2.16 - Extremidade fechada.....	53
FIGURA 2.17 - Válvula à jusante	54
FIGURA 2.18 - Junção.....	57
FIGURA 2.19 - Bomba centrífuga à montante	58
FIGURA 3. 1 - Esquema da válvula antecipadora de onda.....	60
FIGURA 3. 2 - Válvula antecipadora de onda na derivação da linha principal	61
FIGURA 3. 3 - Coeficiente de descarga para válvula de tipo globo	65
FIGURA 3. 4 - Tempos da válvula	67
FIGURA 3. 5 - Zonas do transiente para a VAO	70
FIGURA 3. 6 - Interpolação linear.....	71
FIGURA 3. 7 - Linha temporal da válvula e da simulação	74
FIGURA 3. 8 - Integração numérica	75
FIGURA 4. 1 - Gráfico do volume de água expulsa	79
FIGURA 4. 2 - Gráfico vazão de água na VAO	80
FIGURA 4. 3 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas TS de 60 s.....	81
FIGURA 4. 4 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	83
FIGURA 4. 5 - Gráfico do transiente na bomba	84
FIGURA 4. 6 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda.....	85

FIGURA 4. 7 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	86
FIGURA 4. 8 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas TS de 120 s.....	87
FIGURA 4. 9 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	88
FIGURA 4. 10 - Gráfico do transiente na bomba	89
FIGURA 4. 11 - Gráfico do volume de água expulsa	91
FIGURA 4. 12 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	92
FIGURA 4. 13 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	93
FIGURA 4.14 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	94
FIGURA 4.15 - Gráfico do transiente na bomba	95
FIGURA 4.16 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda	96
FIGURA 4.17 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	97
FIGURA 4.18 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	98
FIGURA 4.19 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	99
FIGURA 4.20 - Gráfico do transiente na bomba	100
FIGURA 4.21 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda.....	101
FIGURA 4.22 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	102
FIGURA 4.23 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	103
FIGURA 4.24 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	104
FIGURA 4.25 - Gráfico do transiente na bomba	105
FIGURA 4.26 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda.....	107
FIGURA 4.27 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	108
FIGURA 4.28 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	109
FIGURA 4.29 - Gráfico do transiente na bomba	110
FIGURA 4.30 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	111
FIGURA 4.31 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda.....	113
FIGURA 4.32 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	114
FIGURA 4.33 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	115
FIGURA 4.34 - Gráfico do transiente na bomba	116
FIGURA 4.35 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	117
FIGURA 4.36 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda.....	119
FIGURA 4.37 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	120
FIGURA 4.38 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	121
FIGURA 4.39 - Gráfico do transiente na bomba	122
FIGURA 4.40 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	123
FIGURA 4.41 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda.....	125
FIGURA 4.42 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda.....	126
FIGURA 4.43 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda.....	127
FIGURA 4.44 - Gráfico do transiente na bomba	128
FIGURA 4.45 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas.....	129
FIGURA 4.46 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”	132
FIGURA 4.47 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”	133
FIGURA 4.48 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”	134
FIGURA 4.49 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”	135
FIGURA 4.50 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”	136
FIGURA 4.51 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”	137

FIGURA 4.52 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”	138
FIGURA 4.53 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”	139
FIGURA 4.54 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”	140
FIGURA 4.55 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”	141
FIGURA 4.56 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”	142
FIGURA 4.57 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”	143
FIGURA 4.58 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”	144
FIGURA 4.59 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”	145
FIGURA 4.60 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”	146
FIGURA 4.61 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”	147
FIGURA 4.62 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”	148
FIGURA 4.63 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”	149
FIGURA 4.64 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”	150
FIGURA 4.65 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”	151
FIGURA 4.66 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”	153
FIGURA 4.67 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”	154
FIGURA 4.68 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”	155
FIGURA 4.69 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”	156
FIGURA 4.70 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “D”	157
FIGURA A. 1 - Características de abertura da válvula	163
FIGURA A. 2 - Coeficientes de descarga em função do percentual de abertura	164
FIGURA A. 3 - Característica de cavitação para vários tipos de válvulas.....	167
FIGURA A. 4 - Silenciador do fabricante NEI	168
FIGURA A. 5 - Válvula do tipo globo	172
FIGURA A. 6 - Modelo de VAO da Bermad.....	173
FIGURA A. 7 - Modelo de VAO da VALLOY	174
FIGURA A. 8 - Representação esquemática da localização da VAO.....	175
FIGURA A. 9 - Representação esquemática da localização da VAO.....	175
FIGURA A. 10 - Componentes básicos da VAO.....	177
FIGURA B. 1 - Assistente de instalação I.....	179
FIGURA B. 2 - Assistente de instalação II	180
FIGURA B. 3 - Assistente de instalação III.....	180
FIGURA B. 4 - Assistente de instalação IV.....	181
FIGURA B. 5 - Assistente de instalação V	181
FIGURA B. 6 - Ícone do aplicativo UFC6.....	182
FIGURA B. 7 - Configurações regionais	182
FIGURA B. 8 - Opções regionais e de idioma.....	182
FIGURA B. 9 - Personalizar opções regionais.....	183
FIGURA B. 10 - Registro sistema UFC (Obter a senha)	183
FIGURA B. 11 – Registro do sistema UFC (Número do usuário).....	184
FIGURA B. 12 - Registro sistema UFC (Senha)	184
FIGURA B. 13 - Envoltórias máximas e mínimas.....	185
FIGURA B. 14 - comprimento e distância horizontal.....	186
FIGURA B. 15 - Ícone do aplicativo UFC6.....	188
FIGURA B. 16 – Projeto em branco	188

FIGURA B. 17 - Menu Arquivo	189
FIGURA B. 18 – Abrir projeto	189
FIGURA B. 19 - Perfil da adutora	190
FIGURA B. 20 - Barra de ferramentas e Menu	190
FIGURA B. 21 - Menu Arquivo> Carregar perfil.....	192
FIGURA B. 22 - Formulário Carregar Perfil	192
FIGURA B. 23 - Entrada manual de dados (Arquivo de Texto).....	193
FIGURA B. 24 - Opção material.....	193
FIGURA B. 25 - Opção ancoragem	193
FIGURA B. 26 - Perfil carregado	194
FIGURA B. 27 - Dados do Nó (Bomba).....	194
FIGURA B. 28 - Dados para a Bomba.....	195
FIGURA B. 29 - Dados do nó (Reservatório de Jusante)	195
FIGURA B. 30 - Barra de ferramentas (botão executar).....	196
FIGURA B. 31 - Formulário cálculo do transitório (Botão OK)	196
FIGURA B. 32 - Formulário Cálculo do Transitório (botão Resultados)	196
FIGURA B. 33 - Perfil Calculado	197
FIGURA B. 34 - Ícone do aplicativo UFC6.....	197
FIGURA B. 35 - Menu Arquivo>Abrir Projeto.....	198
FIGURA B. 36 - Abrir Projeto.....	198
FIGURA B. 37 - Perfil carregado	199
FIGURA B. 38 – Barra de ferramenta (executar cálculo).....	199
FIGURA B. 39 - Formulário Cálculo do Transitório (Botão OK)	199
FIGURA B. 40 - Formulário cálculo do transitório (Botão Resultados)	200
FIGURA B. 41 - Perfil calculado	200
FIGURA B. 42 - Formulário Dados do Trecho.....	201
FIGURA B. 43 - Formulário Dados do Nó.....	203
FIGURA B. 44 - Formulário Bomba	203
FIGURA B. 45 - Formulário Parâmetros do Projeto (Parâmetros do Projeto).....	204
FIGURA B. 46 - Formulário Parâmetros do Projeto (Dados do Projeto)	204
FIGURA B. 47 - Dados do Nó (One-Way).....	205
FIGURA B. 48 - Formulário One-Way.....	205
FIGURA B. 49 - Perfil calculado (One-Way).....	206
FIGURA B. 50 - Formulário Dados do Nó (One-Way, Botão Resultados).....	207
FIGURA B. 51 - Gráfico One-Way (variação do nível de água)	207
FIGURA B. 52 - Dados do Nó (Reservatório Hidropneumático).....	208
FIGURA B. 53 - Formulário Reservatório Hidropneumático	208
FIGURA B. 54 - Perfil calculado (Reservatório Hidropneumático)	209
FIGURA B. 55 - Formulário Dados do Nó (Reservatório Hidropneumático, Botão Resultados)	210
FIGURA B. 56 - Gráfico Reservatório Hidropneumático (volume de ar e água).....	210
FIGURA B. 57 - Dados do Nó (Válvula de Alívio).....	211
FIGURA B. 58 - Formulário Válvula de Alívio	211
FIGURA B. 59 - Perfil calculado (Válvula de Alívio).....	212
FIGURA B. 60 - Formulário Dados do Nó (Válvula de Alívio, Botão Resultados).....	212
FIGURA B. 61 - Gráfico Válvula de Alívio (Vazão)	213

FIGURA B. 62 - Dados do Nó (Chaminé de Equilíbrio).....	213
FIGURA B. 63 - Formulário Chaminé de Equilíbrio.....	214
FIGURA B. 64 - Perfil calculado (Chaminé de Equilíbrio).....	215
FIGURA B. 65 - Formulário Dados do Nó (Chaminé de Equilíbrio, Botão Resultados)	215
FIGURA B. 66 - Gráfico da Chaminé de Equilíbrio (Variação do nível de água)	216
FIGURA B. 67 - Dados do Nó (Ventosa)	217
FIGURA B. 68 - Formulário Ventosa	217
FIGURA B. 69 - Perfil calculado (Ventosa)	218
FIGURA B. 70 - Dados do Nó (Válvula Antecipadora de Onda).....	219
FIGURA B. 71 - Formulário Válvula Antecipadora de Onda.....	219
FIGURA B. 72 - Perfil calculado (Válvula Antecipadora de Onda).....	220
FIGURA B. 73 - Formulário Dados do Nó (VAO, Botão Resultados).....	221
FIGURA B. 74 - Gráfico da Válvula Antecipadora de Onda (volume de água expulsa)	221
FIGURA B. 75 - Menu Arquivo	222
FIGURA B. 76 - formulário Carregar Perfil	222
FIGURA B. 77 - Abrir Projeto.....	223
FIGURA B. 78 - Salvar Projeto	224
FIGURA B. 79 - Salvar Resultados	224
FIGURA B. 80 - Menu Dados	225
FIGURA B. 81- Formulário Parâmetros do Projeto (Parâmetros do Projeto).....	225
FIGURA B. 82 - Formulário Parâmetros do Projeto (Dados do Projeto)	226
FIGURA B. 83 - Formulário Dados do Nó	226
FIGURA B. 84 - Navegação no Nó	227
FIGURA B. 85 - Formulário Dados do Trecho.....	227
FIGURA B. 86 - Navegação nos Trechos	228
FIGURA B. 87 - Menu Visualizar	228
FIGURA B. 88 - Formulário Planilhas (Nó).....	229
FIGURA B. 89 - Formulário Planilhas (trecho).....	229
FIGURA B. 90 - Formulário Envoltórias (Sem mecanismo de proteção)	230
FIGURA B. 91 - Formulário Envoltórias (Com mecanismo de proteção).....	231
FIGURA B. 92 - Abrir Projeto.....	231
FIGURA B. 93 – Arquivo formato *.txt (Envoltórias Máximas e Mínimas)	232
FIGURA B. 94 - Opções de gráfico	233
FIGURA B. 95 - Formulário Resultados por Nó (Carga)	233
FIGURA B. 96 - Formulário Resultados por Nó (Vazão).....	234
FIGURA B. 97 - Salvar relatório (nó).....	234
FIGURA B. 98 – Formulário Resultados por Nó (Dispositivo).....	235
FIGURA B. 99 - Gráfico do Dispositivo de Proteção.....	235
FIGURA B. 100 - Formulário Resultados por Seção (Carga).....	236
FIGURA B. 101 - Formulário Resultados por Seção (Vazão)	237
FIGURA B. 102 - Relatório	237
FIGURA B. 103 – Dispositivo	238
FIGURA B. 104 - Gráfico do Dispositivo de Proteção.....	238
FIGURA B. 105 - Formulário Evolução da Cota Piezométrica.....	239
FIGURA B. 106 - Menu Ajuda.....	240

FIGURA B. 107 – Sobre UFC6	240
FIGURA B. 108 - Menu e Barra de Ferramentas.....	241
FIGURA B. 109 - Formulário Cálculo do Transitório (Botão OK)	241
FIGURA B. 110 - Cálculo do Transitório (Botão Resultados)	241
FIGURA B. 111 - Perfil Calculado (Com Carga Máxima de Resistência).....	242
FIGURA B. 112 - Perfil Calculado (Sem Carga Máxima de Resistência).....	243
FIGURA B. 113 - Perfil Carregado (Visualização Ativada).....	244
FIGURA B. 114 - Perfil Carregado (Visualização Desativada).....	244
FIGURA B. 115 - Entrada Automática de Dados (formato *.txt).....	245
FIGURA B. 116 – Bloco de notas do arquivo de materiais	248
FIGURA B. 117 - Outro material (identificação 0)	250
FIGURA B. 118 - Rugosidade do material	250
FIGURA B. 119 - Módulo de elasticidade.....	251
FIGURA B. 120 - pressão máxima de resistência.....	251
FIGURA B. 121 - Coeficiente de Poisson	251
FIGURA B. 122 - Espessura da tubulação.....	252
FIGURA B. 123 - Tipo de ancoragem	252
FIGURA B. 124 - Perfil carregado	252
FIGURA B. 125 - Perfil calculado.....	253
FIGURA B. 126 - Arquivo auxiliar de entrada.....	254
FIGURA B. 127 - Referência (caso 1).....	255
FIGURA B. 128 - Referência (caso 2).....	255

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Módulo de elasticidade, cisalhamento e Coeficiente de Poisson	13
TABELA 2 - Limite de tempo de exposição para vários níveis de ruído	23
TABELA 3 - Resumo dos dados de entrada do modelo	68
TABELA 4 - Resumo das simulações.....	77
TABELA 5 - Dados do trecho da adutora Sertaneja	78
TABELA 6 - Dados de entrada da VAO.....	79
TABELA 7 - Dados do nó da adutora Sertaneja	82
TABELA 8 - Dados do trecho da adutora Cuiá	90
TABELA 9 - Dados de entrada da VAO.....	90
TABELA 10 - Dados do trecho da simulação A.....	106
TABELA 11 - Dados de entrada da VAO.....	106
TABELA 12 - Dados do trecho da simulação B	112
TABELA 13 - Dados de entrada da VAO.....	112
TABELA 14 - Dados do trecho da simulação C	118
TABELA 15 - Dados de entrada da VAO.....	118
TABELA 16 - Dados do trecho da simulação D.....	124
TABELA 17 - Dados de entrada da VAO.....	125
TABELA 18 - Dados das simulações (análise do DN)	130
TABELA 19 - Dados das simulações (análise do TIAV)	130
TABELA 20 - Dados das simulações (análise do ΔTAV)	130
TABELA 21 - Dados das simulações (análise do $\Delta TPVA$)	131
TABELA 22 - Dados das simulações (análise do ΔTFV)	131
TABELA 23 - Dados das simulações.....	152
TABELA A. 1 - Faixa de vazão recomendada para vários tipos de operação	169
TABELA A. 2 - Principais problemas na operação da VAO	177
TABELA B. 1 - Barra de Ferramentas.....	190
TABELA B. 2 - Tipos de Material.....	201
TABELA B. 3 - Tipos de Ancoragem.....	202
TABELA B. 4 - Dados da Bomba.....	203
TABELA B. 5 - Dados do TAU.....	206
TABELA B. 6 - Dados do Reservatório Hidropneumático.....	209
TABELA B. 7 - Dados da Válvula de Alívio.....	211
TABELA B. 8 - Dados da Chaminé de Equilíbrio.....	214
TABELA B. 9 - Dados da Ventosa	218
TABELA B. 10 - dados da VAO	220
TABELA B. 11 - Descrição do arquivo da entrada de dados	245
TABELA B. 12 - Identificadores do Material da Tubulação	246
TABELA B. 13 - Identificadores do Tipo de Ancoragem	246
TABELA B. 14 - Identificadores do Elemento de Contorno	247
TABELA B. 15 – Diâmetro Nominal de interno	249

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CD	Coeficiente de descarga
Cjus	Cota a jusante
Cmon	Cota a montante
DN	Diâmetro nominal
EDO	Equação diferencial ordinária
PmáxR	Pressão máxima de regulação
PmínR	Pressão mínima de regulação
ΔTAV	Intervalo do tempo de abertura da válvula
TFAV	Tempo final de abertura da válvula
TFFV	Tempo final de fechamento da válvula
$\Delta T F V$	Intervalo do tempo de fechamento da válvula
TIAV	Tempo inicial de abertura da válvula
TIFV	Tempo inicial de fechamento da válvula
$\Delta T P V A$	Intervalo do tempo de permanência da válvula aberta
TS	Tempo de simulação
VA	Válvula de alívio
VAO	Válvula antecipadora de onda

LISTA DE SÍMBOLOS

[F]	Unidade de força	-
[L]	Unidade de comprimento	-
[M]	Unidade de massa	-
[t]	Unidade de tempo	-
[T]	Unidade de temperatura	-
a	Velocidade de propagação das ondas de pressão, celeridade	$[L]/[t]$
A	Área da seção transversal do tubo	$[L]^2$
A_i	Área da seção transversal do tubo <i>i</i>	$[L]^2$
A_v	Área de abertura da válvula	$[L]^2$
A_{VAO}	Área de abertura da válvula antecipadora de onda	$[L]^2$
c	Velocidade do som	$[L]/[t]$
Cd	Coefficiente de descarga para a válvula	adimensional
Cp	Calor específico a pressão constante	$[FL]/[MT]$
Cv	Calor específico a volume constante	$[FL]/[MT]$
D	Diâmetro do tubo	$[L]$
e	Espessura da parede do tubo	$[L]$
E	Módulo de elasticidade do material	$[F]/[L]^2$
f	Coefficiente de atrito da fórmula universal	adimensional
g	Aceleração da gravidade	$[L]/[t]^2$
H	Carga piezométrica	$[L]$
H_p	Carga na junção do tubo	$[L]$
$H_{Pi,j}$	Carga na junção do tubo <i>i</i> no trecho <i>j</i> do mesmo tubo	$[L]$
L	Comprimento da tubulação	$[L]$
m	Massa	$[M]$
P	Pressão absoluta	$[F/L^2]$
Q	Vazão	$[L]^3/[t]$
Q_0	Vazão inicial no estado permanente	$[L]^3/[t]$
Q_p	Vazão na junção do tubo	$[L]^3/[t]$
$Q_{Pi,j}$	Vazão na junção do tubo <i>i</i> no trecho <i>j</i> do mesmo tubo	$[L]^3/[t]$
R	Constante universal dos gases	$[FL]/[M.T]$
t	Tempo	$[t]$
V	Velocidade média de escoamento	$[L]/[t]$
Vol	Volume	$[L]^3$
γ	Peso específico do fluido	$[F]/[L]^3$
ΔH	Variação da carga piezométrica	$[L]$
Δt	Intervalo de tempo computacional	$[t]$
Δx	Comprimento de cada trecho do conduto	$[L]$
ε	Deformação	$[L]$

μ	Coeficiente de Poisson	adimensional
ρ	Massa específica do fluido	$[M]/[L]^3$
σ_A	Tensão axial	$[F]/[L]^2$
σ_R	Tensão radial	$[F]/[L]^2$
τ	Relação entre a área e o Cd para um instante de tempo qualquer	adimensional
ζ	Incremento infinitesimal de tempo	$[t]$
Subscritos		
0	Estado inicial, estado permanente, condição para tempo inicial	
i	Tubo i	
j	Trecho j do tubo, número de pontos	
k	Passo de tempo	
n	Trecho n do tubo, contador	
B	Bomba	
res	Reservatório	

RESUMO

Neste trabalho foram realizadas simulações do transiente hidráulico com válvula antecipadora de onda com abertura e fechamento completo e não instantâneo, como mecanismo de alívio para o golpe de aríete. A válvula deve situar-se próximo ao conjunto motor-bomba. Assim, a válvula antecipadora será aplicada ao segundo nó das adutoras consideradas, utilizando-se para o cálculo o software UFC6, produzido no Grupo de Estudos em Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Ceará. A válvula antecipadora de onda inicia sua abertura quando a pressão mínima de regulação é excedida, logo após a passagem da onda de baixa pressão. O fluido expulso deve ser disposto em um manancial, ou armazenado em um reservatório que comporte todo esse volume. Neste trabalho, a válvula antecipadora de onda é modelada utilizando a água como fluido. O fluido (água) é expulso segundo um modelo de descarga com pressão externa atmosférica. As simulações aqui descritas utilizam o método das características. Devido à falta de estudos nessa área, este trabalho visa contribuir para o dimensionamento de válvulas antecipadora de onda e servir como base para trabalhos subsequentes.

Palavras-Chave: Hidráulica Transiente, mecanismos de alívio do golpe de aríete, válvula antecipadora de onda.

ABSTRACT

In this work was made Hydraulic Transient simulations with anticipation valve with opening and closing complete and non-instantaneous, as a mechanism of relief for water hammer. The valve must be located near the pump. Thus in this work, the valve in advance shall be applied to the second node of the pipelines in question. The software UFC6 was used for estimates the Transient and was produced by the Study Group on Computational Fluid of UFC. Anticipation is a mechanism for relief from water hammer that starts opening when the low pressure of regulation is exceeded, after the passage of the wave of low pressure. The fluid expelled must be placed on a spring or stored in a reservoir in order to accommodate the volume of fluid to be expelled. In this work, the Anticipation Valve is modeling into the water as a fluid. It uses the method of characteristics for simulations. Due to the lack of studies in this area, this research aims to contribute to the design of anticipation valves and a basis for further work.

Keywords: Hydraulic transient, mechanisms of relief of water hammer, anticipation valve.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. GOLPE DE ARIETE (FECHAMENTO INSTANTÂNEO DA VÁLVULA)	2
1.2. GOLPE DE ARIETE (INTERRUPÇÃO DO BOMBEAMENTO)	5
1.3. RESUMO DOS CAPÍTULOS	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. DEFINIÇÕES.....	10
2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	10
2.3. CAVITAÇÃO	17
2.4. VELOCIDADE DO SOM E RUÍDO EM VÁLVULAS	20
2.5. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS	24
2.5.1. Classificação das equações diferenciais	24
2.5.2. Equações diferenciais ordinárias	26
2.5.3. Equações diferenciais parciais e o método da separação das variáveis	30
2.6. ANÁLISE DO ESCOAMENTO TRANSITÓRIO	34
2.6.1. Equação do momento	35
2.6.2. Equação da continuidade.....	37
2.6.3. Simplificações	43
2.7. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	45
2.8. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO	48
2.8.1. Reservatório com nível constante a montante	49
2.8.2. Reservatório com nível variável à montante	50
2.8.3. Reservatório com nível constante à jusante	51
2.8.4. Extremidade fechada	53
2.8.5. Válvula à jusante	54
2.8.6. Orifício	57
2.8.7. Junção	57
2.8.8. Bomba centrífuga à montante	58
3. METODOLOGIA.....	59
3.1. NORMAS.....	59
3.2. FUNCIONAMENTO	59
3.3. MODELAGEM PARA A VÁLVULA ANTECIPADORA DE ONDA	60
3.3.1. Modelo da descarga para a atmosfera	60
3.3.2. Limitações do modelo.....	64
3.4. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS COMO DADO DE ENTRADA PARA O MODELO DA VAO.....	64
3.5. ZONAS DE TRANSIENTE HIDRÁULICO PARA A VAO.....	68
3.6. INTERPOLAÇÃO LINEAR PARA O CÁLCULO DO TAU	71

3.7. DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE LÍQUIDO DESCARREGADO PELA VAO E VELOCIDADE MÁXIMA	74
4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	76
4.1. SIMULAÇÃO ADUTORA SERTANEJA – ANÁLISE DO TS.....	78
4.1.1. Tempo de simulação 60s	79
4.1.2. Tempo de simulação 120s	85
4.2. SIMULAÇÃO CUIÁ – ANÁLISE DO DN	90
4.2.1. Diâmetro da válvula 12 mm (válvula subdimensionada)	91
4.2.2. Diâmetro da válvula 100 mm (dimensionamento correto).....	96
4.2.3. Diâmetro da válvula 200 mm (válvula superdimensionada)	101
4.3. SIMULAÇÃO A – ANÁLISE DO TIAV	106
4.4. SIMULAÇÃO B – ANÁLISE DO ΔT_{FV}	112
4.5. SIMULAÇÃO C	118
4.6. SIMULAÇÃO D	124
4.7. CONDIÇÕES DE CONTORNO DA VAO	130
4.8. COMPARAÇÕES ENTRE A VAO E A VÁLVULA DE ALÍVIO	152
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160
ANEXO A – VÁLVULAS.....	163
ANEXO B – MANUAL DO PROGRAMA UFC6	178

1. INTRODUÇÃO

O advento da informática tornou mais fácil a resolução de equações diferenciais, principalmente ao utilizar métodos de soluções numéricas, no qual o esforço humano para resolver um problema simples seria absurdo. A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) recomenda o método das características, através da NBR-12215/1992, na elaboração de projetos de sistemas hidráulicos.

O método das características, quando aplicado ao golpe de aríete, consiste na transformação das equações diferenciais parciais de onda e momento, em equações diferenciais ordinárias, que podem ser resolvidas por meio de integração numérica.

Com o método das características e por meio de integração numérica, o transiente hidráulico (golpe de aríete), pode ser facilmente resolvido, sendo o esforço computacional determinado pelo intervalo de tempo escolhido para o cálculo.

No escoamento dito transiente, os comportamentos físicos das variáveis em um ponto no espaço variam com o decorrer do tempo. No fenômeno do golpe de aríete, além da variação temporal, temos a variação espacial; portanto, as equações diferenciais de continuidade e momento são funções do tempo e do espaço.

No golpe de aríete em sistemas de distribuição de água e esgoto em condutos fechados, perturbações causadas: Pela abertura ou fechamento de válvulas, por falhas mecânicas em dispositivos de controle, por falha nas turbinas hidráulicas e ligamento e desligamento de bombas, podem ocasionar variações significativas na vazão e pressão em toda tubulação.

Desse modo, durante o processo transiente, pressões relativas positivas e/ou negativas podem, devido à fadiga, acarretar sérios danos às tubulações e aos equipamentos. Portanto, torna-se necessário o uso de atenuadores de transiente, tais como: Volante de inércia, ventosas, válvulas de alívio e chaminé de equilíbrio.

1.1. GOLPE DE ARÍETE (FECHAMENTO INSTANTÂNEO DA VÁLVULA)

No fenômeno do golpe de aríete, a tubulação expande com o aumento da pressão e se contrai com a diminuição dela. Chaudhry (1979) analisa o transiente gerado pelo fechamento brusco de uma válvula (figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4), descrevendo a propagação da onda e o efeito da compressão e expansão da tubulação, e dividindo-o em quatro principais partes como segue:

I. $0 < t \leq L/a$

Com o fechamento instantâneo da válvula, a velocidade é reduzida a zero, causando o aumento da pressão na tubulação e consequentemente a expansão da tubulação (a linha pontilhada refere-se ao diâmetro da condição para o estado estacionário). A onda de pressão se move em direção a menor pressão (reservatório). Seja “a” a velocidade de propagação da perturbação e “L” o comprimento da tubulação, a velocidade de fluido no instante L/a é nula e a carga total é $H_0 + \Delta H$ (figura 1.1 b)

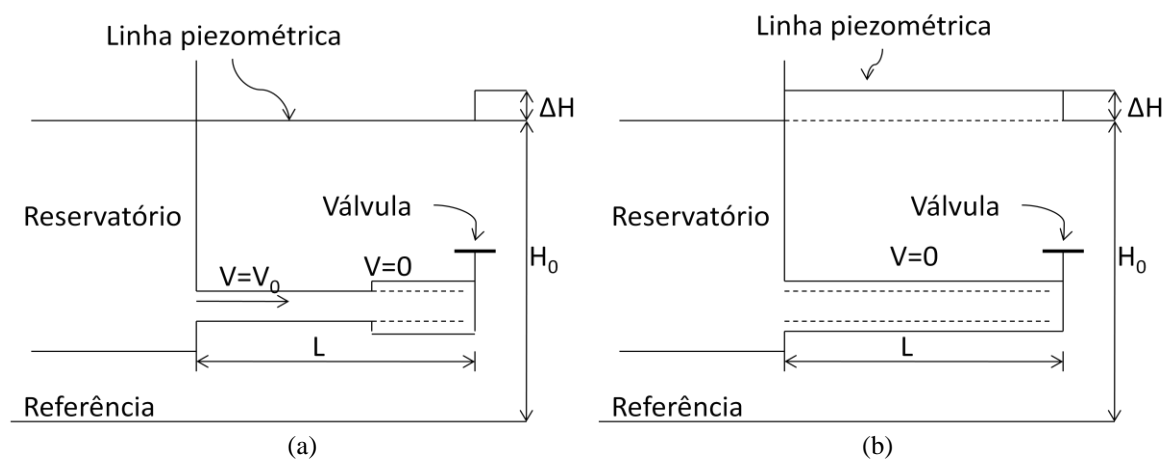


FIGURA 1. 1 - Caso I

Fonte: Chaudhry, 1979

II. $L/a < t \leq 2L/a$

Essa condição é instável, pois a carga piezométrica no reservatório é constane, e devido à diferença de pressão entre a tubulação e o reservatório, o fluido começa a se mover em direção ao reservatório. Até que no tempo $2L/a$, o reservatório, a válvula e a tubulação apresentam a mesma cota piezométrica (figura 1.2 b).

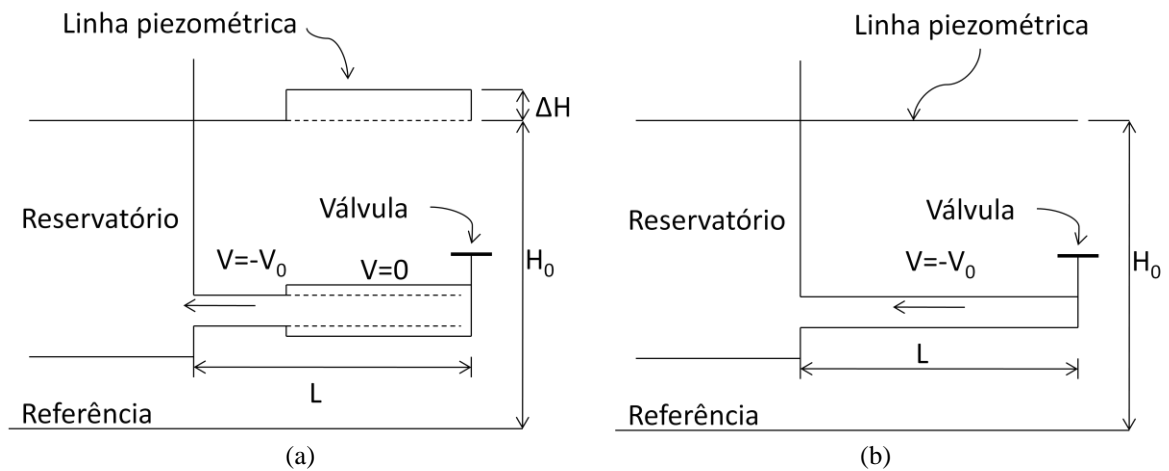


FIGURA 1. 2 - Caso II
Fonte: Chaudhry, 1979

III. $2L/a < t \leq 3L/a$

Com a válvula completamente fechada o fluido se desloca na direção do reservatório, acarretando a diminuição da pressão e contração da tubulação. Com a válvula fechada a velocidade é reduzida para zero. No tempo $3L/a$ a carga na tubulação diminui em toda a tubulação de H_0 para $H_0 - \Delta H$ (figura 1.3 b).

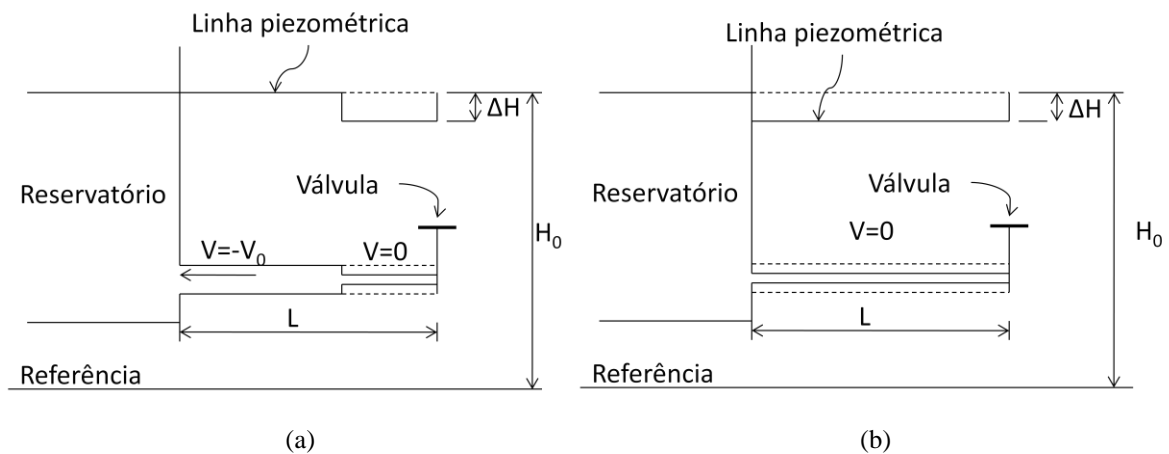


FIGURA 1. 3 - Caso III
Fonte: Chaudhry, 1979

IV. $3L/a < t \leq 4L/a$

Devido às propriedades elásticas da tubulação e a incapacidade de manter a velocidade negativa, o fluido começa a se deslocar na direção da válvula. No tempo $4L/a$ (figura 1.4 b), a

carga em toda a tubulação se iguala a carga do reservatório, e então o ciclo começa a se repetir de I a IV.

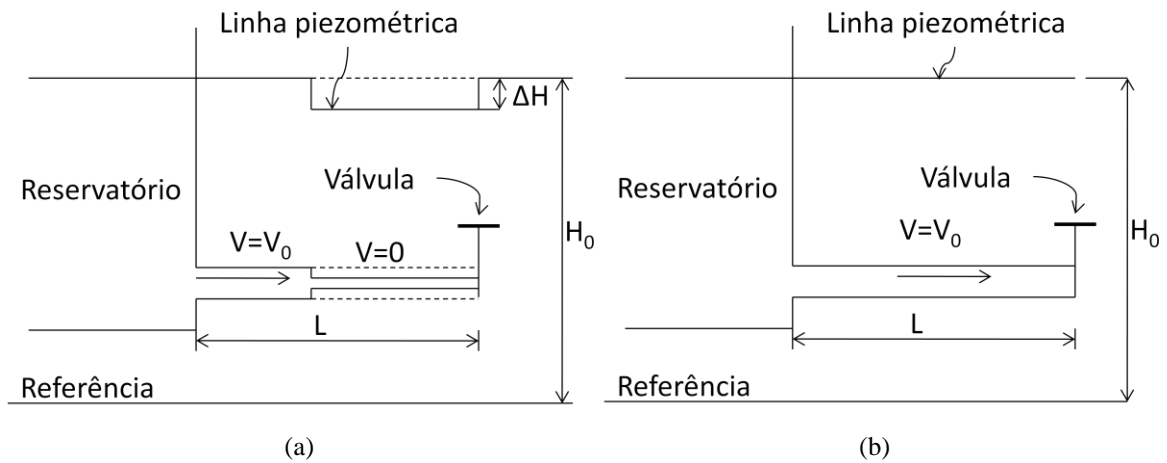


FIGURA 1. 4 - Caso IV

Fonte: Chaudhry, 1979

O gráfico da figura 1.5, ilustra os quatro casos descritos anteriormente, considerando que as perdas são desprezíveis, desse modo, a cada acréscimo de tempo $4L/a$ o gráfico se repete.

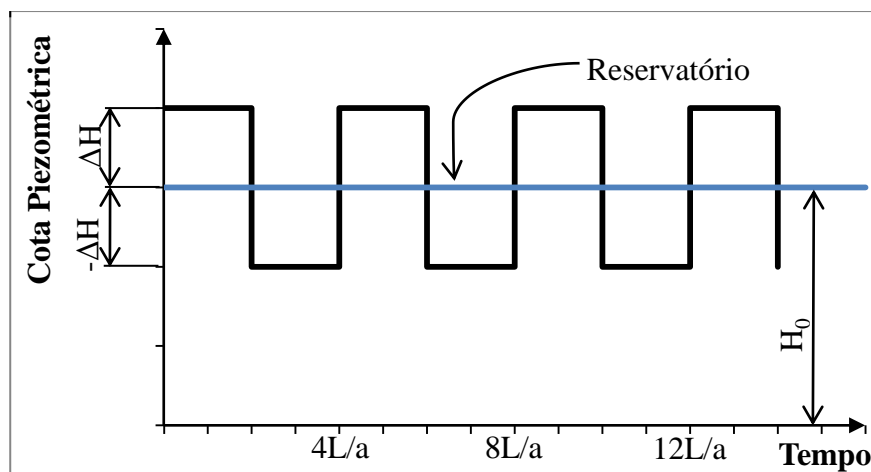


FIGURA 1. 5 - Variação da pressão (sem atrito)

Fonte: Chaudhry, 1979

Esse processo se repete até que o fluido é desacelerado devido ao atrito interno entre o fluido e as paredes internas da tubulação.

1.2. GOLPE DE ARÍETE (INTERRUPÇÃO DO BOMBEAMENTO)

Neste trabalho, será analisado o golpe de aríete decorrente da interrupção do bombeamento em condutos, que é simulado com o programa UFC6 (o anexo B apresenta o manual de utilização deste programa). Onde o sistema considerado será o seguinte: Uma bomba instalada a montante do conduto (no primeiro nó das adutoras consideradas) com um reservatório de nível constante localizado a jusante do conduto (no último nó), conforme indicado na figura 1.6.

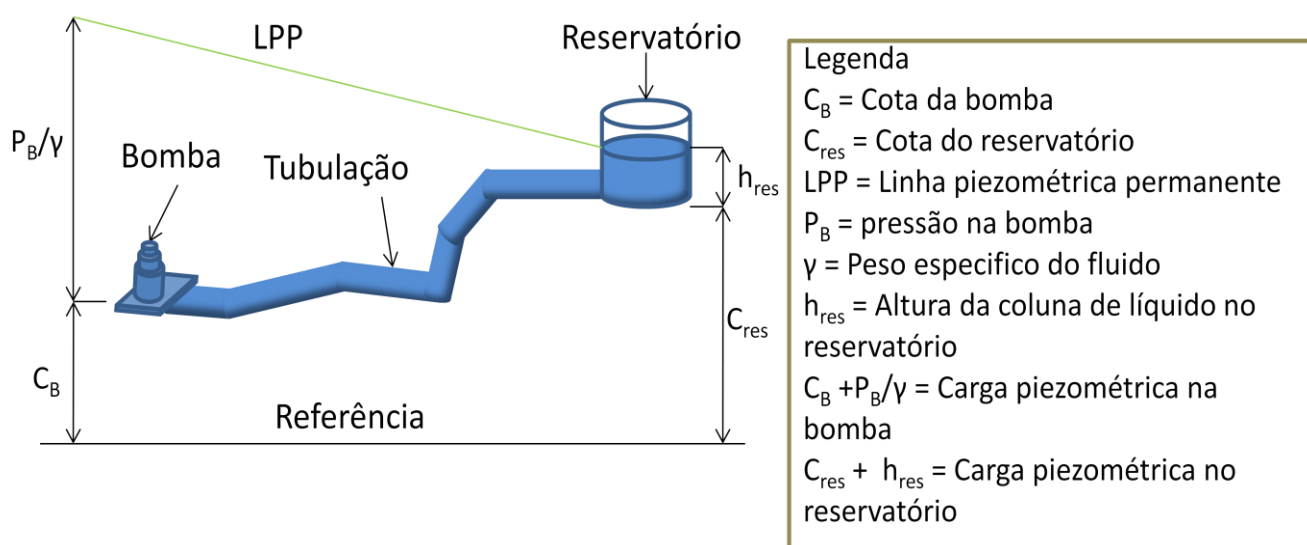


FIGURA 1. 6 – Sistema interrupção do bombeamento (Bomba a montante e reservatório a jusante)

Na interrupção do bombeamento ocorre à redução da vazão, e devido a esse decréscimo da vazão, a quantidade de moléculas no volume de controle considerado é reduzida. Desse modo, a pressão molecular é reduzida e por isso ocorre inicialmente a formação da onda de subpressão.

Para que a tubulação se contraia, a força de pressão externa (força devido à pressão atmosférica) deve ser superior as forças internas (as forças de reação a contração do fluido e da tubulação).

Para que ocorra a expansão da tubulação, a força de pressão interna (força devido à expansão do fluido) deve ser superior a força de pressão externa (força devido a pressão atmosférica) e a força de reação a expansão do fluido.

Fazendo uma analogia com o sistema descrito por Chaudhry (1979) discutido na seção 1.1, o transiente ocasionado devido à interrupção bombeamento será dividido em quatro partes. Nas figuras 1.7, 1.8, 1.9 e 1.10, a linha pontilhada refere-se ao diâmetro da tubulação para a condição de estado permanente (considerando que a interrupção do bombeamento ocorra para $t > 0$, e a condição para o estado permanente é $t = 0$).

I. $0 < t \leq L/a$

Com a interrupção instantânea do bombeamento a tubulação tende a se contrair devido à redução da pressão interna imposta pela redução repentina da vazão. Assim, a tubulação próxima à bomba se contrai. Seja “a” a celeridade e “L” o comprimento da tubulação, no tempo ($t = L/a$) a tubulação toda se contrai (figura 1.7 b).

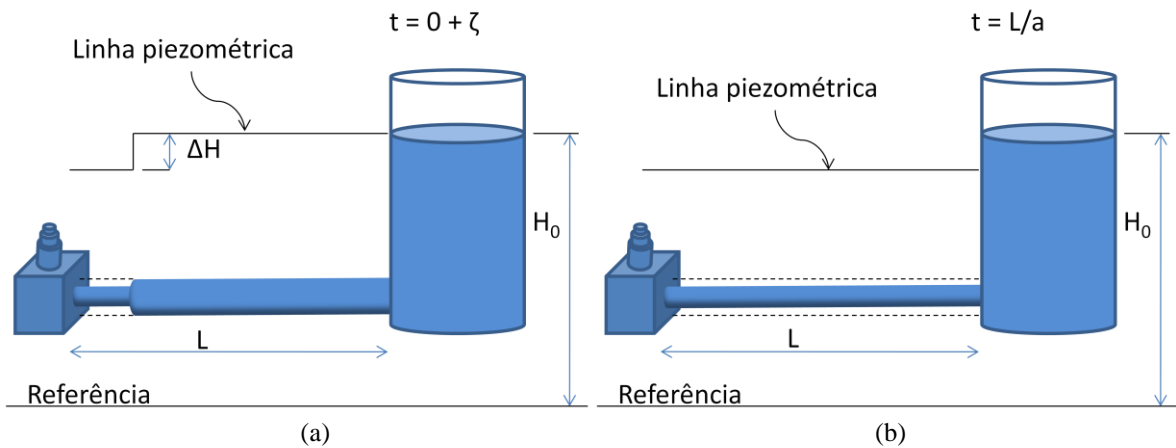


FIGURA 1. 7 – Interrupção do bombeamento (Caso I)

II. $L/a < t \leq 2L/a$

A condição da figura 1.8.a é instável, pois a carga piezométrica no reservatório é constante e superior a carga na tubulação. Por isso, o fluido tende a se deslocar do reservatório em direção bomba, o que acarreta num aumento da vazão e como consequência a pressão interna em toda tubulação aumenta (figura 1.8 b).

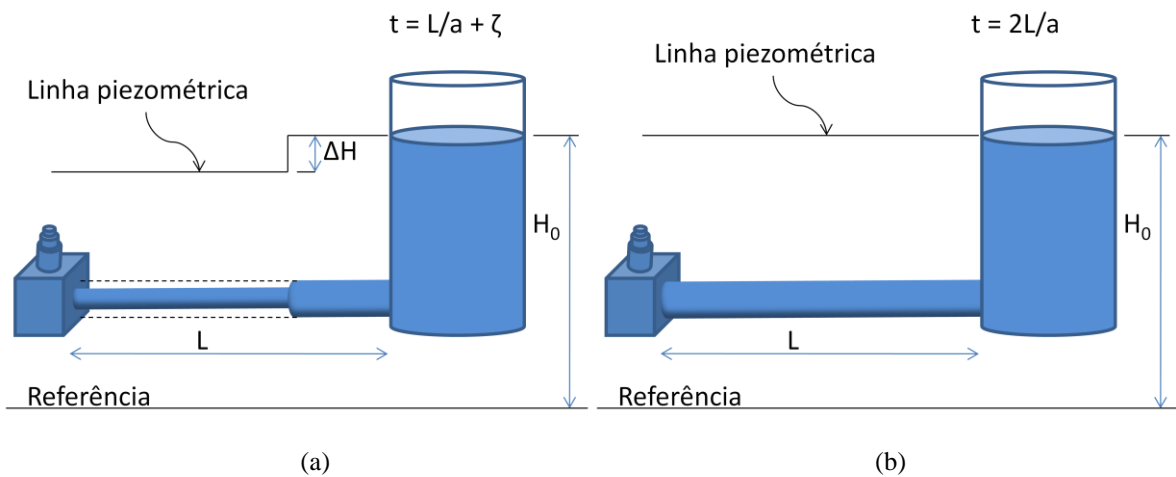


FIGURA 1. 8 – Interrupção do bombeamento (Caso II)

III. $2L/a < t \leq 3L/a$

Devido à condição de vazão nula na bomba, a condição da figura 1.9a é instável, pois a carga piezométrica na bomba é superior a do reservatório, assim o fluido tende a se deslocar da região de maior pressão (bomba) para a de menor pressão (reservatório) acarretando num aumento da pressão e como consequência, a tubulação toda tende a expandir (figura 1.9 b).

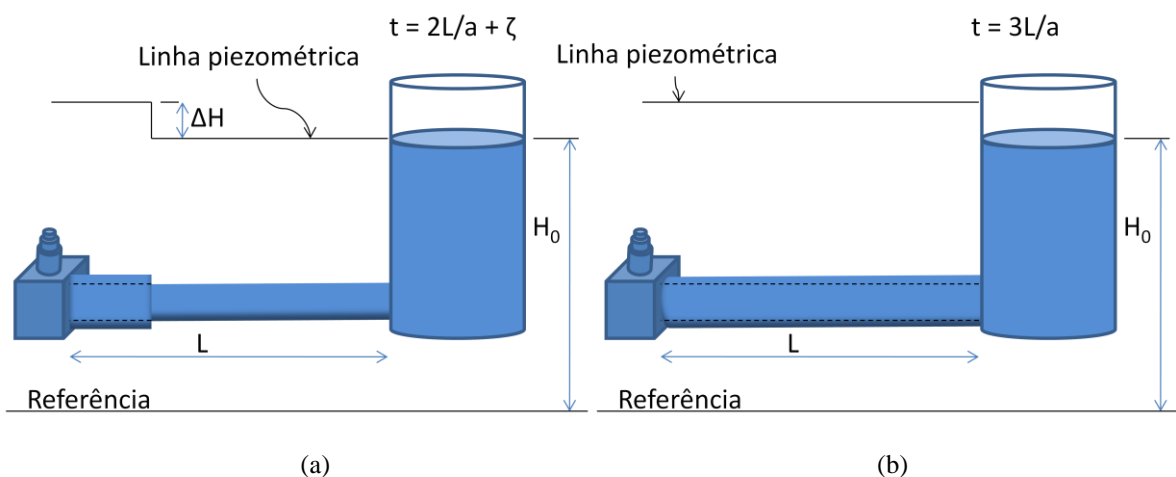


FIGURA 1. 9 - Interrupção do bombeamento (Caso III)

IV. $3L/a < t \leq 4L/a$

A pressão na tubulação é superior a pressão no reservatório, por isso o fluido tende a se deslocar em direção ao reservatório até que no tempo $4L/a$, a pressão se estabiliza em toda a tubulação (figura 1.10 b).

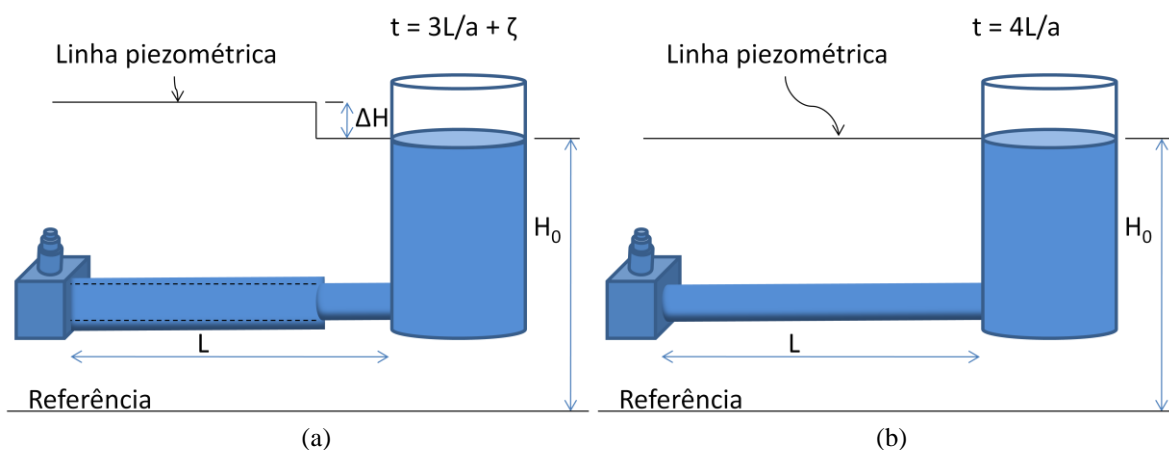


FIGURA 1. 10 - Interrupção do bombeamento (Caso IV)

O processo descrito nas figuras 1.7 até 1.10 se repete, e é amortecido devido ao atrito interno entre a parede da tubulação e o fluido.

Para evitar maiores danos aos condutos, são instalados dispositivos para atenuar o golpe de aríete. Nesse trabalho, tal dispositivo é a válvula antecipadora de onda.

1.3. RESUMO DOS CAPÍTULOS

O objetivo deste trabalho é o de verificar a válvula antecipadora de onda como mecanismo de alívio para o golpe de aríete. Para isso, este trabalho é dividido em: Introdução (capítulo 1), Revisão Bibliográfica (capítulo 2), Metodologia (capítulo 3), Simulações e Resultados (capítulo 4), Conclusão (capítulo 5), Referências Bibliográficas, Anexos A e B.

No capítulo 2 deste trabalho são apresentadas a teoria e equações para o fenômeno do transiente hidráulico, um resumo sobre as propriedades mecânicas dos materiais, uma breve revisão sobre as equações diferenciais parciais e ordinárias, considerações sobre a velocidade

do som e ruído em válvulas, e por fim, um resumo de algumas condições de contorno encontradas em sistemas hidráulicos.

No capítulo 3, é apresentada a modelagem da válvula antecipadora de onda, as suas normas, o seu funcionamento, a análise das variáveis que influenciam no comportamento da válvula antecipadora de onda, as zonas do transiente para a válvula, e por último, as formas de determinação dos parâmetros de saída do modelo.

No capítulo 4, são apresentadas as simulações e comparações para o sistema descrito na seção 1.2 deste trabalho, para o caso sem mecanismo de proteção contra o golpe de aríete e com mecanismo de proteção (válvula antecipadora de onda).

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho e as recomendações para a modelagem correta da válvula antecipadora de onda.

No anexo A, é apresentado uma breve revisão sobre válvulas. Além de apresentar alguns modelos de válvula antecipadora de onda.

No anexo B, é apresentado o manual do programa utilizado para o cálculo do transiente hidráulico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÕES

No estado estacionário as condições tais como: Pressão, temperatura, massa específica e vazão permanecem constantes em um ponto no espaço em relação ao tempo. No estado não estacionário as condições de escoamento são variáveis para a seção considerada.

O fluxo é chamado de uniforme quando sua velocidade é constante em relação à distância. Quando sua velocidade varia com relação à distância, ele é dito não uniforme. Em alguns casos, para simplificação de modelos, essa velocidade é considerada constante para o trecho definido.

No fluxo oscilatório, para um intervalo de tempo considerado, as condições se repetem de forma periódica.

O fluido ainda pode ser compressível ou incompressível. Normalmente, na modelagem de gases, tais como nitrogênio e oxigênio, as massas específicas variam de modo significativo em função da temperatura e pressão, por isso esses gases são modelados como fluidos compressíveis.

Segundo Wiley e Streeter (1978) os termos fluxo transiente e golpe de aríete são utilizados para descrever o estado não estacionário de fluidos em tubulações, ou seja, as propriedades variam com o tempo e espaço.

2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

A tubulação sujeita ao fenômeno transitório sofre com os efeitos da tensão de tração e compressão. Por isso, a elasticidade do material é um fator muito importante na análise do escoamento transiente. Desse modo, torna-se imperativo uma breve revisão das propriedades mecânicas dos materiais.

O material submetido a uma tensão de tração como ilustrado na figura 2.1(a) é submetido a uma força na direção axial, no sentido de dentro para fora \mathbf{F} , de modo que o material se alonga, diminuindo o diâmetro da seção transversal circular A_0 .

Na figura 2.1(b) o material é submetido a uma tensão de compressão, desse modo, o comprimento do material L_0 diminui, e a área de seção transversal do material A_0 aumenta.

O corpo de prova na figura 2.1(c) é submetido a uma força F na direção paralela ao material. Após a aplicação da força, o material se deforma da forma mostrada na figura, esse tipo de tensão é conhecido por cisalhamento.

No caso da figura 2.1(d) o material é submetido a um torque T . O ângulo Φ representa a torção à qual o material foi submetido.

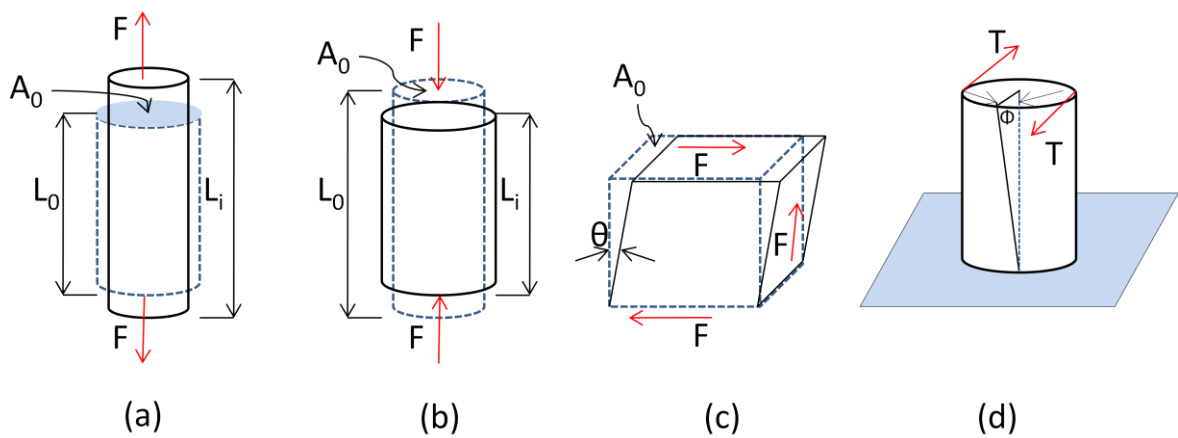


FIGURA 2. 1 - Tipos de tensão

Fonte: Callister, 2007

A tensão é definida como segue:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

A deformação é definida para tensão de tração e compressão da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

Onde:

L_0 é o comprimento original antes da aplicação da força

L_i é o comprimento instantâneo

$\Delta L = L_i - L_0$, ou seja, é a sua deformação ou mudança do comprimento em algum instante.

De acordo com a lei de Hooke, a tensão “ σ ” é proporcional à deformação “ ϵ ” e a constante de proporcionalidade é conhecida como módulo de elasticidade de Young “ E ”, sendo expressa como segue:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.3)$$

A inclinação é a tangente da curva, sendo representada pelo módulo de elasticidade na figura 2.2(a). A curva de tensão deformação para casos reais difere do comportamento mostrado na figura 2.2(a). Portanto, por simplificação, o módulo de elasticidade é a secante entre a origem e um ponto arbitrário identificado por σ_1 na figura 2.2(b).

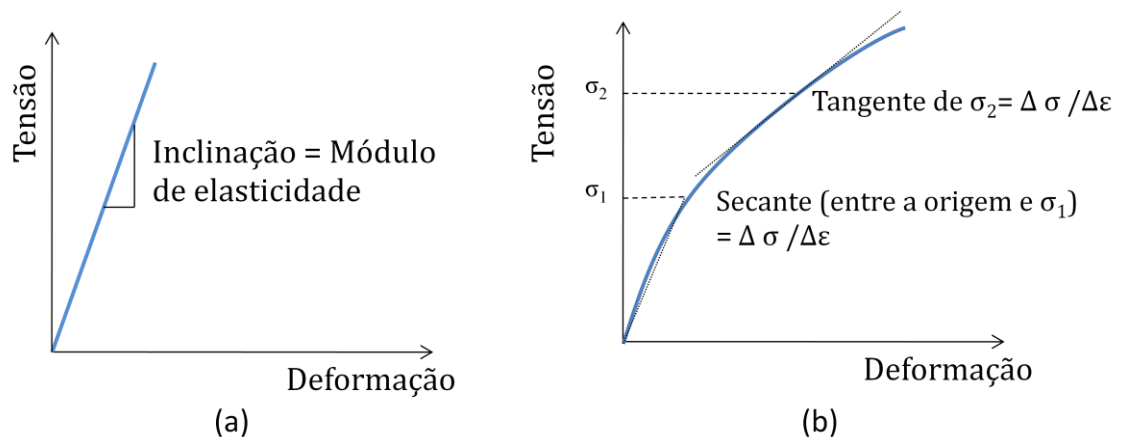


FIGURA 2. 2 - Curva de tensão deformação

Fonte: Callister, 2007

A tabela 1 mostra os dados de módulo de elasticidade e cisalhamento para alguns materiais metálicos e seus respectivos coeficientes de Poisson.

TABELA 1 - Módulo de elasticidade, cisalhamento e Coeficiente de Poisson

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de cisalhamento (GPa)	Coeficiente de Poisson
Alumínio	69	25	0,33
Latão	97	37	0,34
Cobre	110	46	0,34
Magnésio	45	17	0,29
Níquel	207	76	0,31
Aço	207	83	0,30
Titânio	107	45	0,34
Tungstênio	407	160	0,28

Fonte: Callister, 2007

Quando uma tensão de tração é aplicada a uma amostra de metal como mostrado na figura 2.3, um alongamento é acompanhado por uma constrição nas laterais (eixos X e Y), sendo perpendicular à direção de aplicação da tensão (direção Z). Considerando o material isotrópico, o parâmetro conhecido como coeficiente de Poisson é definido como segue:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.4)$$

Para materiais isotrópicos, ou seja, materiais que possuem as mesmas propriedades físicas independente da direção considerada, a elasticidade pode ser relacionada com o coeficiente de Poisson, como segue:

$$E = 2. G. (1 + \mu) \quad (2.5)$$

As relações de deformação de materiais isotrópicos para cada eixo são descritas pelas equações (2.6), (2.7) e (2.8) para os eixos x, y, z respectivamente.

$$-\frac{\varepsilon_x}{2} = \frac{\Delta l_x/2}{l_{0x}} \quad (2.6)$$

$$-\frac{\varepsilon_y}{2} = \frac{\Delta l_y/2}{l_{0y}} \quad (2.7)$$

$$\frac{\varepsilon_z}{2} = \frac{\Delta l_z/2}{l_{0z}} \quad (2.8)$$

Onde:

G é a tensão de cisalhamento

ε_x , ε_y e ε_z são as deformações na direção X, Y e Z respectivamente, sendo representadas na figura 2.3.

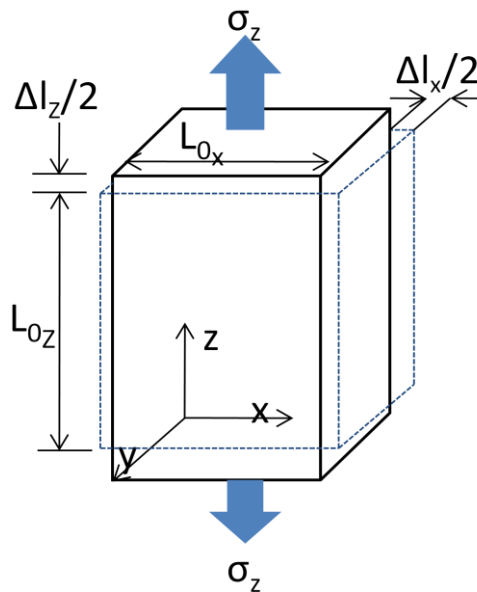


FIGURA 2. 3 - Tensão de tração

Fonte: Callister, 2007

De acordo com a figura 2.4(a), a zona em que o material apresenta deformação constante é conhecida por zona elástica, pois nessa região o material, após ter sido submetido a uma tensão, retorna ao estado de antes da aplicação da tensão, portanto a lei de Hooke é aplicável nessa região.

Na figura 2.4(a) logo após a aplicação de uma tensão superior à do ponto P, é dito que o material se encontra na zona plástica. Após o material ter sido submetido a este tipo de tensão, ele não retorna ao seu estado inicial (antes da aplicação da tensão). Numa perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde quebra das ligações atômicas vizinhas e à reforma dessas ligações com novos átomos ou moléculas.

Para um funcionamento conforme o esperado, os dimensionamentos de tubulações e estruturas normalmente são projetados para a zona elástica. Caso a estrutura seja submetida a uma deformação plástica, o comportamento do material provavelmente não funcionará conforme o previsto.

Na região elástica a lei de Hooke é aplicável até ao ponto P das figuras 2.4(a) e 2.4(b), que separa as regiões elástica e plástica, ou seja, é conhecido como o ponto limite de proporcionalidade. Como mostrado na figura 2.4(b), o ponto Y é o ponto limite do escoamento, e a partir dele as deformações permanentes começam a se tornar significativas. O ponto M é conhecido como o limite de resistência à tração, e é o valor máximo da tensão de tração que o material suporta.

Continuando a aplicação da tensão, a seção transversal do material se reduz até que o ocorra à ruptura do material, esse ponto R é conhecido como limite de ruptura.

Convencionou-se que no ensaio de tensão deformação deve-se traçar uma reta paralela à região elástica, que dista 0,002 da origem, para se determinar o ponto limite de escoamento. O ponto de interseção entre a reta e o gráfico é conhecido como ponto limite do escoamento Y.

Para determinar o ponto limite de ruptura, deve-se iniciar o teste de uma amostra de material com dimensões padronizadas, e, em seguida, o material deve ser submetido a uma força suficiente para causar a ruptura do mesmo. O valor da tensão imediatamente antes da ruptura é a tensão de ruptura do material.

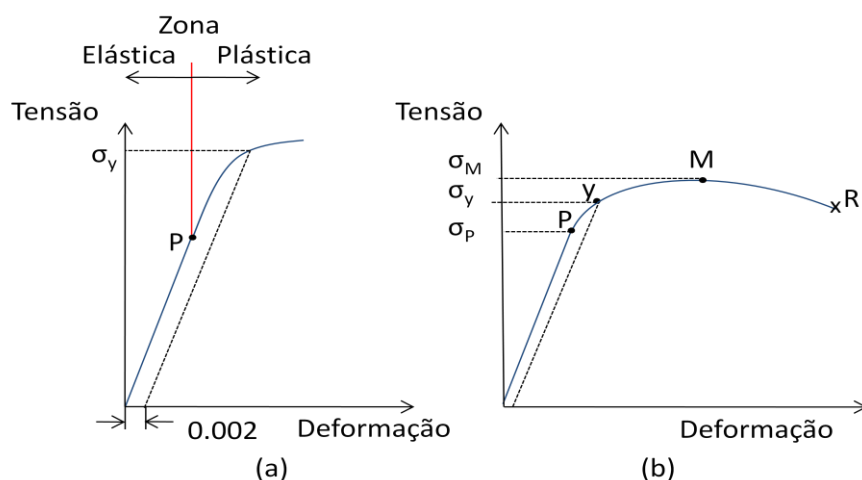


FIGURA 2. 4 - Curva de tensão deformação na zona elástica e plástica

Fonte: Callister, 2007

A ductilidade é a medida do grau de deformação plástica que o material sustenta até a ruptura. Os materiais que apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica são chamados de frágeis. Materiais frágeis tem o comportamento semelhante à região ABC da figura 2.5(a). Materiais dúcteis, tal como o ouro, se deformam com a aplicação da tensão de modo semelhante à região A'B'C' da figura 2.5(b).

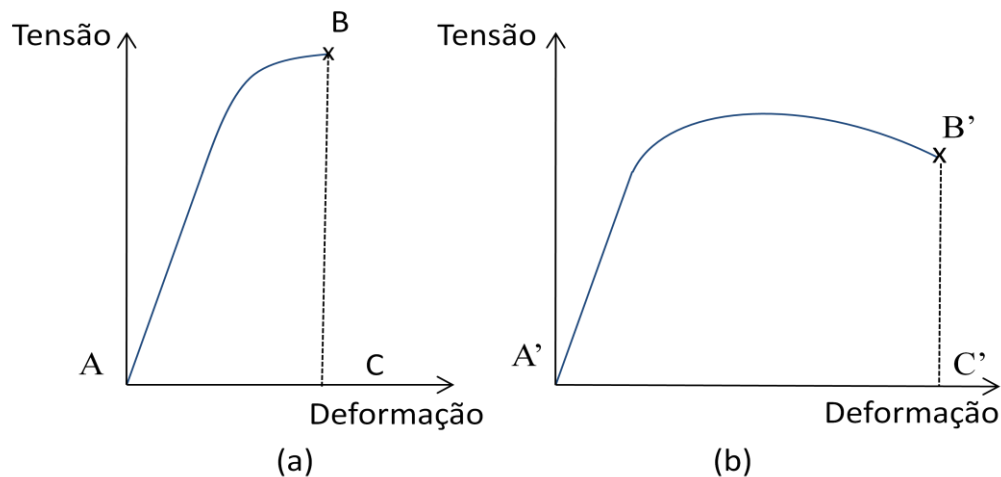


FIGURA 2. 5 - Ductilidade do material

Fonte: Callister, 2007

A ductilidade pode ser expressa de forma quantitativa em relação ao percentual de mudança do comprimento, de acordo com a equação (2.9).

$$\%EL = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) \cdot 100 \quad (2.9)$$

Ou ainda, ser expressa em termos do percentual de redução da área:

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (2.10)$$

Onde:

L_0 é o comprimento inicial do material antes da aplicação da tensão

L_f é o comprimento após a fratura do material

A_0 é a área inicial do material antes da aplicação da tensão

A_f é a área calculada após a fratura, sendo calculada da seguinte forma: os materiais são unidos após a fratura e então se determina a área da seção transversal no local da fratura.

A resiliência é a capacidade que o material tem de absorver energia quando é deformado elasticamente. É expressa em termos do módulo de resiliência segundo a equação (2.11):

$$U = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon \quad (2.11)$$

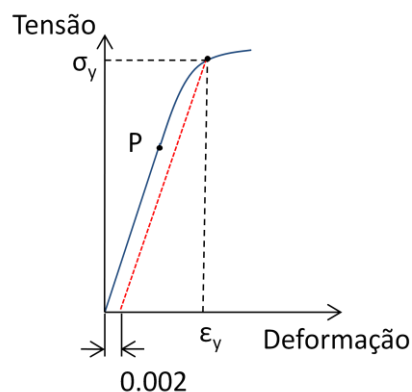


FIGURA 2. 6 - Representação do módulo de resiliência

Fonte: Callister, 2007

2.3. CAVITAÇÃO

A cavitação consiste na rápida vaporização ou condensação do líquido. A cavitação ocorre normalmente quando, a uma temperatura constante, a pressão do líquido se aproxima da pressão de vapor, e então forma-se vapor no fluido. Caso a pressão permaneça por algum tempo muito próximo à pressão de vapor do fluido, a bolha formada aumenta o seu diâmetro, até um diâmetro crítico e continua a aumentar de forma gradativa.

Se a pressão na vizinhança superar a pressão de vapor da bolha, esta se torna instável e colapsa.

Existem dois tipos de cavitação descritos na literatura: a cavitação gasosa e a de vapor.

A cavitação gasosa ocorre quando existe uma quantidade considerável de ar suspenso, e devido a isso, a cavitação é mais lenta.

Se existir uma pequena quantidade de ar na tubulação, a cavitação ocorre preferencialmente na forma de vapor, e o processo de cavitação pode acarretar maiores danos à tubulação e equipamentos do que se prevalecesse a cavitação gasosa.

Segundo J. Paul Tullis (1989) há cinco problemas básicos devido à cavitação: Barulho, vibrações, flutuação da pressão, danos causados pela erosão e perda de eficiência.

Segundo J. Paul Tullis (1989) há três requerimentos fundamentais para que ocorra a cavitação. O primeiro é a formação do núcleo, sendo a presença de bolhas de ar livre a sua fonte para a formação. O segundo exige que a pressão do fluido deva diminuir e aproximar-se da sua pressão de vapor. Já o último requisito exige que a pressão na vizinhança da bolha seja maior do que a pressão no interior da bolha para que ocorra o colapso da mesma.

Pode ocorrer a cavitação quando a pressão em um ponto da tubulação aumenta e diminui de forma brusca em função do tempo, e se os três requisitos forem atendidos.

No caso mostrado na figura 2.7, a cavitação é provocada pelo fechamento brusco da válvula. No instante t_i , a pressão na válvula P_i é maior do que a pressão de vapor do líquido P_{vap} . Nesse instante começa a formação do núcleo. No instante t_j , a pressão na válvula P_j é próxima à pressão de vapor do líquido P_{vap} , e o diâmetro da bolha aumenta, até que no tempo t_k a pressão volta a subir e a bolha colapsa.

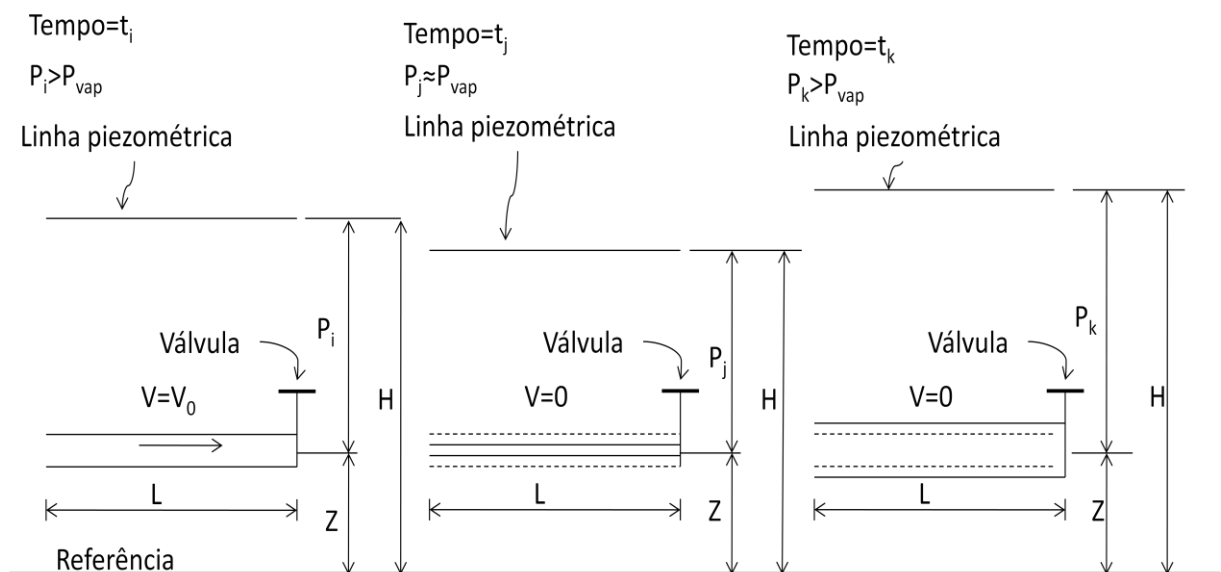


FIGURA 2. 7 - Cavitação devido ao fechamento de válvulas

A solução mais óbvia para evitar danos a equipamentos, ocasionados pela cavitação, consiste na simples retirada do equipamento da zona de cavitação e à modificação para uma zona livre de cavitação. Outra solução consiste no tratamento da superfície submetida à cavitação com material mais resistente à erosão.

A injeção de ar na tubulação pode ser outro meio de controlar a cavitação, pois reduz a velocidade da onda, e reduz ou elimina os danos causados pela erosão. Pode-se também dissipar a energia em estágios, para isso, utilizam-se múltiplas válvulas ou orifícios em série, onde o nível de cavitação pode diminuir em cada estágio.

As equações (2.12) e (2.13) são bastante utilizadas como parâmetros para quantificar a cavitação para válvulas, segundo J. P. Tullis (1986):

$$\sigma = \frac{(P_d - P_{vg})}{\Delta P} \quad (2.12)$$

$$k_c = \frac{\Delta P}{(P_u - P_{vg})} \quad (2.13)$$

Onde:

P_d é a pressão medida a 10 diâmetros à jusante

P_u é a pressão à montante

P_{vg} é a pressão de vapor relativa para o fluido

ΔP é o diferencial de pressão.

As equações podem ser relacionadas de modo mais conveniente dessa forma:

$$k_c = \frac{1}{\sigma + 1} \quad (2.14)$$

De modo a desenvolver relações empíricas para prever os níveis de cavitação, as experiências em laboratórios demonstraram ser muito importantes, por isso recorre-se a experimentos reduzidos para mensurar os níveis de cavitação.

A cavitação causa ruídos, flutuações de pressão e perda de eficiência. Esses parâmetros são detectados com o intuito de determinar os níveis de cavitação. Estes são

medidos por instrumentos eletrônicos tais como: Medidores de níveis sonoros, transdutores de pressão e acelerômetros.

2.4. VELOCIDADE DO SOM E RUÍDO EM VÁLVULAS

Segundo Lipták (1995), o som no contexto de ruído humano é definido como flutuações da pressão gerada no ar ou de outros meios que são capazes de estimular a resposta do ouvido humano e do cérebro. É comum em modelos sonoros, a identificação das seguintes características: Frequência (f), magnitude (p), comprimento da onda (λ) e velocidade (c).

A frequência é expressa em ciclos por segundo (cps) ou Hertz (Hz). A magnitude da pressão sonora é medida em unidades de pressão. O nível de pressão sonora (L_p) é expresso em Decibel (dB), de acordo com a equação (2.15):

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2.15)$$

Onde:

p = pressão sonora atual

p_0 = pressão sonora de referência 2×10^{-5} Pascal.

O cálculo da potência sonora pode ser utilizado como parâmetro para prever os níveis de potência sonora em aplicações envolvendo válvulas, de acordo com a equação (2.16):

$$L_W = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W_a}{W_0} \right) \quad (2.16)$$

Onde:

W_a = potência sonora atual

W_0 = potência sonora de referência 1×10^{-12} Watts.

A velocidade sonora, em qualquer meio, é uma função da massa específica e de propriedades elásticas, e são descritas pelas equações (2.17), (2.18) e (2.19) para sólidos, líquidos e gases respectivamente.

Para Sólidos:

$$c = \sqrt{E_s / \rho_s} \quad (2.17)$$

Para Líquidos:

$$c = \sqrt{E_L / \rho_L} \quad (2.18)$$

Para Gases:

$$c = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_p}{C_v}\right) P_G}{\rho_G}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_p}{C_v}\right) RT}{M}} \quad (2.19)$$

Onde:

$\frac{C_p}{C_v}$ = Coeficiente adiabático (relação entre os calores específicos)

P_G = Pressão do gás

ρ_s, ρ_L, ρ_G = Massa específica do sólido, líquido e gás respectivamente

E_s, E_L, E_G = Módulo de elasticidade do sólido, líquido e gás respectivamente

R = Constante universal para os gases

T = Temperatura absoluta.

O comprimento da onda (λ), a frequência (f) e a velocidade (c) podem ser relacionados pela equação (2.20).

$$c = \lambda f \quad (2.20)$$

De modo simples, o ouvido humano pode ser dividido em três regiões: A orelha externa, a orelha média e a orelha interna, cada qual com sua função única.

A orelha externa consiste no pavilhão auricular, camada exterior do tímpano, onde as ondas de pressão são convertidas em energia mecânica vibrando o tímpano.

O ouvido médio é uma porção interna do tímpano, e externo da cóclea, ambos localizados no ouvido. O ouvido médio contém três ossículos, que amplificam a vibração do tímpano com ondas de pressão no fluido do ouvido interno, e sua função é transferir de modo eficiente à energia sonora do ar para o líquido contido dentro da cóclea.

Um humano adulto jovem e saudável é capaz de perceber o som em uma ampla gama de frequências de aproximadamente 20 a 18000 Hz. Contudo, o ouvido humano não tem a mesma percepção do ruído ao mesmo nível de percepção sonora em todo o espectro de frequência.

Estudos com frequências de tons puros de 1000 Hz resultaram no mapeamento e resposta do ouvido humano. Desse estudo, um som com 1000 Hz e 50 dB soa tão alto quanto um som de 67 dB e 100 Hz, com mostrado no gráfico da figura 2.8.

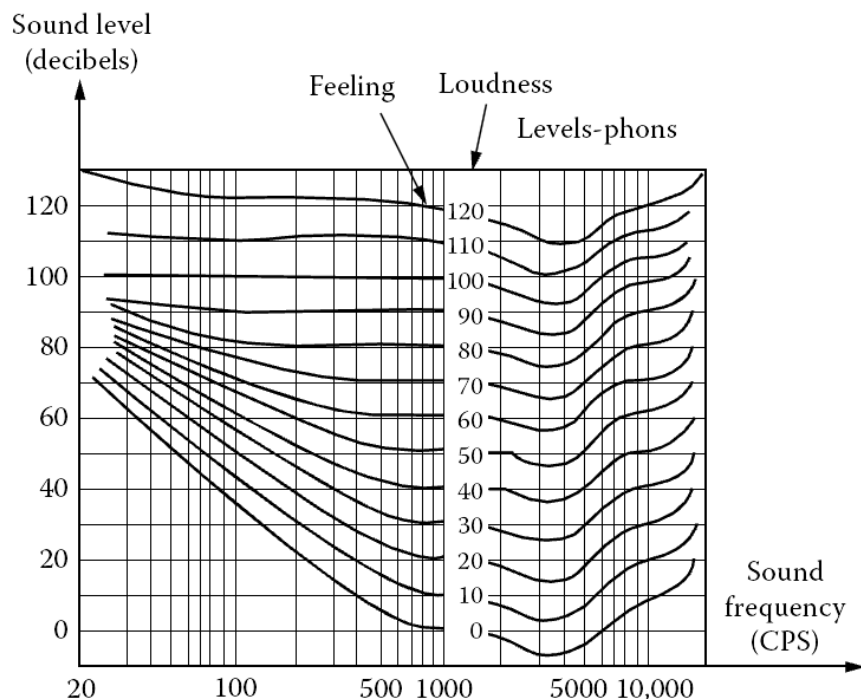


FIGURA 2. 8 - Contornos de intensidade aparente para a audição humana

Fonte: Lipták, 1995

As válvulas são fontes de ruídos que podem chegar a um nível sonoro acima de 100 dBA. O dBA é uma correção ao nível de pressão do som, que é considerada como uma aproximação a resposta do ouvido a níveis normais de ruído. Onde “A” refere-se um tipo de filtro de ponderação, que leva em conta a não linearidade da reação auditiva humana a níveis diferentes de ruído.

A tabela 2 expõe o tempo limite de exposição para diversos níveis ruído.

TABELA 2 - Limite de tempo de exposição para vários níveis de ruído

Horas por dia	dBA
8	90
4	95
2	100
1	105
1/2	110
1/4	115 (máximo)

Fonte: Lipták, 1995

Segundo Lipták (1995), existem cinco principais fontes de ruído em válvulas, que são as seguintes:

1) Vibração mecânica

Vibrações mecânicas nas partes internas das válvulas são causadas pelo fluxo instável e pela turbulência em válvulas. Os ruídos normalmente são baixos, e muito abaixo de 90 dBA. Uma das soluções seria o melhoramento do desenho das válvulas e melhorias no projeto para incluir pequenas mudanças no trajeto do fluido.

2) Instabilidade de elementos de controle

A instabilidade de elementos de controle se deve normalmente a fluxos turbulentos incidentes em válvulas. A correção requer a mudança das características do amortecimento da válvula e do atuador.

3) Vibração ressonante

A vibração ressonante é caracterizada por um tom discreto e possivelmente a poucos múltiplos harmônicos. Os níveis de ruídos calculados podem estar no intervalo de 90 a 125 dBA.

A solução para esse tipo de ruído pode se dar através da mudança do desenho da válvula em relação ao caminho do fluxo para modificar as características de turbulência.

4) Ruído hidrodinâmico

O ruído hidrodinâmico é geralmente menos severo do que o ruído aerodinâmico, se tornando mais severo quando acompanhado de cavitação, que pode produzir ruídos na ordem de 90 a 100 dBA ou superiores.

No caso de ruídos ocasionados devido à cavitação, a solução mais óbvia seria a retirada da válvula da zona de cavitação para uma zona livre de cavitação.

5) Ruído aerodinâmico

Em projetos de válvulas de controle, os ruídos aerodinâmicos podem gerar níveis sonoros de 120 dBA ou superiores, sendo dentre os cinco, o que causa ruídos mais severos.

2.5. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

2.5.1. Classificação das equações diferenciais

Uma das principais classificações das equações diferenciais é baseada na variável independente da função resultante da solução da equação diferencial. Caso a função definida por F na equação diferencial, seja representada por apenas uma variável, então a equação diferencial é conhecida por equação diferencial ordinária. Caso F seja representado por duas ou mais variáveis, é conhecida por equação diferencial parcial. As equações (2.21), (2.22), (2.23) e (2.24) são alguns exemplos de equações diferenciais.

Exemplo de equações diferenciais ordinárias:

$$A(x) \frac{d^2 F(x)}{dx^2} + B(x) \frac{dF(x)}{dx} + C(x)F(x) = G(x) \quad (2.21)$$

$$L \frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + R \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{C} Q(t) = E(t) \quad (2.22)$$

Exemplo de equações diferenciais parciais:

$$A(x, t) \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} = B(x, t) \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

$$a \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

Contudo, essa classificação não é suficiente para uma boa identificação das equações diferenciais, por exemplo, quando lidamos com um conjunto de equações diferenciais, o número de funções desconhecidas determina o número de equações diferenciais. Considere as equações a seguir:

$$\frac{dx}{dt} = ax - axy \quad (2.25)$$

$$\frac{dy}{dt} = -cy + \gamma xy \quad (2.26)$$

A solução das funções $x(t)$ e $y(t)$ podem ser determinadas mediante a resolução do conjunto de equações diferenciais (2.25) e (2.26).

As equações podem ser classificadas quanto à sua ordem. A ordem da maior derivada determina a ordem da equação diferencial. De forma mais geral:

$$F[t, u(t), u'(t), \dots, u^n(t)] = 0 \quad (2.27)$$

Onde n é a maior ordem da equação diferencial.

Outra definição muito importante, diz respeito à linearidade e não linearidade das equações diferenciais. Equações diferenciais são ditas lineares quando a equação diferencial é uma função linear, como segue:

$$A_0(t)u^n(t) + A_1(t)u^{n-1}(t) + \dots + A_n(t)u(t) = 0 \quad (2.28)$$

$$A_0(t)u^n(t) + A_1(t)u^{n-1}(t) + \dots + A_n(t)u(t) = G(t) \quad (2.29)$$

As variáveis que multiplicam o termo diferencial da equação (2.29) devem ser função apenas da variável independente, para que a equação seja linear.

A análise do comportamento oscilatório do pêndulo pode ser descrito por uma equação diferencial ordinária não linear.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{g}{L} \sin(\theta) = 0 \quad (2.30)$$

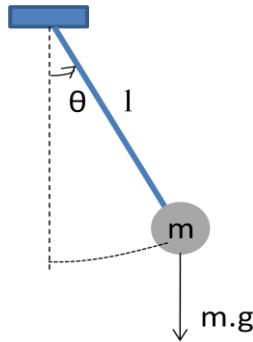


FIGURA 2. 9 - Pêndulo oscilatório

Fonte: Boyce e Diprima, 2001

De modo análogo, a mesma definição de linearidade e não linearidade pode ser estendida para equações diferenciais parciais.

2.5.2. Equações diferenciais ordinárias

1) Soluções de equações diferenciais ordinárias lineares de primeira ordem

O método utilizado para resolver a equação genérica (2.31) a seguir, pode ser demonstrado como segue:

$$\frac{dy}{dt} + P(t)y = G(t) \quad (2.31)$$

Onde:

P e G são funções da variável independente t.

Multiplicando a equação diferencial (2.31) pela função $\mu(t)$:

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} + \mu(t)P(t)y = \mu(t)G(t) \quad (2.32)$$

O diferencial de $[y \cdot \mu(t)]$, em relação ao tempo t, é descrito pela equação (2.33)

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} + y \frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [y \cdot \mu(t)] \quad (2.33)$$

Igualando o primeiro membro do lado esquerdo das equações (2.32) e (2.33), obtemos o seguinte:

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} = \mu(t) \frac{dy}{dt} \quad (2.34)$$

Igualando o segundo membro do lado esquerdo das equações (2.32) e (2.33), temos:

$$y \frac{d\mu(t)}{dt} = \mu(t) P(t) y \quad (2.35)$$

E por fim, iguala-se o primeiro membro do lado direito das equações (2.32) e (2.33), e desse modo, obtemos:

$$\frac{d}{dt} [y \cdot \mu(t)] = \mu(t) G(t) \quad (2.36)$$

Eliminando y da equação (2.35), conseguimos:

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \mu(t) P(t) \quad (2.37)$$

Separando as variáveis da equação (2.37) e integrando:

$$\int \frac{d\mu(t)}{\mu(t)} = \int P(t) dt + C_1 \quad (2.38)$$

$$\ln[\mu(t)] = \int P(t) dt + C_1 \quad (2.39)$$

A equação (2.40) é a resolução da equação diferencial (2.37), desse modo, a função μ é relacionada com a função $P(t)$.

$$\mu(t) = e^{\int P(t) dt + C_1} \quad (2.40)$$

A equação (2.40) pode ser reorganizada como mostrado na equação (2.41).

$$\mu(t) = e^{\int P(t) dt + C_1} = e^{C_1} e^{\int P(t) dt} \quad (2.41)$$

Para resolver a equação (2.36), façamos a seguinte substituição: $w = y\mu$

$$\frac{d}{dt}w = \mu(t)G(t) \quad (2.42)$$

Integrando a equação obtemos:

$$\int dw = \int \mu(t)G(t)dt + C_2 \quad (2.43)$$

A equação (2.44) é a resolução da equação diferencial (2.42).

$$y = \frac{\int \mu(t)G(t)dt}{\mu(t)} + \frac{C_2}{\mu(t)} \quad (2.44)$$

Substituindo μ na equação:

$$y = \frac{\int e^{C_1} e^{\int P(t)dt} G(t)dt}{e^{C_1} e^{\int P(t)dt}} + \frac{C_2}{e^{C_1} e^{\int P(t)dt}} \quad (2.45)$$

Agrupando as constantes da equação (2.45), temos:

$$C = \frac{C_2}{e^{C_1}} \quad (2.46)$$

Onde:

C_1, C_2, C = constantes arbitrárias

Substituindo a equação (2.46) na equação (2.45), obtemos a solução geral para a equação diferencial de primeira ordem (2.31).

$$y = \frac{\int e^{\int P(t)dt} G(t)dt}{e^{\int P(t)dt}} + \frac{C}{e^{\int P(t)dt}} \quad (2.47)$$

2) Soluções de EDO's lineares com coeficientes constantes

Considere a seguinte equação diferencial:

$$A_0 y^n + A_1 y^{n-1} + \dots + A_n y = 0 \quad (2.48)$$

Considerando os coeficientes constantes, a solução da equação diferencial homogênea (2.48) pode ser determinada para o caso de “n” condições iniciais e de contorno, e aplicando o princípio da superposição de soluções, a solução da equação é:

$$Y = c_1 y_1 + c_2 y_2 + \dots + c_n y_n \quad (2.49)$$

Considerando que o lado direito da equação (2.48) seja diferente de zero, ou seja, que a equação é não homogênea:

$$A_0 y^n + A_1 y^{n-1} + \dots + A_n y = G(t) \quad (2.50)$$

Pelo princípio da superposição, a solução da equação diferencial (2.50) pode ser determinada pela seguinte relação:

$$Y = Y_H + Y_p \quad (2.51)$$

A relação (2.51) é resultado do princípio da superposição das soluções das equações diferenciais homogênea e não homogênea (2.48) e (2.50).

Para uma equação diferencial ordinária linear de ordem n , a solução geral da equação (2.50), pode ser expressa da seguinte forma:

$$Y = c_1 y_1 + c_2 y_2 + \dots + c_n y_n + Y_p \quad (2.52)$$

Onde:

Y = solução geral da equação diferencial

Y_H = solução da equação homogênea

Y_p = solução da equação particular

c_1, c_1, \dots, c_n = Constantes da solução da equação diferencial (2.48).

3) Soluções em séries de EDO's lineares de segunda ordem

Considere a EDO linear (2.53).

$$A_0(x)y'' + A_1(x)y' + A_2(x)y = 0 \quad (2.53)$$

Considerando que $Y(x)$ seja uma solução para a equação diferencial na forma de uma série de Fourier e também uma função convergente. Para a equação diferencial (2.53), temos a seguinte solução em série:

$$Y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n \quad (2.54)$$

A equação (2.55) é solução da equação diferencial (2.53). Considerando a série centrada para x_0 nulo, obtemos:

$$Y(x) = a_0 + a_1 x^1 + \dots + a_n x^n + \dots \quad (2.55)$$

Desde que a equação (2.55) seja convergente, esta é solução da equação diferencial (2.53).

4) Método de Euler para solução numérica de EDO's

Considerando a seguinte EDO de primeira ordem (2.56) e sua condição de contorno (2.57), pode-se determinar a solução de forma numérica como segue:

$$\frac{dy}{dt} = G(t, y) \quad (2.56)$$

Sujeita à condição inicial:

$$y(t_0) = y_0 \quad (2.57)$$

Separando as variáveis da equação diferencial (2.56) e integrando obtém-se:

$$y_{n+1} = y_n + G(t_n, y_n)(t_{n+1} - t_n), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.58)$$

O valor de y pode ser determinado escolhendo o passo de tempo, ou seja, a diferença $(t_{n+1} - t_n)$ e a cada passo de tempo o valor de y é computado.

2.5.3. Equações diferenciais parciais e o método da separação das variáveis

Considere a equação diferencial parcial de segunda ordem:

$$a \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2.59)$$

Equação (2.59) é conhecida como equação unidimensional da onda, e pode ser resolvida pelo método da separação de variáveis, com as seguintes condições de contorno:

$$V(0, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (2.60)$$

$$V(L, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (2.61)$$

$$V(x, 0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial V(x, 0)}{\partial t} = g(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.63)$$

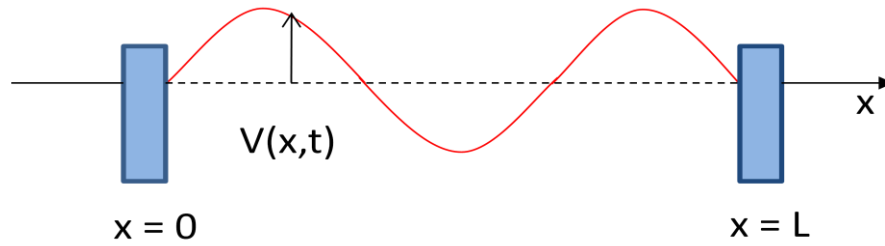


FIGURA 2.10 - Vibração da corda

Fonte: Boyce e DiPrima, 2001

A solução da equação pode ser obtida em termos da seguinte equação:

$$V = X(x) \cdot T(t) \quad (2.64)$$

Diferenciando a equação (2.64) duas vezes em relação à x e depois em relação a t , obtêm-se respectivamente as equações (2.65) e (2.66).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = X''(x) \cdot T(t) \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = X(x) \cdot T''(t) \quad (2.66)$$

Substituindo as equações (2.65) e (2.66) na equação diferencial parcial (2.59) temos:

$$a^2[X''(x) \cdot T(t)] = X(x) \cdot T''(t) \quad (2.67)$$

A equação (2.67) pode ser agrupada de modo que as funções relacionadas à variável t estão do lado esquerdo da equação, e as relacionadas com a variável x estão do lado direito da equação. Para que haja uma igualdade é necessário que os dois lados da equação sejam iguais a uma constante chamada de k .

$$\frac{T''(t)}{a^2 T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = k \quad (2.68)$$

A equação (2.68) pode ser dividida em duas equações diferenciais ordinárias de segunda ordem e com quatro condições de contorno para a equação diferencial (2.59):

$$X''(x) - kX(x) = 0 \quad (2.69)$$

$$T''(t) - ka^2 T(t) = 0 \quad (2.70)$$

Considerando a constante k um número real, existem três possibilidades de soluções, que são as seguintes:

$$\text{Caso I: } k = 0 \quad (2.71)$$

$$\text{Caso II: } k > 0 \quad (2.72)$$

$$\text{Caso III: } k < 0 \quad (2.73)$$

I. Solução para $k = 0$

Quando k é nulo, as equações (2.69) e (2.70) reduzem-se às equações (2.74) e (2.75).

$$X''(x) = 0 \quad (2.74)$$

$$T''(t) = 0 \quad (2.75)$$

A solução das equações diferenciais (2.74) e (2.75) são respectivamente:

$$X(x) = Ax + B \quad (2.76)$$

$$T(t) = Ct + D \quad (2.77)$$

Aplicando a condição de contorno (2.60) na equação (2.76), obtemos:

$$X(x) = 0 \quad (2.78)$$

Para que satisfaça a condição de contorno (2.60), X é nulo, logo a solução $V=X.T$ é nula. Para a suposição de $k=0$, a solução é trivial e devem-se verificar os casos II e III.

II. Solução para $k > 0$

Com o intuito de obter valores de k positivos e reais, k é definido como segue:

$$k = \lambda^2 \quad (2.79)$$

Substituindo nas equações (2.69) e (2.70), obtemos respectivamente:

$$X''(x) - \lambda^2 X(x) = 0 \quad (2.80)$$

$$T''(t) - \lambda^2 a^2 T(t) = 0 \quad (2.81)$$

A solução das equações diferenciais (2.80) e (2.81) são respectivamente:

$$X(x) = A. e^{\lambda x} + B. e^{-\lambda x} \quad (2.82)$$

$$T(t) = C. e^{\lambda a t} + D. e^{-\lambda a t} \quad (2.83)$$

Resolvendo a equação (2.82), com as condições de contorno (2.60) e (2.61) obtemos:

$$X(x) = 0 \quad (2.84)$$

Então a solução $V=X.Y$ é nula (solução trivial), não sendo importante para a resolução da equação diferencial da onda.

III. Solução para $k < 0$

$$k = -\lambda^2 \quad (2.85)$$

Substituindo o valor de k nas equações (2.69) e (2.70), temos:

$$X''(x) + \lambda^2 X(x) = 0 \quad (2.86)$$

$$T''(t) + \lambda^2 a^2 T(t) = 0 \quad (2.87)$$

A solução das equações diferenciais (2.86) e (2.87) são respectivamente:

$$X(x) = A. \cos \lambda x + B. \sin \lambda x \quad (2.88)$$

$$T(t) = C. \cos \lambda a t + D. \sin \lambda a t \quad (2.89)$$

Resolvendo a equação (2.88) com a condição de contorno (2.60), obtemos:

$$A = 0 \quad (2.90)$$

Não é interessante uma solução nula, então é necessário que $B \neq 0$, para isso as equações (2.91), (2.92) e (2.93) devem ser satisfeitas:

$$X(L) = B \cdot \sin \lambda L = 0 \quad (2.91)$$

$$\sin \lambda L = 0 \quad (2.92)$$

$$\lambda = \frac{n\pi}{L}, \quad n = 0, 1, \dots, \quad (2.93)$$

A solução da equação da equação (2.88) pode ser expressa da seguinte forma:

$$X(x) = B \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (2.94)$$

Com base nas condições de contorno (2.62) e (2.63) e a equação (2.89), determinam-se os valores das constantes C e D.

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} (C \cdot \cos \lambda_n t + D \cdot \sin \lambda_n t) \cdot \left(B \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x \right) \quad (2.95)$$

Agrupando as constantes da equação (2.95), obtemos a equação (2.96) que é a solução para a equação diferencial parcial (2.59) com as condições de contorno (2.60), (2.61), (2.62) e (2.63).

$$V_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cdot \cos \frac{n\pi}{L} at + B_n \cdot \sin \frac{n\pi}{L} at \right) \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (2.96)$$

2.6. ANÁLISE DO ESCOAMENTO TRANSITÓRIO

A partir das equações da continuidade e momento, e com base nas técnicas computacionais é possível determinar o comportamento gráfico das variáveis: vazão e pressão.

A modelagem para o transiente é realizada utilizando vários métodos para resolver equações diferenciais parciais descritos na literatura. Em geral, não há um conjunto de soluções analíticas simples para as equações diferenciais.

2.6.1. Equação do momento

Considerando o sistema mostrado na figura 2.11, na qual a equação de momento é aplicada para o volume de controle mostrado na figura, e aplicando o teorema de transporte de Reynolds no volume de controle, obtemos:

$$\sum F = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{V} \cdot \rho \cdot dVol_{vc} + \int \vec{V} \rho \vec{V} \cdot \hat{n} \cdot dA_{sc} \quad (2.97)$$

Onde:

$\sum F$ = Somatório das forças atuando no sistema

$\frac{\partial}{\partial t} (\int \vec{V} \cdot \rho \cdot dVol)_{vc}$ = Taxa de variação temporal da quantidade de movimento no volume de controle

$(\int \vec{V} \rho \vec{V} \cdot \hat{n} \cdot dA)_{sc}$ = Fluxo líquido de quantidade de movimento na superfície de controle.

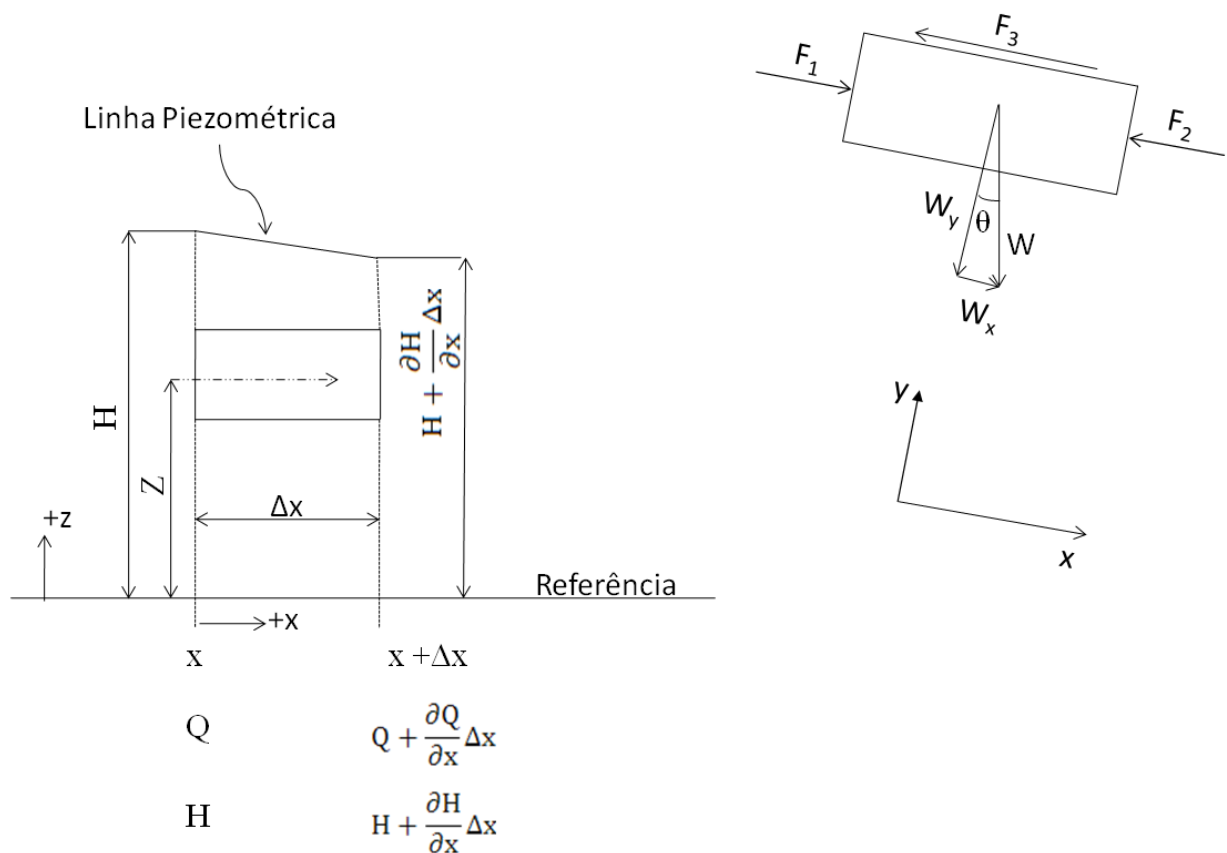


FIGURA 2.11 - Análise das forças envolvidas no escoamento transiente

De acordo com a análise do diagrama de corpo livre da figura 2.11, as forças envolvidas são as seguintes: Força de pressão, força de cisalhamento e força peso.

$$F_1 = \text{força de pressão} = \gamma(H - z)A$$

$$F_2 = \text{força de pressão} = \gamma \left[\left(H + \frac{\partial H}{\partial x} \Delta x \right) - z \right] A$$

$$F_3 = \text{força de cisalhamento} = \frac{\gamma f V^2}{g} \frac{\pi D}{8} \Delta x$$

$$W = \text{força peso} = m \cdot g = \rho \cdot A \cdot \Delta X \cdot g = \gamma \cdot A \cdot \Delta X$$

$$W_x = \text{força peso na direção } x = \gamma \cdot A \cdot \Delta X \cdot \sin \theta$$

$$W_y = \text{força peso na direção } y = \gamma \cdot A \cdot \Delta X \cdot \cos \theta.$$

Considerando as forças na direção do escoamento (eixo x) e desenvolvendo a equação (2.97), obtemos:

$$\sum F_x = \frac{\partial}{\partial t} (V \rho \cdot Vol) + \left[V \rho V \cdot A + V \frac{\partial (\rho V \cdot A)}{\partial x} \Delta x \right] - V \rho V \cdot A \quad (2.98)$$

Considerando ρA constante e organizando os termos da equação, temos:

$$\sum F_x = \left[\frac{\partial}{\partial t} V + V \frac{\partial V}{\partial x} \right] \rho A \Delta x \quad (2.99)$$

Igualando as forças mostradas no diagrama de corpo livre da figura 2.11:

$$\sum F_x = \left[\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right] \rho A \Delta x = F_1 + W_x - F_2 - F_3 \quad (2.100)$$

Substituindo as forças na equação (2.100), conseguimos:

$$\sum F_x = \gamma(H - z)A + \gamma \cdot A \cdot \Delta X \cdot \sin \theta - \gamma \left[\left(H + \frac{\partial H}{\partial x} \Delta x \right) - z \right] A - \frac{\gamma f V^2}{g} \frac{\pi D}{8} \Delta x \quad (2.101)$$

$$\sum F_x = \gamma \cdot A \cdot \Delta X \cdot \sin \theta - \gamma \cdot A \cdot \Delta x \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\gamma f V^2}{g} \frac{\pi D}{8} \Delta x \quad (2.102)$$

Dividindo a equação (2.102) por $\gamma \cdot A \cdot \Delta X$, e considerando um conduto circular:

$$\frac{\sum F_x}{\gamma \cdot A \cdot \Delta X} = \text{sen}\theta - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fV^2}{8g} \frac{\pi D}{\pi D^2/4} \quad (2.103)$$

Para inclinações pequenas, ou seja, $\theta \approx 0$; $\text{sen}\theta = 0$

$$\frac{\left[\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right] \rho A \Delta x}{\gamma \cdot A \cdot \Delta X} = - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fV^2}{2gD} \quad (2.104)$$

Agrupando os termos da equação (2.104), temos:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fV^2}{2D} \quad (2.105)$$

A equação (2.106) é conhecida como equação do momento.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0 \quad (2.106)$$

2.6.2. Equação da continuidade

Considere a equação da continuidade (2.107) na forma integral.

$$\frac{d}{dt}(m) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int \rho d\text{Vol} \right)_{\text{VC}} + \left(\int \rho \mathbf{V} \cdot \hat{n} \cdot dA \right)_{\text{SC}} \quad (2.107)$$

Onde:

$\frac{d}{dt}(m)$ = Variação temporal da massa no sistema

$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int \rho d\text{Vol} \right)_{\text{VC}}$ = Taxa de variação temporal da massa no volume de controle

$\left(\int \rho \mathbf{V} \cdot \hat{n} \cdot dA \right)_{\text{SC}}$ = Fluxo líquido de massa na superfície de controle.

De acordo com o princípio de conservação de massa, a taxa de variação temporal de massa no sistema é nula, então:

$$\frac{d}{dt}(m) = 0 \quad (2.108)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dVol_{vc} + \int \rho \mathbf{V} \cdot \hat{n} \cdot d\mathbf{A}_{sc} = 0 \quad (2.109)$$

A equação (2.109) desenvolvida no volume de controle considerado na figura 2.11, tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot A \cdot \Delta x) + \left[\rho V \cdot A + \frac{\partial(\rho V \cdot A)}{\partial x} \Delta x \right] - \rho V \cdot A = 0 \quad (2.110)$$

Dividindo por Δx e reorganizando os termos, obtemos a equação (2.111).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot A) + \frac{\partial(\rho V \cdot A)}{\partial x} = 0 \quad (2.111)$$

Desenvolvendo as derivadas parciais da equação (2.111), temos:

$$A \frac{\partial}{\partial t} \rho + \rho \frac{\partial}{\partial t} A + V \cdot A \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.112)$$

Dividindo por ρA e rearranjando a equação (2.112), conseguimos:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial t} \rho + V \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{1}{A} \left(\frac{\partial}{\partial t} A + V \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.113)$$

Derivada ordinária da massa específica “ ρ ” em relação a t :

$$\left(\frac{d\rho}{dt} \right) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \quad (2.114)$$

Derivada ordinária da área “ A ” em relação a t :

$$\left(\frac{dA}{dt} \right) = \left(\frac{\partial A}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial A}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) = \left(\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (2.115)$$

Substituindo a equação (2.114) e (2.115) na equação (2.113):

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dt} \right) + \frac{1}{A} \left(\frac{dA}{dt} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.116)$$

O módulo de elasticidade do fluido é definido por:

$$K = \frac{dP}{d\rho/\rho} \quad (2.117)$$

A equação (2.117) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho}{K} \frac{dP}{dt} \quad (2.118)$$

Para um conduto circular com raio R , a equação diferencial da área em relação ao tempo, pode ser escrita como segue:

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R \frac{dR}{dt} \quad (2.119)$$

De forma mais adequada, a equação (2.119) pode ser reescrita assim:

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R^2 \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad (2.120)$$

A área transversal do conduto circular é:

$$A = \pi R^2 \quad (2.121)$$

A variação do raio pode ser relacionada com a deformação “ ϵ ”, como segue:

$$dR = R d\epsilon \quad (2.122)$$

Substituindo as equações (2.121) e (2.122) na equação (2.120), obtemos:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2.123)$$

Considerando um conduto com elasticidade linear, sendo que essa aproximação é verdadeira para materiais comuns tais como metal, madeira e concreto. Então:

$$\epsilon = \frac{\sigma_R - \mu \sigma_A}{E} \quad (2.124)$$

Para um conduto com paredes finas, tendo uma pressão P , obtemos:

$$\sigma_R = \frac{PD}{2e} \quad (2.125)$$

I. Caso 1: $\sigma_A = 0$

$$\sigma_A = 0 \quad (2.126)$$

Considerando apenas a tensão radial, logo $\sigma_A = 0$ a deformação é escrita como segue:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_R}{E} \right) \quad (2.127)$$

Substituindo a equação (2.125) na equação (2.127):

$$\varepsilon = \frac{PD}{2eE} \quad (2.128)$$

$$c_1 = 1 \quad (2.129)$$

II. Caso 2: $\sigma_A = \mu \cdot \sigma_R$

$$\sigma_A = \mu \cdot \sigma_R \quad (2.130)$$

Ao substituir a equação para a tensão axial (2.130) na equação (2.124) a deformação é escrita como segue:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_R - \mu^2 \cdot \sigma_R}{E} \quad (2.131)$$

Substituindo a equação da tensão radial (2.125) na equação (2.131), obtemos:

$$\varepsilon = \left(\frac{PD}{2eE} \right) \cdot (1 - \mu^2) \quad (2.132)$$

$$c_1 = (1 - \mu^2) \quad (2.133)$$

III. Caso 3 – Conduto com uma extremidade ancorada $\sigma_A = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e}$

$$\sigma_A = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e} \quad (2.134)$$

Substituindo a equação (2.134) na equação da deformação (2.124), a deformação é escrita como segue:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_R - \mu \frac{P \cdot D}{4 \cdot e}}{E} \quad (2.135)$$

Substituindo a equação de tensão radial (2.125) na equação (1.135), temos o seguinte:

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{PD}{2e}\right) - \mu \left(\frac{P \cdot D}{4 \cdot e}\right)}{E} \quad (2.136)$$

Rearranjando a equação (2.136):

$$\varepsilon = \left(\frac{PD}{2eE}\right) \cdot \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \quad (2.137)$$

$$c_1 = \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \quad (2.138)$$

De uma forma geral, a equação para a deformação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\varepsilon = \left(\frac{PD}{2eE}\right) \cdot c_1 \quad (2.139)$$

Desse modo, a equação (2.139) considera os três casos, onde c_1 depende do tipo de ancoragem considerada.

Substituindo a equação da tensão radial (2.125) na equação (2.139) e em seguida, diferenciando em relação a t , obtemos:

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma_R}{dt} c_1 \quad (2.140)$$

A derivada temporal da equação para a tensão radial pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{d\sigma_R}{dt} = \frac{P}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dP}{dt} \quad (2.141)$$

Substituindo a equação (2.141) na equação (2.140), a derivada temporal da equação para deformação pode ser expressa da seguinte forma:

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{P}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dP}{dt}\right) \cdot c_1 \quad (2.142)$$

A equação da derivada temporal da área (2.123) pode ser reescrita assim:

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R^2 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.143)$$

Substituindo a área, para um conduto circular, na equação (2.143) e rearranjando os termos, obtemos a equação (2.144):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} \quad (2.144)$$

Substituindo a equação (2.144) na equação (2.142), temos:

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{PD}{2e} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dP}{dt} \right) \cdot c_1 \quad (2.145)$$

Rearranjando os termos da equação (2.145), obtemos o seguinte:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\left(\frac{D}{2e} \frac{dP}{dt} \right) \cdot c_1}{\left(E - \frac{PD}{2e} \cdot c_1 \right)} \quad (2.146)$$

Substituindo a equação (2.123) na equação (2.146) e rearranjando os termos, obtemos:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{\left(\frac{D}{e} \frac{dP}{dt} \right) \cdot c_1}{\left(E - \frac{PD}{2e} \cdot c_1 \right)} \quad (2.147)$$

Substituindo a equação (2.118) e a equação (2.147) na equação da continuidade (2.116):

$$\frac{1}{K} \frac{dP}{dt} + \frac{\left(\frac{D}{e} \frac{dP}{dt} \right) \cdot c_1}{\left(E - \frac{PD}{2e} \cdot c_1 \right)} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.148)$$

Dividindo o segundo termo da equação (2.148) por $(D \cdot c_1)/e$, e agrupando os termos da derivada temporal da pressão, temos:

$$\left[\frac{1}{K} + \frac{1}{\left(\frac{eE}{D \cdot c_1} - \frac{P}{2} \right)} \right] \frac{dP}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.149)$$

Considerando que $\frac{P}{2} \ll eE/Dc_1$, a equação pode ser escrita assim:

$$\frac{1}{K} \left[1 + \left(\frac{DK}{eE} \right) \cdot c_1 \right] \frac{dP}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.150)$$

A celeridade é definida como:

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{DK}{eE} \right) \cdot c_1} \quad (2.151)$$

Substituindo a equação (2.151) na equação (2.150) e multiplicando por ρa^2 :

$$\frac{dP}{dt} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.152)$$

A derivada total da pressão P em relação ao tempo t é:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.153)$$

Substituindo a equação (2.153) na equação (2.152) temos a equação da continuidade.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.154)$$

2.6.3. Simplificações

Segundo Chaudhry (1979), para muitas aplicações em engenharia os termos de aceleração convectiva podem ser considerados nulos.

$$V \frac{\partial V}{\partial x} \approx 0 \quad (2.155)$$

$$V \frac{\partial P}{\partial x} \approx 0 \quad (2.156)$$

I. Equação do momento

Substituindo a equação (2.155), na equação do momento (2.106):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0 \quad (2.157)$$

Considerando o fluxo reverso, o termo (V^2) pode ser escrito como $V \cdot |V|$:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2D} = 0 \quad (2.158)$$

Substituindo a vazão na equação (2.158), multiplicando pela área A, e considerando a área constante em relação ao tempo, obtemos o seguinte:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f \cdot Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.159)$$

II. Equação da continuidade

Substituindo a equação (2.156) na equação da continuidade (2.154):

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.160)$$

Substituindo o termo da velocidade na equação (2.160) pela vazão, e considerando a área constante em relação à distância, obtemos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\rho a^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.161)$$

A equação da pressão pode ser expressa na seguinte forma:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [\rho g(H - Z)] = \rho g \left[\frac{\partial}{\partial t} H - \frac{\partial}{\partial t} Z \right] \quad (2.162)$$

Considerando que “Z” não varia com o tempo, então:

$$\frac{\partial}{\partial t} Z \approx 0 \quad (2.163)$$

Então, a equação (2.162) pode ser reescrita como segue:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho g \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.164)$$

Substituindo a equação (2.164) na equação (2.161), obtemos:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.165)$$

A equação (2.165) é a equação da continuidade, considerando o fenômeno transitório.

2.7. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

As equações de hidráulica transiente são provenientes das equações da continuidade e quantidade de movimento, sendo estas, equações diferenciais parciais. Sua solução analítica é de difícil obtenção, por isso o método das características é uma alternativa para a solução numérica do problema.

O método das características utiliza malhas (figura 2.12) para o cálculo de vazão e carga em cada passo de tempo. Isso é possível, pois as equações diferenciais são transformadas em equações ordinárias, viabilizando a sua solução numérica.

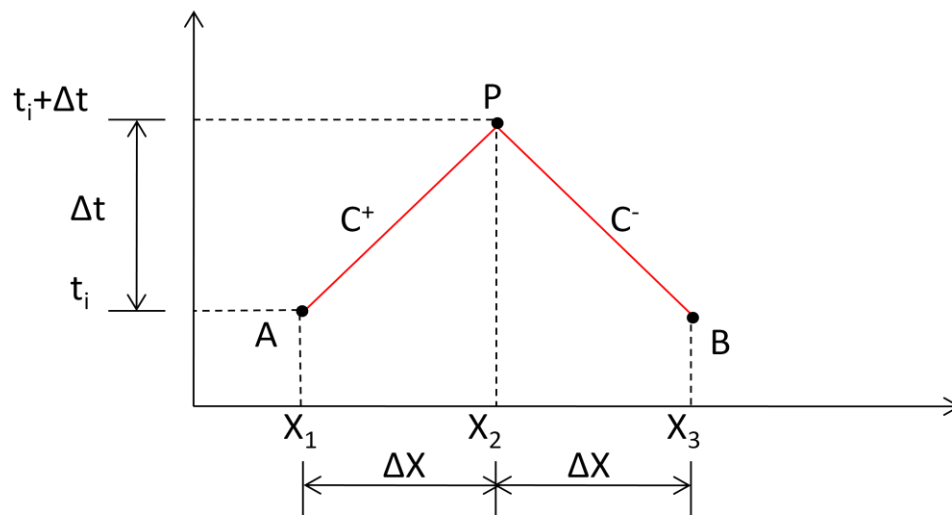


FIGURA 2.12 - Linhas características

O problema é: transformar a equação L_1 , que representa a equação do momento, e a equação L_2 , que representa a equação da continuidade, em equações diferenciais ordinárias.

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.166)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.167)$$

Realizando-se a seguinte transformação linear: $L = L_1 + (\lambda gA) \cdot L_2$, podemos transformar um problema de equações parciais em equações ordinárias.

$$L = \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \quad (2.168)$$

Rearranjando os termos de $Q(x,t)$ e $H(x,t)$ da equação (2.168) obtemos a equação (2.169), que pode ser transformada em uma equação ordinária com base nos diferenciais ordinários de vazão e carga, representados pelas equações (2.170) e (2.171).

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.169)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2.170)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2.171)$$

Para que a igualdade das equações (2.170) e (2.171) seja verdadeira, as equações (2.172), (2.173) e (2.174) devem ser satisfeitas.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \quad (2.172)$$

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (2.173)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (2.174)$$

Substituindo as equações (2.170) e (2.171) na equação (2.169), obtemos:

$$\frac{dQ}{dt} + \lambda gA \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.175)$$

A equação (2.174) mostra que a taxa de mudança do espaço “x” com o tempo “t”, assume valores positivos e negativos, por isso, temos a equação característica positiva e negativa respectivamente. As equações (2.176) e (2.177) representam as equações características positivas e as equações (2.178) e (2.179) representam as equações características negativas.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.176)$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (2.177)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.178)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (2.179)$$

As equações características podem ser integradas, contudo, a vazão depende do tempo e espaço e o fator de atrito varia em função do tempo e espaço. Assim, torna-se necessária uma aproximação para resolver as equações características. Em geral, o fator de atrito para efeitos de simplificação é mantido constante. Então, adotando uma aproximação de primeira ordem para a vazão, as equações podem ser resolvidas.

$$\int dQ \pm \frac{gA}{a} \int dH + \frac{f}{2DA} \int Q|Q|dt = 0 \quad (2.180)$$

$$C^+: (Q_P - Q_A) + Ca.(H_P - H_A) + R.Q_A|Q_A| = 0 \quad (2.181)$$

$$C^-: (Q_P - Q_B) - Ca.(H_P - H_B) + R.Q_B|Q_B| = 0 \quad (2.182)$$

$$Ca = \frac{gA}{a} \quad (2.183)$$

$$R = \frac{f.\Delta t}{2DA} \quad (2.184)$$

De forma mais conveniente, as equações características positivas (2.181) e negativas (2.182) podem ser reagrupadas.

Na figura 2.12, a linha representada por C^+ é a equação característica positiva e a equação característica negativa é representada por C^- .

$$C^+: Q_P = C_P - Ca.H_P \quad (2.185)$$

$$C^-: Q_P = C_n + Ca.H_P \quad (2.186)$$

$$C_P = Q_A + Ca.H_A - R.Q_A|Q_A| \quad (2.187)$$

$$C_n = Q_B - Ca.H_B - R.Q_B|Q_B| \quad (2.188)$$

As equações características devem atender o critério de estabilidade e convergência, que é chamado de condição de estabilidade de Courant, de acordo com a equação (2.189).

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (2.189)$$

2.8. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

No processo transiente, as tubulações são submetidas à compressão e expansão em um processo rotineiro, o que pode acarretar em fadiga. Portanto, necessitamos de dispositivos que “atenuem” o transiente.

A seleção dos dispositivos é verificada com base na disponibilidade econômica e na redução das flutuações de pressão em pontos críticos, devendo limitar os valores de sobrepressão e subpressão e minimizar os custos.

Os volantes de inércia são dispositivos que atuam na proteção contra subpressões da seguinte forma: incorporando um volante à bomba, sua inércia retardará as perdas de rotação, atenuando o transiente.

Os reservatórios unidirecionais são dispositivos atenuadores do transiente para subpressões. Quando o valor da carga piezométrica atingir valor inferior ao do nível de água no reservatório, o fluxo do reservatório para a linha de recalque evita a formação de vácuo na tubulação.

As chaminés de equilíbrio são dispositivos que atuam na proteção contra sobrepressão e subpressão. Nas chaminés de equilíbrio a água está em contato com a atmosfera, portanto deve-se tomar cuidado para evitar a contaminação. São dispositivos de elevada eficiência.

O reservatório hidropneumático é um dispositivo que atua ao mesmo tempo na proteção contra subpressão e sobrepressão, sendo um reservatório fechado que contém água e ar, possibilitando a oscilação da água entre o recipiente e o reservatório de descarga. Este dispositivo tem a desvantagem de sofrer perdas de ar devido à dissolução.

As válvulas de alívio são dispositivos utilizados para atenuar a sobrepressão, através de mecanismos de regulação. A válvula se abre quando a pressão excede um valor fixado, controlando-a. Tem um funcionamento semelhante à de uma panela de pressão. A portinhola abre-se apenas com movimento da água e fecha-se quando o movimento cessa impedindo o retorno e isolando trechos da tubulação.

2.8.1. Reservatório com nível constante a montante

Para esse caso, assume-se que o nível de água permanece constante durante a condição do estado transiente (figura 2.13). Essa suposição é válida para o caso de grandes reservatórios em um curto intervalo de tempo.

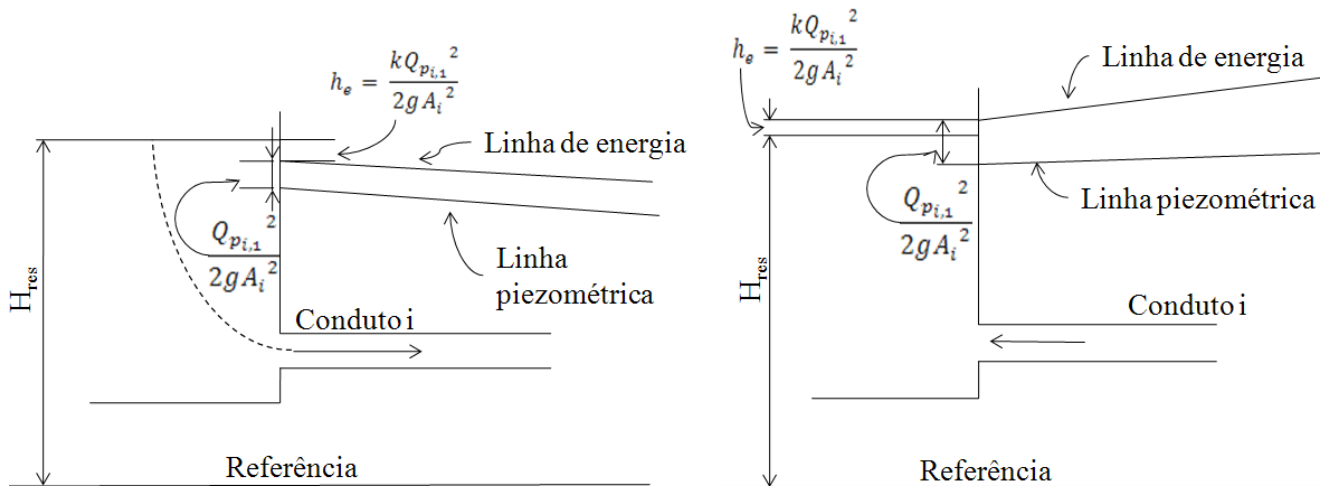


FIGURA 2.13 - Reservatório a montante

Fonte: Chaudhry, 1979

A equação (2.190) considera a perda de carga na entrada do fluido no conduto.

$$h_e = \frac{k Q_{p,i,1}^2}{2g A_i^2} \quad (2.190)$$

A carga no reservatório é descrita pela equação (2.191), para cada passo de tempo.

$$H_{res} = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{Q_{p,i,1}^2}{2g A_i^2} + h_e \quad (2.191)$$

Substituindo a equação da perda localizada (2.190) na equação (2.191), temos:

$$H_{P,i,1} = H_{res} - (1 + k) \frac{Q_{p,i,1}^2}{2g A_i^2} \quad (2.192)$$

$$Q_{P,i,1} = C_{n_i} + C_{a_i} \cdot H_{P,i,1} \quad (2.193)$$

Substituindo a equação característica negativa (2.193) na equação (2.192), obtemos:

$$\frac{(1+k)C_{a_i}}{2gA_i^2} Q_{P_{i,1}}^2 + Q_{P_{i,1}} - (C_{n_i} + C_{a_i} H_{res}) = 0 \quad (2.194)$$

A equação (2.195) é a raiz positiva da equação (2.194).

$$Q_{P_{i,1}} = \frac{1}{2 \cdot k_1} \left[-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot k_1 \cdot (C_{n_i} + C_{a_i} H_{res})} \right] \quad (2.195)$$

Onde:

$$k_1 = [(1+k)C_{a_i}]/(2g A_i^2).$$

Caso a perda na entrada e a carga cinética forem desprezados, então:

$$H_{P_{i,1}} = H_{res} \quad (2.196)$$

$$Q_{P_{i,1}} = C_{n_i} + C_{a_i} H_{res} \quad (2.197)$$

2.8.2. Reservatório com nível variável à montante

Para esse caso, assume-se que o nível de água é conhecido e o nível do reservatório varia com o tempo. Para o caso do reservatório constante, e desprezando as perdas de carga no reservatório, a carga do trecho da tubulação imediatamente ao reservatório se iguala a carga no reservatório. Logo, seria razoável considerar que no caso variável, a carga do reservatório é igual à soma da parcela constante acrescido da parcela variável.

Desse modo, o equacionamento da equação é:

$$H(t)_{P_{res}} = H_{res} + f(t) \quad (2.198)$$

Onde a função $f(t)$, é justamente a parcela variável e H_{res} é a parte constante da equação para o reservatório variável (figura 2.14).

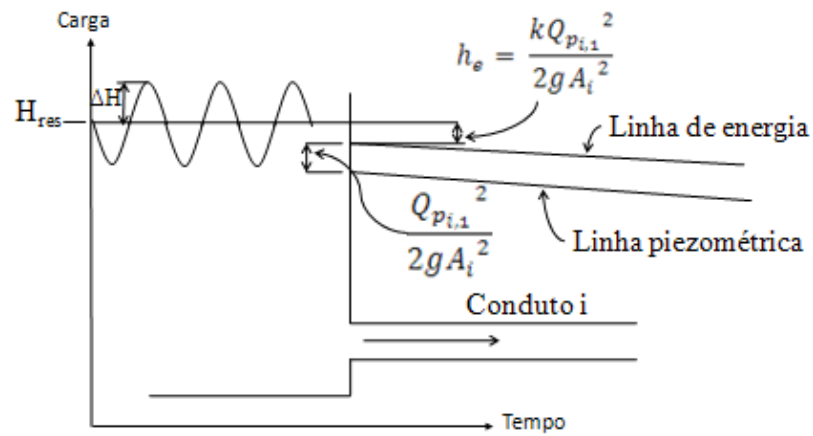


FIGURA 2 14 - Reservatório com nível variável

Para o primeiro trecho da tubulação a equação é escrita de tal forma:

$$H(t)_{P_{res}} = H(t)_{P_{i,1}} + \frac{Q(t)_{P_{i,1}}^2}{2gA_i^2} + h_e \quad (2.199)$$

Se a perda na entrada e a energia cinética forem desprezadas, então:

$$H(t)_{P_{res}} = H(t)_{P_{i,1}} \quad (2.200)$$

2.8.3. Reservatório com nível constante à jusante

Para esse caso, assume-se que o nível de água permanece constante à jusante durante a condição do estado transiente. Essa suposição é válida para o caso de grandes reservatórios e em um curto intervalo de tempo. A figura 2.15 mostra o comportamento das linhas de energia e piezométrica para esse caso.

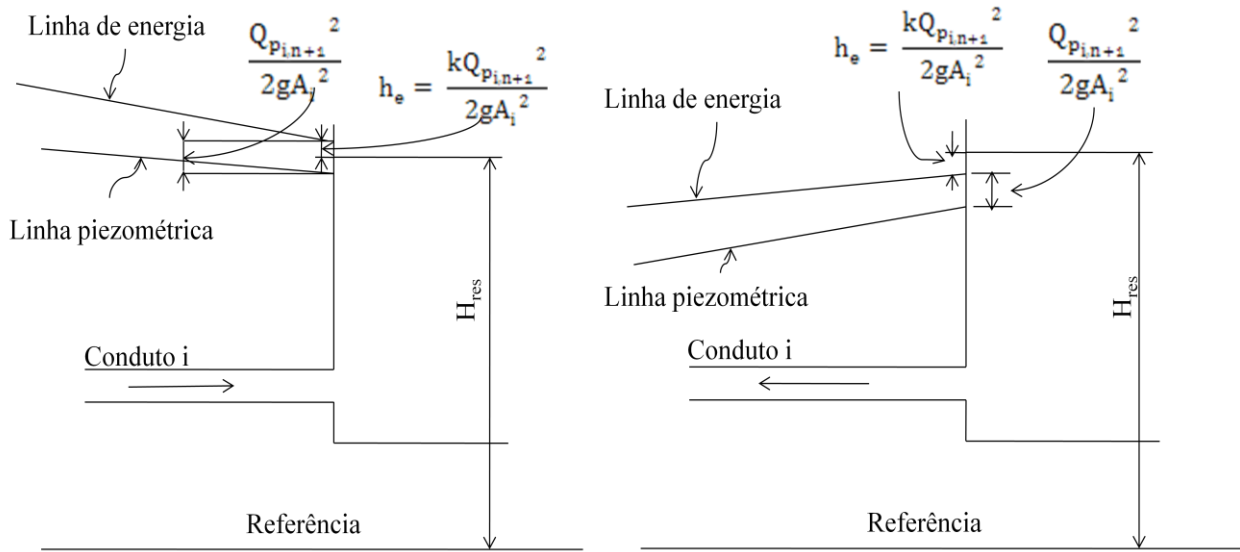


FIGURA 2.15 - Reservatório de nível constante a jusante

Fonte: Chaudhry, 1979

A perda localizada é devido à entrada, sendo representa como segue:

$$h_e = \frac{k Q_{p_{i,n+1}}^2}{2 g A_i^2} \quad (2.201)$$

A equação para o último trecho da tubulação é:

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{res} - (1 - k) \frac{Q_{p_{i,n+1}}^2}{2 g A_i^2} \quad (2.202)$$

A equação característica positiva para o último trecho da tubulação é:

$$Q_{p_{i,n+1}} = C_{p_i} - C_{a_i} \cdot H_{p_{i,n+1}} \quad (2.203)$$

Substituindo a equação (2.203) na equação (2.202), e rearranjando os termos, conseguimos:

$$\frac{(1 - k) C_{a_i}}{2 g A_i^2} Q_{p_{i,n+1}}^2 - Q_{p_{i,n+1}} + (C_{p_i} - C_{a_i} H_{res}) = 0 \quad (2.204)$$

A equação (2.205) é a raiz positiva da equação de segundo grau (2.204).

$$Q_{P_{i,n+1}} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4 \cdot k_2 \cdot (C_{P_i} - C_{a_i} H_{res})}}{2 \cdot k_2} \quad (2.205)$$

Onde:

$$k_2 = [(1 - k)C_{a_i}]/(2g A_i^2)$$

Caso a perda na entrada e a carga cinética forem desprezados, então:

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{res} \quad (2.206)$$

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{P_i} - C_{a_i} \cdot H_{res} \quad (2.207)$$

2.8.4. Extremidade fechada

A condição de contorno extremidade fechada é caracterizada pela condição de vazão nula na extremidade (figura 2.16).

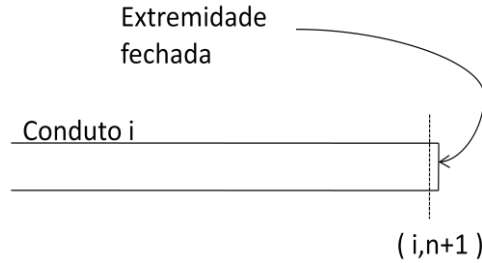


FIGURA 2.16 - Extremidade fechada

Fonte: Chaudhry, 1979

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{P_i} - C_{a_i} \cdot H_{P_{i,n+1}} \quad (2.208)$$

Para o caso de extremidade fechada, a vazão é nula, $Q_{P_{i,n+1}} = 0$, então a equação característica positiva se reduz para:

$$H_{P_{i,n+1}} = \frac{C_{P_i}}{C_{a_i}} \quad (2.209)$$

2.8.5. Válvula à jusante

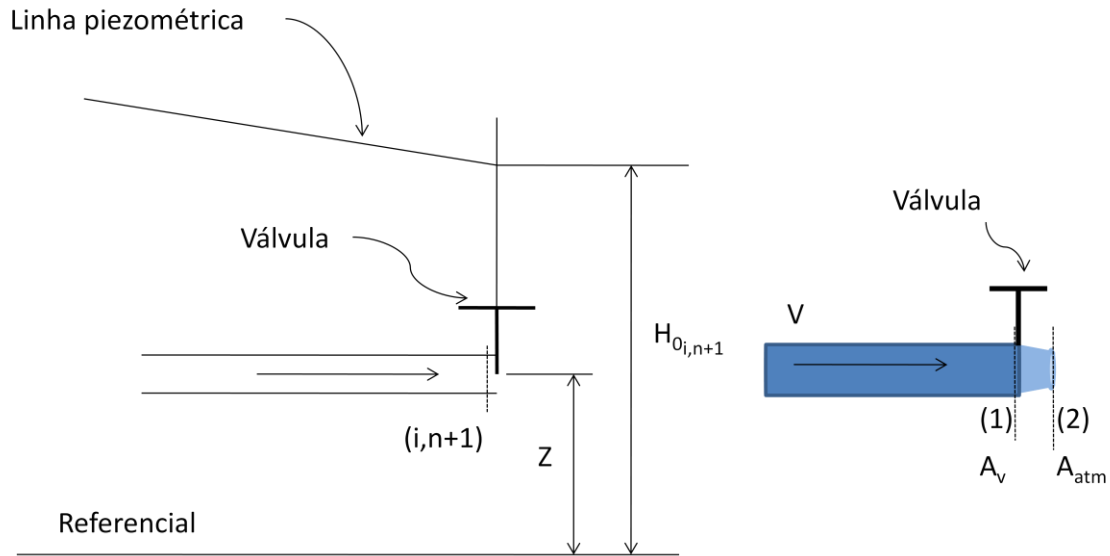


FIGURA 2.17 - Válvula à jusante

Segundo Chaudhry (1979) a equação (2.210) é válida para $z = 0$, ou seja, quando a referência está sobre a válvula.

$$Q_{P_{i,n+1}} = (C_d \cdot A_v) \sqrt{2gH_{P_{i,n+1}}} \quad (2.210)$$

A equação acima pode ser deduzida considerando Z qualquer. Desse modo, o modelo se torna mais adequado para casos reais, onde a cota relativa da válvula é diferente de zero.

Utilizando a equação de Bernoulli entre os pontos (1) e (2) da figura 2.17, para cada passo de tempo, obtemos:

$$\frac{P_1 + P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 \quad (2.211)$$

Considerando na equação anterior, onde a válvula está na mesma cota do ponto (2), e a equação da continuidade é válida, obtemos:

$$Z = Z_1 = Z_2 \quad (2.212)$$

$$Q = A_v \cdot V_1 \quad (2.213)$$

$$Q = A_{\text{atm}} \cdot V_2 \quad (2.214)$$

Substituindo as equações anteriores na equação de Bernoulli, obtemos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z + \frac{1}{2 \cdot g} \left(\frac{Q}{A_V} \right)^2 = \frac{1}{2 \cdot g} \left(\frac{Q}{A_{\text{atm}}} \right)^2 + Z \quad (2.215)$$

$$H + \frac{1}{2 \cdot g} \left(\frac{Q}{A_V} \right)^2 = \frac{1}{2 \cdot g} \left(\frac{Q}{A_{\text{atm}}} \right)^2 + Z \quad (2.216)$$

O coeficiente de contração é definido como segue:

$$cc = \frac{A_{\text{atm}}}{A_V} \quad (2.217)$$

Substituindo o coeficiente de contração na equação (2.216), temos:

$$H - Z = \frac{Q^2}{2 \cdot g} \left(\frac{1 - cc^2}{A_V^2 \cdot cc^2} \right) \quad (2.218)$$

Rearranjando os termos da equação, temos:

$$Q = A_V \cdot Cd \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - Z)} \quad (2.219)$$

Quando $Z=0$ a equação é válida para a análise segundo Chaudhry (1979).

Partindo da equação anterior, e com base na formulação de Chaudhry (1979) para a válvula completamente aberta, onde o subscrito “0” indica a condição no estado estacionário, temos as seguintes equações:

$$Q_{P_{i,n+1}} = (Cd \cdot A_V) \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{P_{i,n+1}} - Z)} \quad (2.220)$$

$$Q_{0_{i,n+1}} = (Cd \cdot A_V)_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{0_{i,n+1}} - Z)} \quad (2.221)$$

Dividindo a equação (2.220) pela equação (2.221), e elevando ao quadrado obtemos o seguinte:

$$\left(\frac{Q_{P_{i,n+1}}}{Q_{0_{i,n+1}}} \right)^2 = \left[\frac{(Cd \cdot A_V) \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{P_{i,n+1}} - Z)}}{(Cd \cdot A_V)_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{0_{i,n+1}} - Z)}} \right]^2 \quad (2.222)$$

O coeficiente de descarga e a área podem ser relacionados com os respectivos valores para o estado estacionário, representados pela seguinte equação:

$$\tau = \left[\frac{(Cd \cdot A_v)}{(Cd \cdot A_v)_0} \right] \quad (2.223)$$

A equação característica positiva para o último trecho do tubo é:

$$H_{p_{i,n+1}} = \frac{C_{p_i} - Q_{p_{i,n+1}}}{C_{a_i}} \quad (2.224)$$

Substituindo as equações (2.223) e (2.224) na equação (2.222), e rearranjando os termos, obtemos:

$$Q_{p_{i,n+1}}^2 = \frac{(\tau Q_{0_{i,n+1}})^2}{(H_{0_{i,n+1}} - Z)C_{a_i}} [(C_{p_i} - Q_{p_{i,n+1}}) - C_{a_i}Z] \quad (2.225)$$

$$C_v = \frac{(\tau Q_{0_{i,n+1}})^2}{(H_{0_{i,n+1}} - Z) \cdot C_{a_i}} \quad (2.226)$$

Substituindo a equação (2.226) na equação (2.225), obtemos:

$$Q_{p_{i,n+1}}^2 + C_v Q_{p_{i,n+1}} - C_v (C_{p_i} - C_{a_i}Z) = 0 \quad (2.227)$$

Resolvendo a equação do segundo grau (2.227) e considerando apenas a raiz positiva, obtemos o seguinte:

$$Q_{p_{i,n+1}} = \frac{\left(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_v(C_{p_i} - C_{a_i}Z)} \right)}{2} \quad (2.228)$$

H_p pode ser determinado pela equação característica positiva (2.229).

$$Q_{p_{i,n+1}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n+1}} \quad (2.229)$$

2.8.6. Orifício

Para um orifício, a abertura é constante. De modo que, o valor de τ é constante e igual a 1, assim a equação (2.226) para o C_v é modificada como segue:

$$C_v = \frac{(Q_{0,i,n+1})^2}{(H_{0,i,n+1} - Z) \cdot C_{a_i}} \quad (2.230)$$

Desse modo, a equação para a vazão (2.228) é válida, considerando a modificação na equação para C_v (2.230), e a carga piezométrica pode ser determinada pela equação (2.229).

2.8.7. Junção

Uma junção pode ser verificada quando dois condutos tem diferentes diâmetros, espessura, tipo de material e fator de fricção. Se a perda de carga na junção for desprezível, então a carga no trecho $n+1$ do tubo i é a mesma do trecho 1 do tubo $i+1$.

A equação pode ser escrita como segue:

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad (2.231)$$

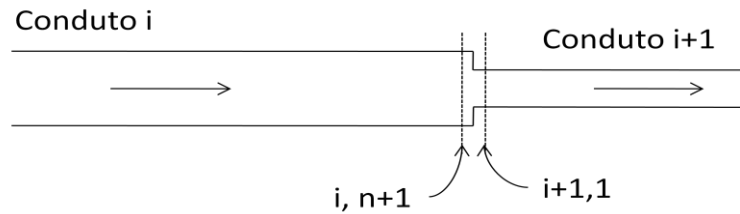


FIGURA 2.18 - Junção

Fonte: Chaudhry, 1979

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{P_i} - C_{a_i} \cdot H_{P_{i,n+1}} \quad (2.232)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,1}} \quad (2.233)$$

De acordo com a equação da continuidade, e para cada passo de tempo, obtemos:

$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_{i+1,1}} \quad (2.234)$$

$$H_{P_{i,n+1}} = \frac{C_{P_i} - C_{n_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}} \quad (2.235)$$

2.8.8. Bomba centrífuga à montante

A figura 2.19 mostra uma típica curva para uma bomba centrífuga a uma velocidade constante.

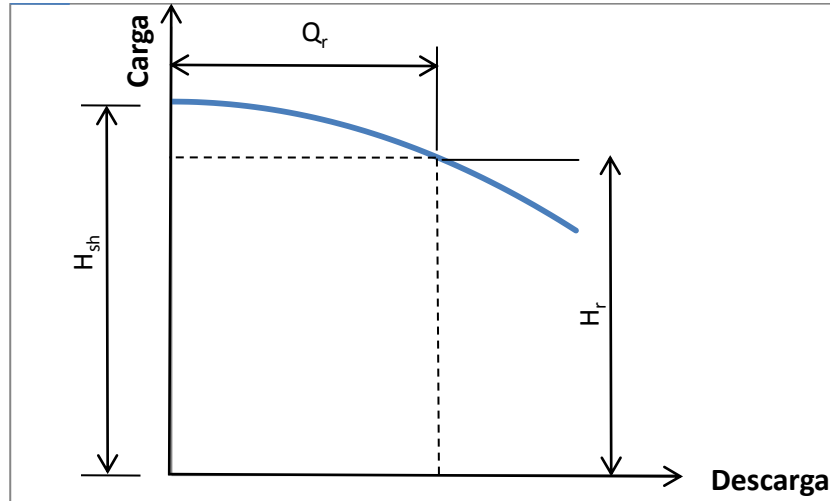


FIGURA 2.19 - Bomba centrífuga à montante

Fonte: Chaudhry, 1979

E a equação para a bomba pode ser aproximada por:

$$H_{P_{i,1}} = H_{sh} - C_8 Q_{P_{i,1}}^2 \quad (2.236)$$

$$C_8 = \frac{H_{sh} - H_r}{Q_r^2} \quad (2.237)$$

Combinando a equação (2.236) com a equação característica negativa, a vazão é dada pela seguinte equação:

$$Q_{P_i} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4C_{a_i} C_8 (C_{n_i} + C_{a_i} H_{sh})}}{2C_{a_i} C_8} \quad (2.238)$$

A carga pode ser determinada pela equação para H_p (2.236)

3. METODOLOGIA

A válvula antecipadora de onda tem a função de proteger o grupo de bombas contra paradas repentinas devido à falta de energia. A válvula abre imediatamente quando a pressão atinge um valor predeterminado pela regulagem de baixa pressão, e descarrega para a atmosfera o excesso de pressão provocado pela onda de alta pressão. A válvula começa a abrir depois da passagem da onda de baixa pressão e se mantém aberta até que a pressão permaneça entre as pressões máximas e mínimas de regulagem, e fecha lentamente para prevenir subsequentes golpes de aríete. A descarga da válvula deve estar preferencialmente ao nível da bomba, isso evita que se verifique a condição de vazio.

3.1. NORMAS

- I. Quando o sistema fluvial não tiver capacidade para receber diretamente a descarga prevista, deve ser instalada uma caixa de concreto com volume suficiente para armazenar a descarga durante o tempo total em que a válvula permanecer aberta.
- II. O corpo de água escolhido deve ter capacidade para receber a descarga prevista, devendo também ser analisado à influência da vazão.

3.2. FUNCIONAMENTO

Quando a pressão na linha principal supera a pressão máxima ajustada, a válvula abre como uma de alívio comum, despejando o excesso de pressão. Quando a pressão na linha cai abaixo do valor da regulagem mínima, a válvula principal começa a abrir de modo a se antecipar à onda de pressão alta, sendo dessa forma conhecida por válvula antecipadora de onda. A operação da válvula consiste em dois pilotos montados na válvula principal, conectados a um sensor de pressão na linha principal.

O piloto de máxima pressão (2) irá abrir quando o valor da pressão for maior ou igual ao valor da regulagem de máxima pressão. O piloto de baixa pressão (3) irá comandar a

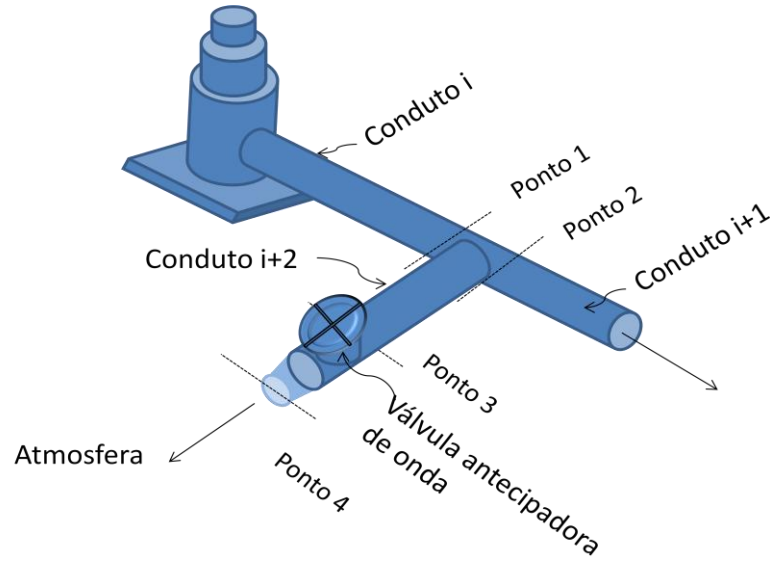


FIGURA 3. 2 - Válvula antecipadora de onda na derivação da linha principal

Caso a válvula esteja abrindo, aberta ou fechando, e para qualquer t , onde $t > 0$, e para cada passo de tempo, com base na figura 3.2, a equação de Bernoulli pode ser escrita como segue:

$$\frac{P_3 + P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} + Z_3 = \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_4^2}{2 \cdot g} + Z_4 \quad (3.1)$$

Rearranjando os termos da equação de Bernoulli (3.1), obtemos:

$$\left(\frac{P_3}{\gamma} + Z_3 \right) + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} = \frac{V_4^2}{2 \cdot g} + Z_4 \quad (3.2)$$

Considerando a cota do ponto de instalação da válvula antecipadora de onda Z_4 igual à cota do segundo nó Z_{N2} , temos:

$$H_3 + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} = \frac{V_4^2}{2 \cdot g} + Z_{N2} \quad (3.3)$$

Organizando os termos da equação (3.3), obtemos:

$$(H_3 - Z_{N2}) = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot (V_4^2 - V_3^2) \quad (3.4)$$

Considerando a vazão no ponto 3 igual a do ponto 4, temos as relações:

$$Q_3 = V_3 \cdot A_{VAO} \quad (3.5)$$

$$Q_4 = V_4 \cdot A_4 \quad (3.6)$$

O coeficiente de contração é definido como segue:

$$cc = \frac{A_4}{A_{VAO}} \quad (3.7)$$

Substituindo as equações (3.5), (3.6) e (3.7) na equação (3.4) e rearranjando os termos da equação, temos:

$$(H_3 - Z_{N2}) = \frac{Q_{VAO}^2}{2 \cdot g \cdot A_{VAO}^2} \cdot \left(\frac{1 - cc^2}{cc^2} \right) \quad (3.08)$$

Organizando os termos da equação (3.08):

$$Q_{VAO} = (A_{VAO} \cdot Cd_{VAO}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_3 - Z_{N2})} \quad (3.09)$$

$$Q_{VAO0} = (A_{VAO} \cdot Cd_{VAO})_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{30} - Z_{N2})} \quad (3.10)$$

Desprezando as perdas localizadas, e para cada passo de tempo, obtemos:

$$H_1 = H_2 = H_3 \quad (3.11)$$

$$H_{10} = H_{20} = H_{30} \quad (3.12)$$

Substituindo as equações (3.11) e (3.12) nas equações (3.09) e (3.10) temos respectivamente, o seguinte:

$$Q_{VAO} = (A_{VAO} \cdot Cd_{VAO}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_1 - Z_{N2})} \quad (3.13)$$

$$Q_{VAO0} = (A_{VAO} \cdot Cd_{VAO})_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{10} - Z_{N2})} \quad (3.14)$$

Onde o subscrito “0” indica a condição de estado permanente.

Elevando ao quadrado as equações (3.13) e (3.14) e em seguida dividindo a primeira equação pela segunda, o resultado é o que segue:

$$\left(\frac{Q_{VAO}}{Q_{VAO0}} \right)^2 = \left[\frac{(A_{VAO} \cdot Cd_{VAO})}{(A_{VAO} \cdot Cd_{VAO})_0} \right]^2 \left[\frac{(H_1 - Z_{N2})}{(H_{10} - Z_{N2})} \right] \quad (3.15)$$

$$\tau = \left[\frac{(A_{VAO} \cdot Cd_{VAO})}{(A_{VAO} \cdot Cd_{VAO})_0} \right] \quad (3.16)$$

$$Q_{VAO}^2 = \frac{(\tau \cdot Q_{VAO0})^2}{(H_{10} - Z_{N2})} (H_1 - Z_{N2}) \quad (3.17)$$

De acordo com a figura 3.2 a equação da continuidade pode ser expressa dessa forma:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{VAO} \quad (3.18)$$

A equação (3.19) é a equação característica positiva do trecho N+1 para o conduto i da figura 3.2, e a equação (3.20) é a equação característica negativa do trecho 1 para o conduto i+1 da figura 3.2.

$$Q_1 = Cp_1 - Ca_1 \cdot H_1 \quad (3.19)$$

$$Q_2 = Cn_2 + Ca_2 \cdot H_2 \quad (3.20)$$

Substituindo as equações (3.19) e (3.20) na equação (3.18) e considerando a carga $H_1=H_2$, conseguimos:

$$H_1 = \frac{(Cp_1 - Cn_2) - (Q_{VAO})}{Ca_1 + Ca_2} \quad (3.21)$$

Substituindo a equação (3.21) na equação (3.17), e organizando os termos da equação, obtemos a seguinte equação de segundo grau:

$$Q_{VAO}^2 + C_{VAO} \cdot Q_{VAO} - C_{VAO} \cdot [(Cp_1 - Cn_2) - (Ca_1 + Ca_2) \cdot Z_{N2}] = 0 \quad (3.22)$$

$$C_{VAO} = \frac{(\tau \cdot Q_{VAO0})^2}{(Ca_1 + Ca_2) \cdot (H_{10} - Z_{N2})} \quad (3.23)$$

A raiz positiva da equação de segundo grau (3.22) é:

$$Q_{VAO} = 0,5 \cdot \left[-C_{VAO} + \sqrt{C_{VAO}^2 + 4C_{VAO} \cdot [(Cp_1 - Cn_2) - (Ca_1 + Ca_2) \cdot Z_{N2}]} \right] \quad (3.24)$$

A equação 3.24 é equação do modelo da válvula antecipadora de onda (VAO) com descarga atmosférica.

3.3.2. Limitações do modelo

O modelo proposto deve ser utilizado apenas para vazões positivas, pois, caso contrário, ocorreria a aspiração de ar (pressão externa > pressão interna). O modelo foi formulado com base na descarga para a atmosfera, e a válvula antecipadora de onda foi projetada para a descarga de fluido, e não para a aspiração de ar o que poderia acarretar problemas na tubulação devido ao acúmulo de ar.

De acordo com a análise das pressões máxima e mínima de regulação, a pressão para o nó de instalação da VAO é considerada igual à pressão na válvula. Essa aproximação é válida, visto que a válvula é instalada próxima à tubulação. Desse modo, a diferença entre a pressão na válvula e no nó de instalação da VAO devem ser próximas. Ademais, alguns fabricantes utilizam o valor da pressão medido na válvula (com o auxílio de medidores de pressão embutidos na VAO), e outros fabricante utilizam o valor da pressão medido na própria linha, de modo a determinar as pressões máxima e mínima de regulação para a VAO.

O modelo não considera a contribuição do ar na tubulação, apenas o fluido principal é considerado (para todas as simulações desta dissertação o fluido principal é a água) .

3.4. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS COMO DADO DE ENTRADA PARA O MODELO DA VAO

As variáveis descritas a seguir foram calculadas com base no modelo sem proteção, por isso, a primeira simulação é sempre realizada com o propósito de estimar uma aproximação das variáveis importantes no modelo da VAO.

1) Pressão máxima de regulação

O valor da pressão deve estar entre a máxima e a mínima de regulação. Segundo o fabricante Saint-Gobain, o valor da pressão máxima de regulação deve ser 10% acima da pressão permanente no local de instalação da válvula.

2) Pressão mínima de regulação

Comanda o início da abertura da válvula, logo após a passagem da onda de subpressão. Segundo o fabricante Saint-Gobain, o valor da pressão mínima de regulação deve ser igual a 50% do valor da pressão permanente no local de instalação da válvula.

3) Coeficiente de descarga para a válvula

Parâmetro que varia de acordo com o percentual de abertura da válvula. Nesse trabalho, o coeficiente de descarga escolhido é o mesmo da válvula globo.

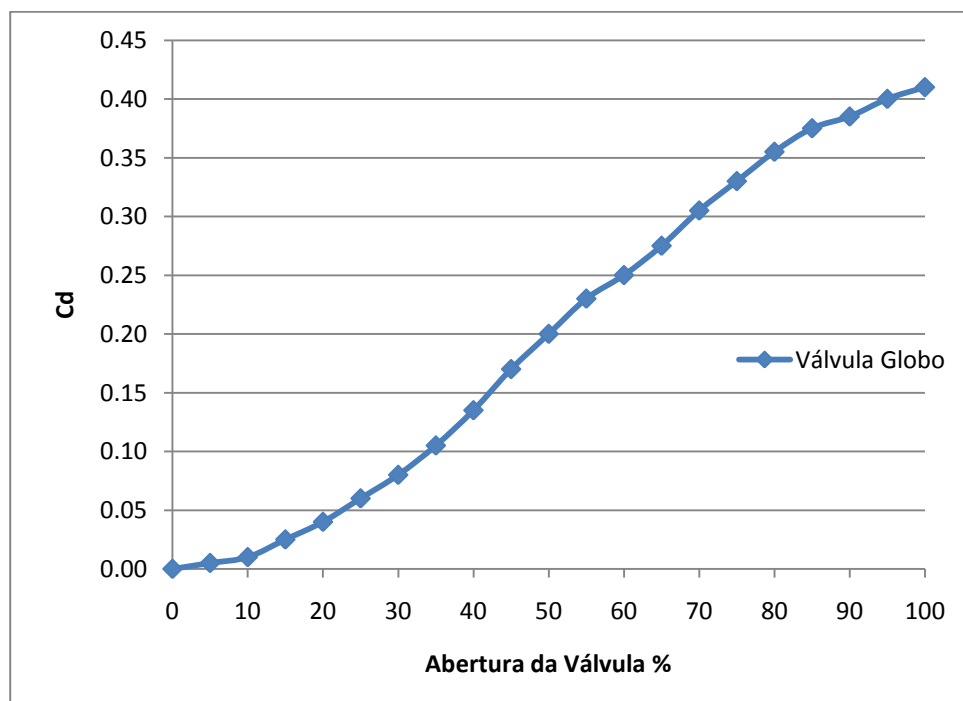


FIGURA 3. 3 - Coeficiente de descarga para válvula de tipo globo

Fonte: Hidraulic of pipelines, página 91

4) Diâmetro nominal da válvula

No anexo A e subitem sete, em “dimensionamento de válvulas”, apresenta-se uma abordagem para o pré-dimensionamento da válvula antecipadora de onda no cálculo do diâmetro nominal da válvula.

5) Tempo inicial de abertura da válvula

Quando a pressão mínima de regulação é superada, logo após a passagem da onda de baixa pressão a válvula começa a abrir.

6) Intervalo do tempo de abertura completo da válvula

Para um melhor entendimento, o exemplo de simulação conhecida por “Cuiá”, ilustra o tempo de abertura e outras variáveis (figura 3.4). A válvula começa a abertura logo após a passagem de onda de baixa pressão no tempo “10,22 s”, e está completamente aberta no tempo “11,78 s”.

Para uma proteção eficiente, a cota piezométrica da tubulação deve permanecer entre os limites máximo e mínimo de regulação. Para que isso ocorra, o intervalo tempo de abertura da válvula é aproximado da seguinte forma: logo após a passagem da onda de baixa pressão temos o tempo inicial de abertura da válvula TIAV, e quando a cota piezométrica atingir o valor da carga máxima de regulação é computado o tempo final de abertura da válvula TFAV a diferença entre o TFAV e TIAV é igual ao intervalo do tempo de abertura da válvula (ΔTAV).

7) Intervalo do tempo de permanência da válvula completamente aberta

Nas simulações deste trabalho, observou-se que a válvula deve permanecer completamente aberta por um período de 10 segundos. E segundo orientações de fabricantes, o período entre a abertura e o fechamento completo da válvula deve ser superior a 30 segundos.

8) Intervalo do tempo de fechamento completo da válvula

A válvula deve fechar lentamente para evitar transientes formados com o fechamento da válvula, por isso o intervalo do tempo de fechamento será fixado inicialmente em 30 segundos e as simulações serão realizadas com base nesse tempo.

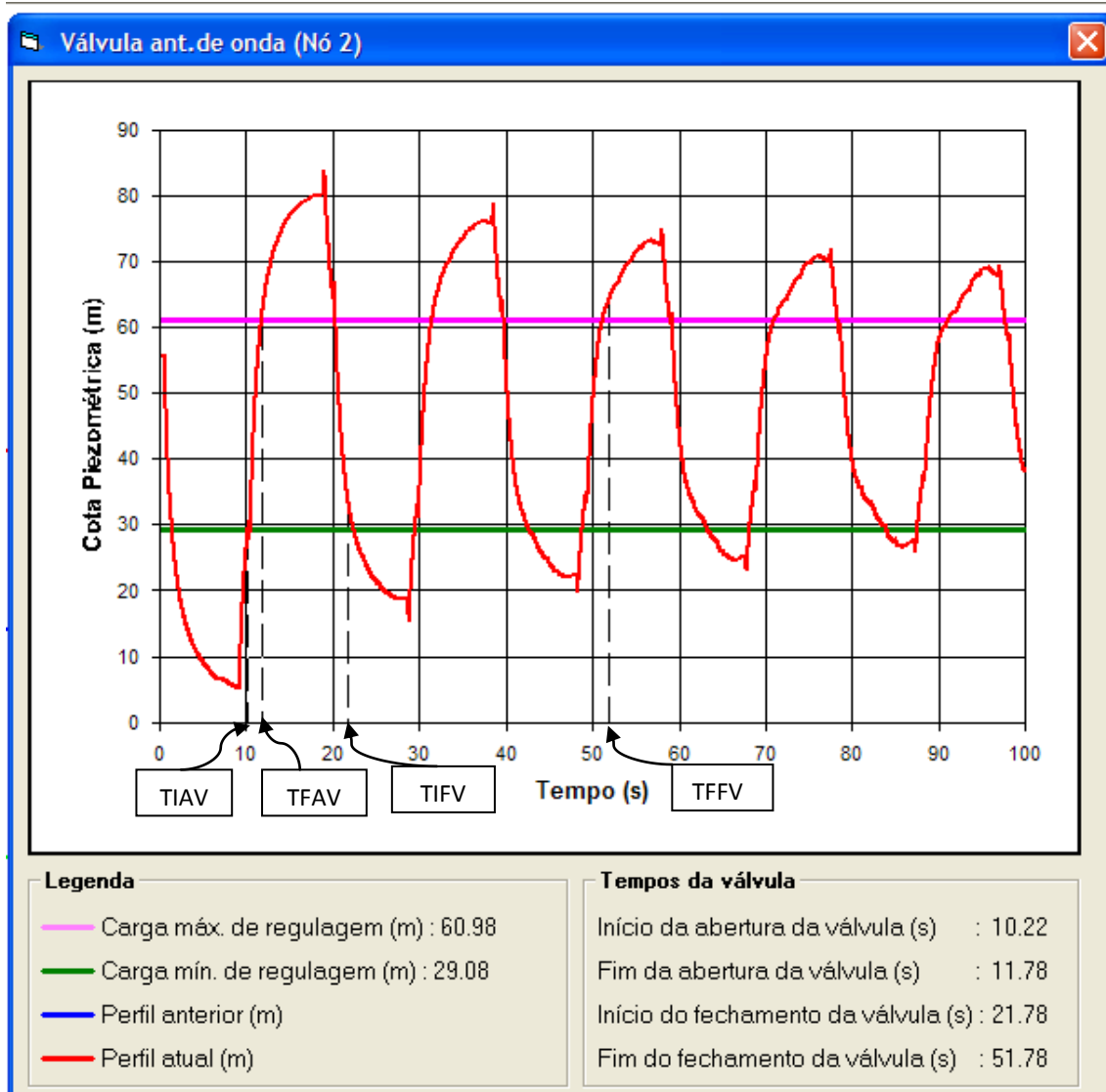


FIGURA 3. 4 - Tempos da válvula

A figura 3.4 ilustra um exemplo da simulação conhecida por “Cuiá”, que pode ser utilizado de modo a identificar os tempos da válvula que são os seguintes: tempo inicial de abertura da válvula TIAV, tempo final de abertura da válvula TFAV, tempo inicial de fechamento da válvula TIFV, tempo final de fechamento da válvula TFFV. Esses tempos são calculados com base na curva sem proteção, por isso, a necessidade de inicialmente rodar o programa sem proteção e em seguida rodar o programa com o modelo da válvula antecipadora de onda.

A tabela 3 resume os dados de entrada para a modelagem da válvula antecipadora de onda. Na terceira coluna é apresentado um exemplo da simulação conhecida por “Cuiá” com os respectivos dados de entrada do modelo.

TABELA 3 - Resumo dos dados de entrada do modelo

Variável	Valor de entrada	Valor exemplo (Cuiá)
P _{máxR}	10% acima da pressão permanente no local de instalação	58.48 mca
P _{minR}	50% da pressão permanente no local de instalação	26.58 mca
C _d	Coeficiente de descarga para uma válvula do tipo globo	Gráfico do coeficiente em função da abertura
DN	Dimensionado com base no coeficiente K _v e no critério de velocidade máxima permissível (anexo A)	Modelo conservativo: 100mm Modelo alternativo: 75 mm
T _{IAV}	Calculado com base na pressão mínima de regulação	10.22 s
ΔT _{AV}	Calculado com base nas pressão máxima e mínima de regulação	1.56 s
ΔT _{PVA}	Igual a 10 segundos	10 s
ΔT _{FBV}	Igual a 30 segundos	30 s

3.5. ZONAS DE TRANSIENTE HIDRÁULICO PARA A VAO

As cinco zonas descritas a seguir são uma forma de explicar e dividir, o gráfico da cota piezométrica em função do tempo, de acordo com o comportamento da válvula antecipadora de onda. Nessa análise, considera-se que a válvula inicia a sua abertura logo após a passagem da onda de subpressão. Onde a válvula tem um intervalo de tempo para a abertura, permanece aberta por um período de tempo e em seguida fecha completamente.

1) Zona 1; $0 \leq t < T_{IAV}$

Sendo anterior a abertura da válvula (quando a válvula está dimensionada corretamente), a região é caracterizada pela influência do transiente gerado pelo sistema motor-bomba (figura 3.5), no caso de interrupção do bombeamento, o gráfico é caracterizado pelo início da onda de baixa pressão.

Quando a válvula inicia a abertura nessa zona, pode ocorrer transientes em decorrência da tendência de decaimento da pressão somado ao alívio da pressão devido à abertura da válvula antecipadora de onda.

2) Zona 2; $TIAV \leq t \leq TFAV$

Caracterizada pelo início de abertura da válvula e a tendência de pressão ascendente (figura 3.5), assim o efeito da abertura de válvula, é o amortecimento da onda de sobrepressão. Pois a válvula inicia a abertura logo após a passagem da onda de subpressão.

Nessa região do gráfico da figura 3.5, observa-se que uma pressão mínima de regulação muito baixa, pode ocasionar um amortecimento em um nível de baixa pressão, formando ondas de subpressão seguido por ondas de sobrepressão, o que pode acarretar em transientes indesejáveis.

3) Zona 3; $TFAV < t \leq TIFV$

A válvula está completamente aberta e continua com a sua função de alívio de pressão, porém nesse caso, a área de abertura assume um valor máximo.

O tempo em que a válvula permanece aberta pode ser utilizado como um ajuste para o tempo total da válvula, nesse trabalho considera-se o um tempo de 10 segundos.

4) Zona 4; $TIFV < t \leq TFFV$

Devido à mudança de fluxo, acrescido da alteração na válvula de completamente aberta para o procedimento de fechamento, ocorre uma perturbação no sistema. Assim para o intervalo do tempo de fechamento pequeno, pode ocorrer a formação de transientes indesejáveis.

No caso de um intervalo do tempo de fechamento muito baixo, o efeito da mudança de abertura para o fechamento ocorre com um tempo de transição relativamente pequeno. Por isso, nesse trabalho, o intervalo do tempo de fechamento da válvula deve ser suficiente para amortecer o efeito da perturbação, sendo fixado em 30 segundos.

5) Zona 5; $TFFV < t \leq TS$

Essa é a zona de pós-abertura da válvula. No caso de um dimensionamento adequado é caracterizada pelo gráfico amortecido. Muito importante na análise da mudança repentina da pressão na tubulação. O estudo dessa região pode evitar falsos resultados.

Assim, quando o gráfico é pouco amortecido em relação ao gráfico sem proteção, mesmo que a pressão máxima seja relativamente menor, o resultado disso pode ser a danificação da tubulação e equipamentos.

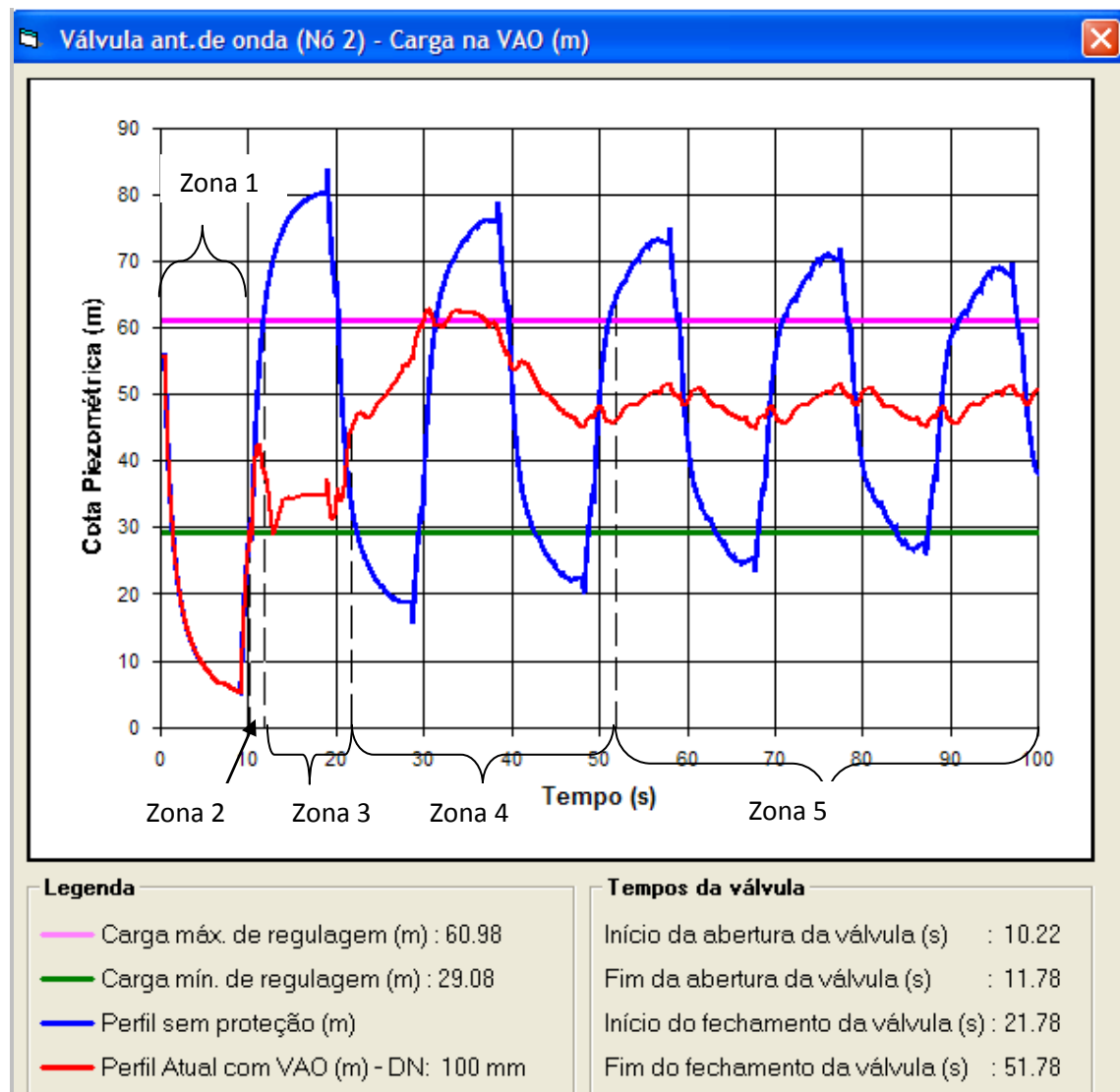


FIGURA 3. 5 - Zonas do transiente para a VAO

3.6. INTERPOLAÇÃO LINEAR PARA O CÁLCULO DO TAU

Neste trabalho, o método da interpolação linear será utilizado para estimar o valor do parâmetro τ . A interpolação linear é um método que utiliza um polinômio de primeiro grau para aproximar uma função qualquer, num intervalo definido.

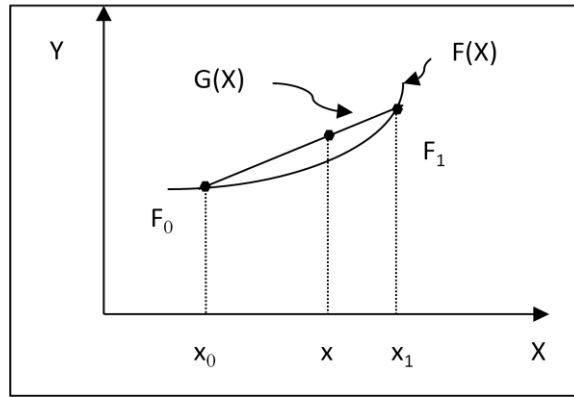


FIGURA 3. 6 - Interpolação linear

Com base no gráfico da figura 3.6, observam-se as seguintes relações:

$$F_0 = F(x_0) = G(x_0) \quad (3.25)$$

$$F_1 = F(x_1) = G(x_1) \quad (3.26)$$

A tangente formada pela reta F_0F_1 pode ser relacionada como segue:

$$\frac{F(x_1) - F(x_0)}{x_1 - x_0} = \frac{G(x) - F(x_0)}{x - x_0} \quad (3.27)$$

Organizando os termos da equação (3.27), temos:

$$G(x) = F_0 \left(\frac{x_1 - x_0}{x_1 - x_0} \right) + \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) [F_1 - F_0] \quad (3.28)$$

Para um pequeno intervalo, a seguinte aproximação é válida:

$$F(x) \approx G(x) \quad (3.29)$$

Desse modo, substituindo a equação (3.29) na equação (3.28), obtemos:

$$F(x) = F_0 \left(\frac{x_1 - x_0}{x_1 - x_0} \right) + \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) [F_1 - F_0] \quad (3.30)$$

Organizando os termos da equação (3.30), temos a equação para uma aproximação polinomial de primeira ordem.

$$F(x) = F_0 \left(\frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \right) + F_1 \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) \quad (3.31)$$

Para cálculo do τ da válvula, empregou-se o método da interpolação linear. Sendo os intervalos dos tempos de abertura e fechamento conhecidos, pode-se determinar o valor do τ no instante da abertura e fechamento da válvula. Na análise a seguir, será considerado o intervalo do tempo de abertura da válvula. Logo, por analogia, a análise deve ser estendida para os intervalos dos tempos de fechamento e permanência da válvula aberta.

- 1) Conhecidos os valores do coeficiente de descarga C_d da válvula, divide-se o intervalo do tempo de abertura da válvula da seguinte forma:

$$\Delta TAV_{\text{sub}} = \frac{\Delta TAV}{\text{Número de intervalos}} = \frac{\Delta TAV}{j - 1} \quad (3.32)$$

Onde:

ΔTAV é o intervalo do tempo de abertura da válvula;

j é o número de pontos, passo de tempo da válvula;

ΔTAV_{sub} é o subintervalo do tempo da abertura da válvula.

$$\Delta TAV = \Delta TAV_{\text{sub}} \cdot (j - 1) \quad (3.33)$$

Assim, para o início da abertura ($j = 1$), as relações são as seguintes:

$$A_1 = 0 \quad (3.34)$$

$$C_{d1} = 0 \quad (3.35)$$

$$\tau_1 = \frac{C_{d1} \cdot A_1}{(C_d \cdot A)_0} \quad (3.36)$$

Onde $(C_d \cdot A)_0$ é o valor de referência da área e do coeficiente de descarga, ambos para a válvula completamente aberta para a condição de estado estacionário.

Com base no gráfico da figura 3.3, a variável τ é dividida em j pontos, e esses valores são utilizados na interpolação a seguir:

- 2) Para determinar o valor de τ , considerando o passo de tempo do programa, deve-se interpolar o valor de τ calculado no passo anterior, entre os pontos j e $j-1$, da seguinte forma:

Para $T_i \geq T_{IAV}$ a válvula começa o procedimento de abertura (observe a linha temporal da figura 3.7), desse modo:

$$T_i = (i - 1) \cdot DT \quad (3.37)$$

$$TRAV_{(k)} = T_i - T_{IAV} \quad (3.38)$$

Para $\Delta TAV_{(j-1)} \leq TRAV_{(k)} < \Delta TAV_{(j)}$ a equação abaixo é válida.

$$\tau_{INT}(TRAV_{(k)}) = \tau_{(j-1)} \left(\frac{TRAV_{(k)} - \Delta TAV_{(j)}}{\Delta TAV_{(j-1)} - \Delta TAV_{(j)}} \right) + \tau_{(j)} \left(\frac{TRAV_{(k)} - \Delta TAV_{(j-1)}}{\Delta TAV_{(j)} - \Delta TAV_{(j-1)}} \right) \quad (3.39)$$

Onde:

i é o passo de tempo contado a partir do início da simulação, sendo igual a 1 para o início da simulação

k é o passo de tempo contado a partir do início da abertura da válvula, sendo igual a 1 para o início da abertura

τ_{INT} é o valor interpolado considerando o passo de tempo da simulação

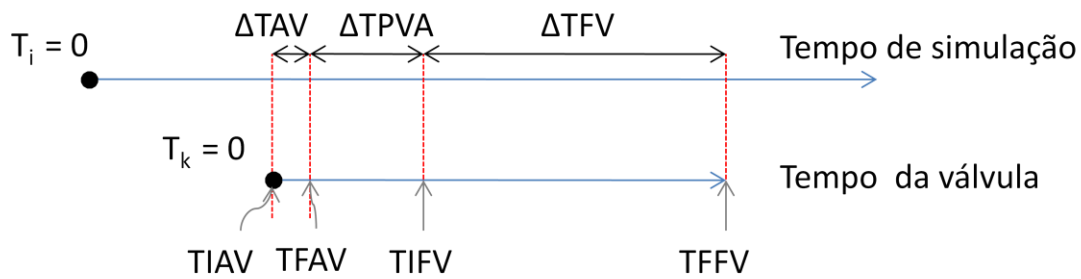
T_i é o tempo de simulação do transiente no passo de tempo i

T_{IAV} é o tempo inicial de abertura da válvula

$TRAV_k$ é o tempo relativo de abertura da válvula no passo de tempo k .

A equação 3.39 representa a interpolação do τ para a abertura da válvula antecipadora de onda para cada passo de tempo. Essa interpolação é efetuada para cada passo de tempo até encerrar o procedimento de abertura da válvula.

De modo análogo, pode-se determinar o valor de τ para o intervalo do tempo de fechamento da válvula e para o intervalo do tempo de permanência da válvula aberta.



Legenda

TIAV	Tempo inicial de abertura da válvula
TFAV	Tempo final de abertura da válvula
TIFV	Tempo inicial de fechamento da válvula
TFFV	Tempo final de fechamento da válvula
ΔTAV	Intervalo do tempo de abertura da válvula
$\Delta TPVA$	Intervalo do tempo de permanência da válvula aberta
ΔTFV	Intervalo do tempo de fechamento da válvula

FIGURA 3. 7 - Linha temporal da válvula e da simulação

3.7. DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE LÍQUIDO DESCARREGADO PELA VAO E VELOCIDADE MÁXIMA

Para o cálculo do volume de fluido descarregado pela VAO é necessário determinar o valor da vazão da VAO para cada passo de tempo, e então utilizar algum método de integração numérica para a resolução da seguinte equação:

$$\text{Vol}(t) = \int_{TIAV}^t Q_V \cdot dt \quad (3.40)$$

O volume total é relacionado pela seguinte equação:

$$\text{Volume total} = \int_{TIAV}^{TFFV} Q_V \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} Q_V \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} Q_V \cdot dt + \dots + \int_{t_{k-1}}^{t_k} Q_V \cdot dt \quad (3.41)$$

Onde

k é o número de passos de tempo no cálculo da vazão da VAO

t_1 é o tempo inicial de abertura da válvula TIAV.

Utilizando a regra do trapézio para a integração numérica da equação (3.41) no intervalo de tempo k e $k+1$ (figura 3.8), obtemos:

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} Q_V dt = \frac{(t_{k+1} - t_k)(Q_{k+1} - Q_k)}{2} + (t_{k+1} - t_k)Q_k = \frac{(t_{k+1} - t_k)}{2}(Q_k + Q_{k+1}) \quad (3.42)$$

Logo, com base na regra do trapézio, a equação para o volume total (3.41) pode ser expressa assim:

$$\text{Volume total} = \int_{TIAV}^{TFFV} Q_V \cdot dt = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(t_{k+1} - t_k)}{2} (Q_k + Q_{k+1}) \quad (3.43)$$

A vazão é máxima quando a velocidade e a área são máximas.

$$Q_{V_{Máx}} = V_{Máx} \cdot A_{V_{ABT}} \quad (3.44)$$

Onde:

$k = n$, é o número total de passos de tempo para o cálculo da vazão

$V_{Máx}$ = A velocidade máxima

$A_{V_{ABT}}$ = A área total de abertura da válvula.

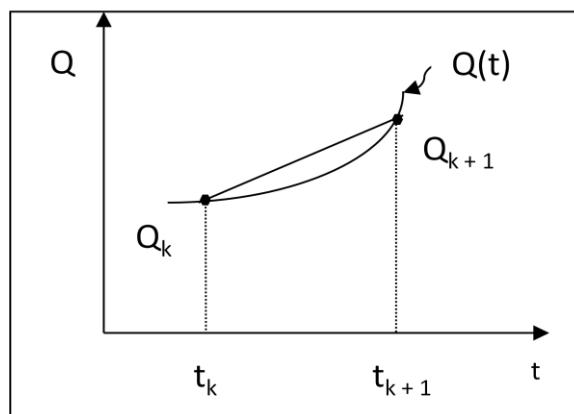


FIGURA 3. 8 - Integração numérica

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para este trabalho foi utilizado adutora sertaneja proposta por Barbosa (2006), a Adutora Cuiá e as simulações que serão designadas por “A”, “B”, “C” e “D”. O programa utilizado no cálculo do golpe aríete, nas simulações e comparações dos resultados foi o UFC6, produzido no Grupo de Estudos em Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Ceará.

O foco deste trabalho é verificar a válvula antecipadora de onda (VAO) como mecanismo atenuador do golpe de aríete e os problemas provocados com o dimensionamento inadequado da válvula, além de comparar com a válvula de alívio.

As simulações foram realizadas considerando a abertura completa e o fechamento completo de uma válvula do tipo globo. Com abertura conhecida, coeficiente de descarga conhecido e “ τ ” calculado a partir dos valores dos intervalos, do tempo de abertura, do tempo de permanência da válvula completamente aberta e do tempo de fechamento da válvula, utilizando para isso o método de interpolação linear.

A válvula antecipadora de onda deve situar-se próxima da bomba, e de preferência na mesma cota da bomba, por isso, a obrigatoriedade da localização da VAO no segundo nó.

Na maioria dos gráficos representados pela cota piezométrica em relação à distância horizontal, as envoltórias mínimas coincidem. Isso se deve ao fato da válvula, quando dimensionada corretamente não influenciar nas pressões mínimas.

Com o intuito de organizar este trabalho, a tabela 4 foi elaborada, esta resume as simulações subsequentes, e os seus objetivos.

TABELA 4 - Resumo das simulações

Análise	Objetivo
Simulação Adutora	Verificar o tempo de simulação
Simulação Cuiá	Verificar o DN (mm) e os efeitos do subdimensionamento e superdimensionamento da válvula.
Simulação A	Transiente gerado devido à abertura repentina da válvula
Simulação B	Transiente gerado devido ao intervalo do tempo de fechamento inadequado
Simulação C	Simulação com valores ótimos
Simulação D	Simulação com valores ótimos
DN	Válvulas subdimensionadas e superdimensionadas
TIAV	Verificar o comportamento da variável antes e depois do início da abertura da válvula
ΔTAV	Verificar a formação de transiente para os intervalos dos tempos de abertura maiores e menores do que o padrão
$\Delta TPVA$	Verificar a influência do intervalo do tempo de permanência da válvula completamente aberta na proteção contra transiente
ΔTFV	Verificar a influência do intervalo do tempo de fechamento da válvula na proteção contra transiente
Válvula de Alívio	Comparar a válvula de alívio com a válvula antecipadora de onda

4.1. SIMULAÇÃO ADUTORA SERTANEJA – ANÁLISE DO TS

A adutora será dividida em 23 nós, onde o primeiro nó é a bomba e o último nó é um reservatório de nível constante, e o número de divisões do menor trecho é igual a sete. A tabela 5 resume os dados de entrada dessa simulação.

O material da tubulação é Ferro Fundido Dúctil Classe K7, com rugosidade de 0,26 mm, módulo de elasticidade de 172 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,28; diâmetro interno de 0,1546 m e espessura de 7,7 mm.

TABELA 5 - Dados do trecho da adutora Sertaneja

Trecho	Cmont (m)	Cjus (m)	L(m)	DN (mm)
1	254,00	262,70	500	150
2	262,70	251,20	300	150
3	251,20	267,00	400	150
4	267,00	246,00	700	150
5	246,00	273,00	800	150
6	273,00	259,20	400	150
7	259,20	269,50	500	150
8	269,50	260,00	900	150
9	260,00	273,00	400	150
10	273,00	273,00	600	150
11	273,00	309,70	1200	150
12	309,70	296,10	400	150
13	296,10	318,50	400	150
14	318,50	307,50	200	150
15	307,50	347,50	700	150
16	347,50	323,50	200	150
17	323,50	357,20	800	150
18	357,20	321,80	500	150
19	321,8	344,20	300	150
20	344,20	325,70	300	150
21	325,70	365,00	500	150
22	365,00	358,50	300	150

4.1.1. Tempo de simulação 60s

O volume total de água expulsa, a vazão máxima, as cotas piezométricas na válvula e na bomba foram calculadas para a válvula antecipadora de onda com os dados de entrada mostrados na tabela 6.

TABELA 6 - Dados de entrada da VAO

Variáveis	TIAV	ΔTAV	$\Delta TPVA$	$\Delta T FV$	PmínR	PmáxR	DN
Valor	18,33	1,00	1,00	30,00	89,21	196,26	25
Unidade	s	s	s	s	mca	mca	mm

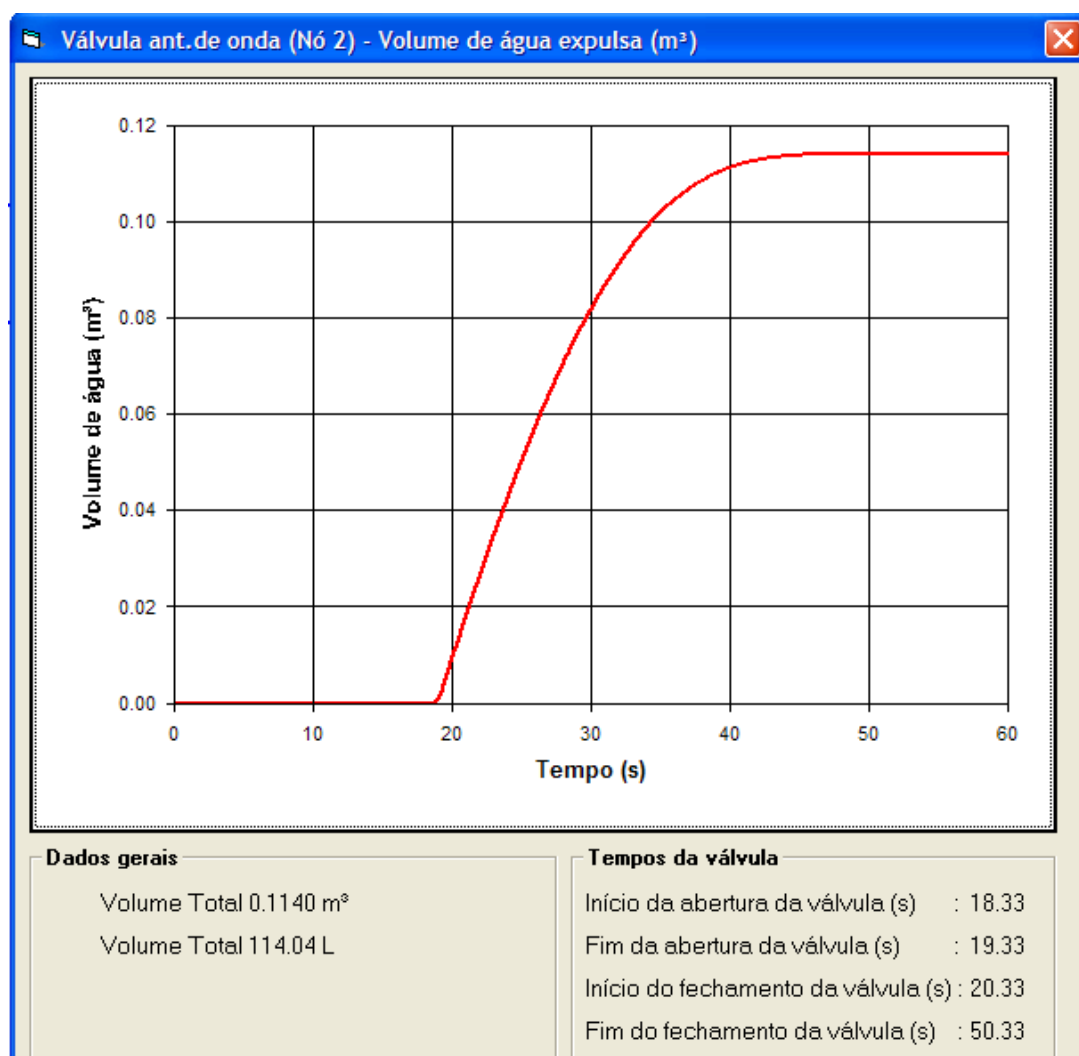


FIGURA 4. 1 - Gráfico do volume de água expulsa

O valor máximo da vazão se localiza no ponto onde a válvula está completamente aberta, no final da abertura da válvula, no qual a área é máxima e o coeficiente de descarga é máximo.

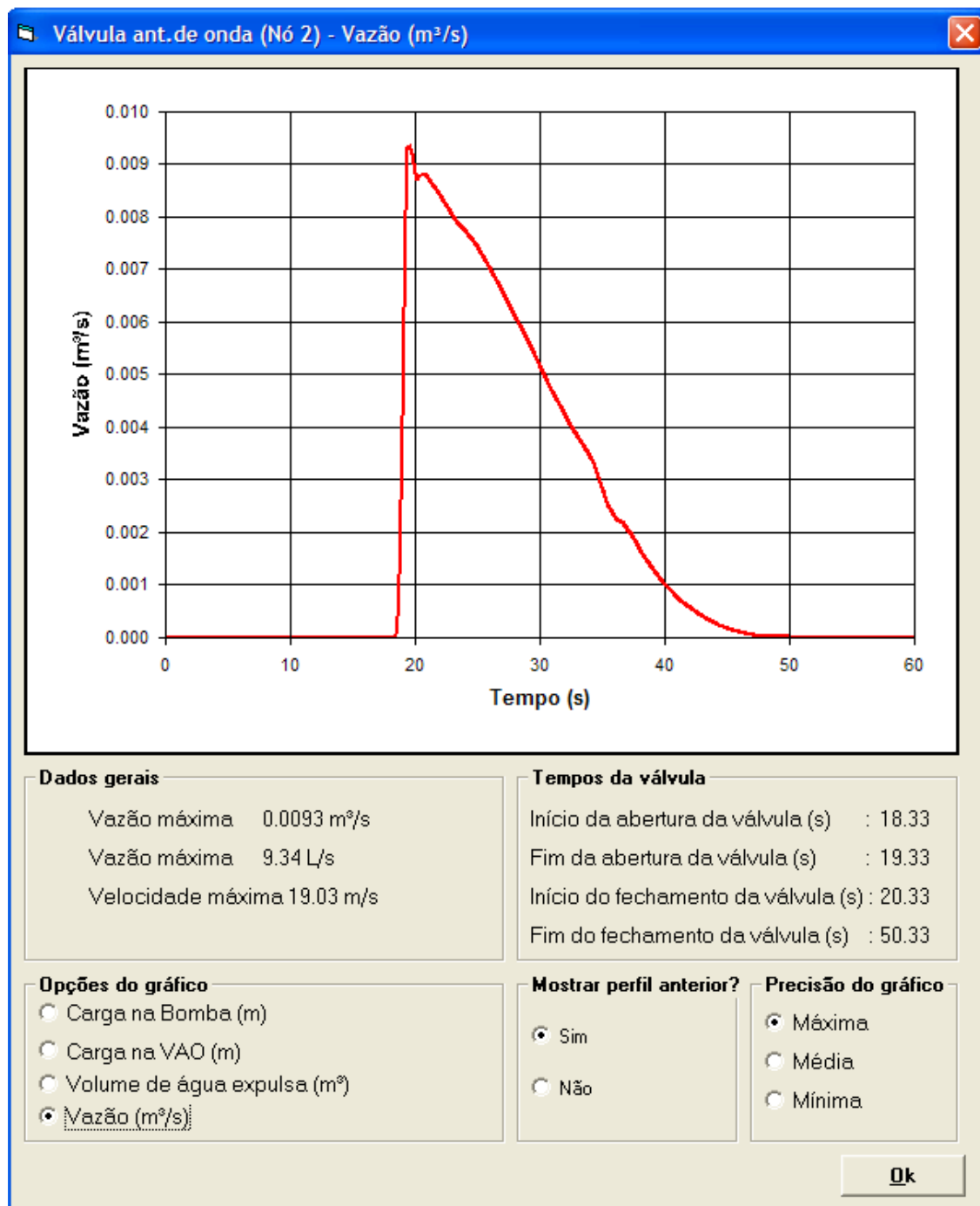


FIGURA 4. 2 - Gráfico vazão de água na VAO

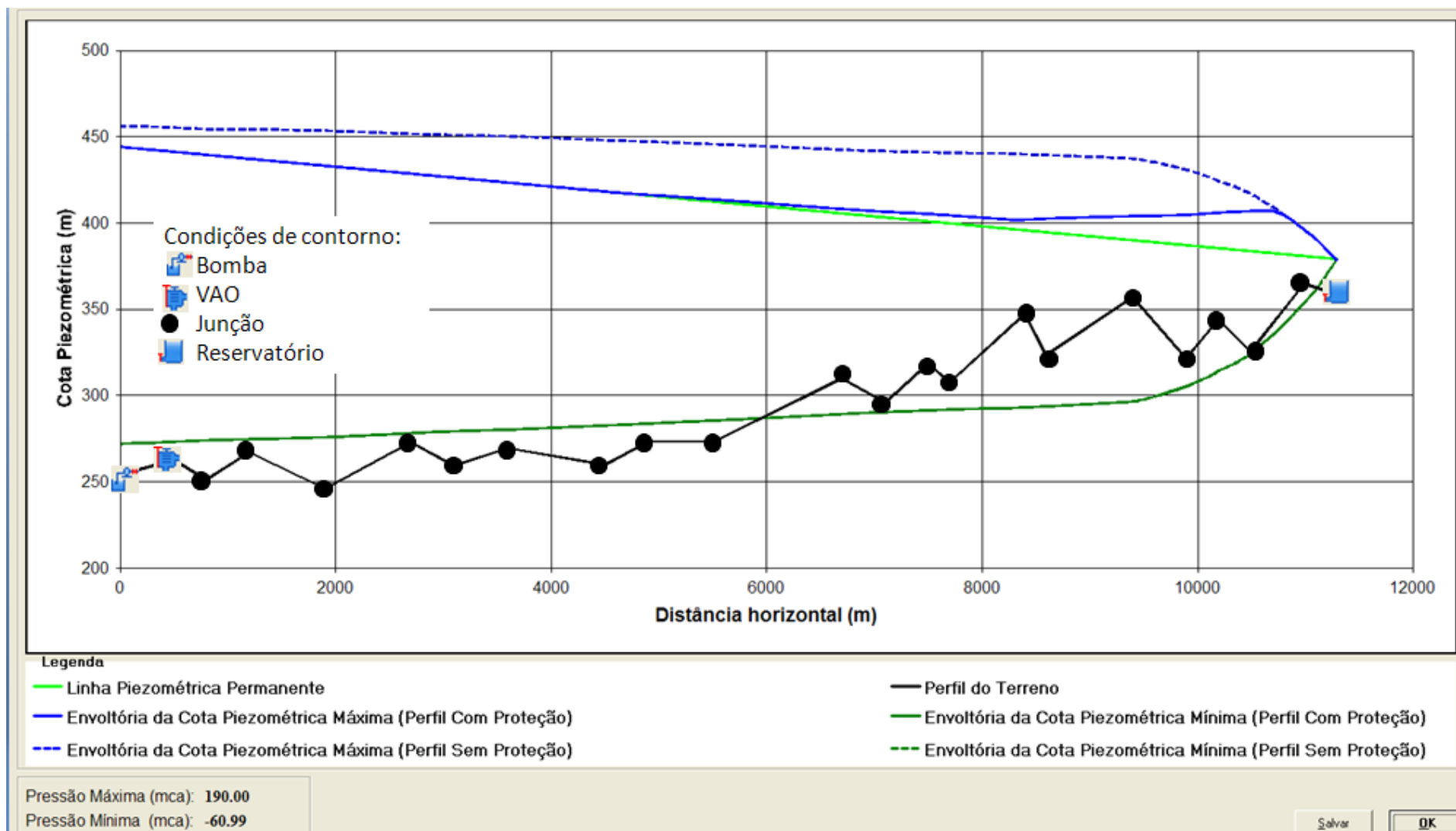


FIGURA 4. 3 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas TS de 60 s

TABELA 7 - Dados do nó da adutora Sertaneja

Nó	Cota(m)	Hperm(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pperm(mca)	Pmáx(mca)	Pmin(mca)
1	254,00	444,00	444,00	271,77	190,00	190,00	17,77
5	246,00	433,06	433,06	275,52	187,06	187,06	29,52
6	273,00	428,45	428,45	277,89	155,45	155,45	4,89
7	259,20	426,15	426,15	278,98	166,95	166,95	19,78
8	269,50	423,27	423,27	279,94	153,77	153,77	10,44
9	260,00	418,09	418,09	282,38	158,09	158,09	22,38
10	273,00	415,78	415,78	283,47	142,78	142,78	10,47
11	273,00	412,33	412,33	285,19	139,33	139,33	12,19
12	309,70	405,42	405,42	288,96	95,72	95,72	-20,74
13	296,10	403,11	403,13	290,09	107,01	107,03	-6,01
14	318,50	400,81	403,78	291,09	82,31	85,28	-27,41
15	307,50	399,66	403,79	291,60	92,16	96,29	-15,9
16	347,50	395,63	403,45	292,87	48,13	55,95	-54,63
17	323,50	394,48	403,24	293,43	70,98	79,74	-30,07
18	357,20	389,87	403,7	296,21	32,67	46,50	-60,99
19	321,80	386,99	404,43	305,17	65,19	82,63	-16,63
20	344,20	385,26	405,74	314,01	41,06	61,54	-30,19
21	325,70	383,54	406,61	323,91	57,84	80,91	-1,79
22	365,00	380,66	396,28	353,56	15,66	31,28	-11,44
23	358,50	378,93	378,93	378,93	20,43	20,43	20,43

A tabela 7 apresenta o resultado da simulação para cada nó, com a válvula antecipadora de onda como mecanismo de alívio da pressão. Pode-se observar no gráfico da figura 4.3 e na tabela 7 que a pressão máxima é igual à pressão permanente dos nós 1 até 12. No gráfico a carga mínima não é modificada com a VAO.

A válvula antecipadora de onda começa a abertura com tempo igual a 18,33s; Logo após a passagem da onda de baixa pressão. A pressão mínima é localizada antes da abertura da válvula, por isso, que o valor da envoltória mínima não foi modificado (linha verde do gráfico da figura 4.3). Considerando que o diâmetro da válvula é adequado, a envoltória mínima não deve ser modificada.

- Atenuação do transiente na válvula

No gráfico da figura 4.4, pode-se observar a ocorrência, logo após o início da abertura da válvula (zona 2), de um pico de cota piezométrica e a partir desse ponto, a cota piezométrica sofre um decréscimo. Isso ocorre, pois a válvula está completamente aberta, aliviando a pressão na tubulação com a área máxima de abertura.

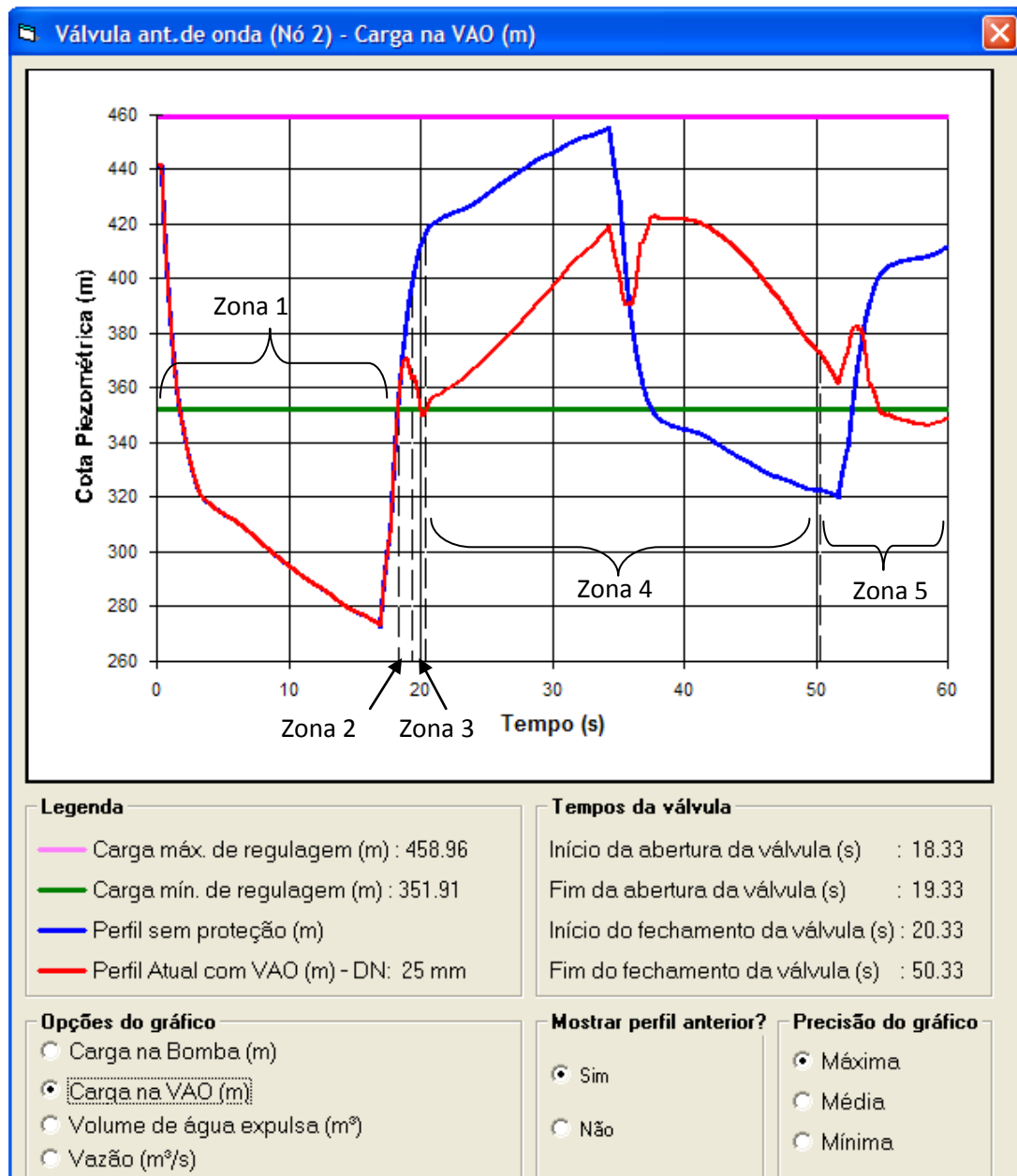


FIGURA 4. 4 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na bomba

Considerando que a válvula está próxima da bomba, os gráficos do transiente para primeiro nó (bomba) e para o segundo nó (válvula antecipadora de onda) são semelhantes.

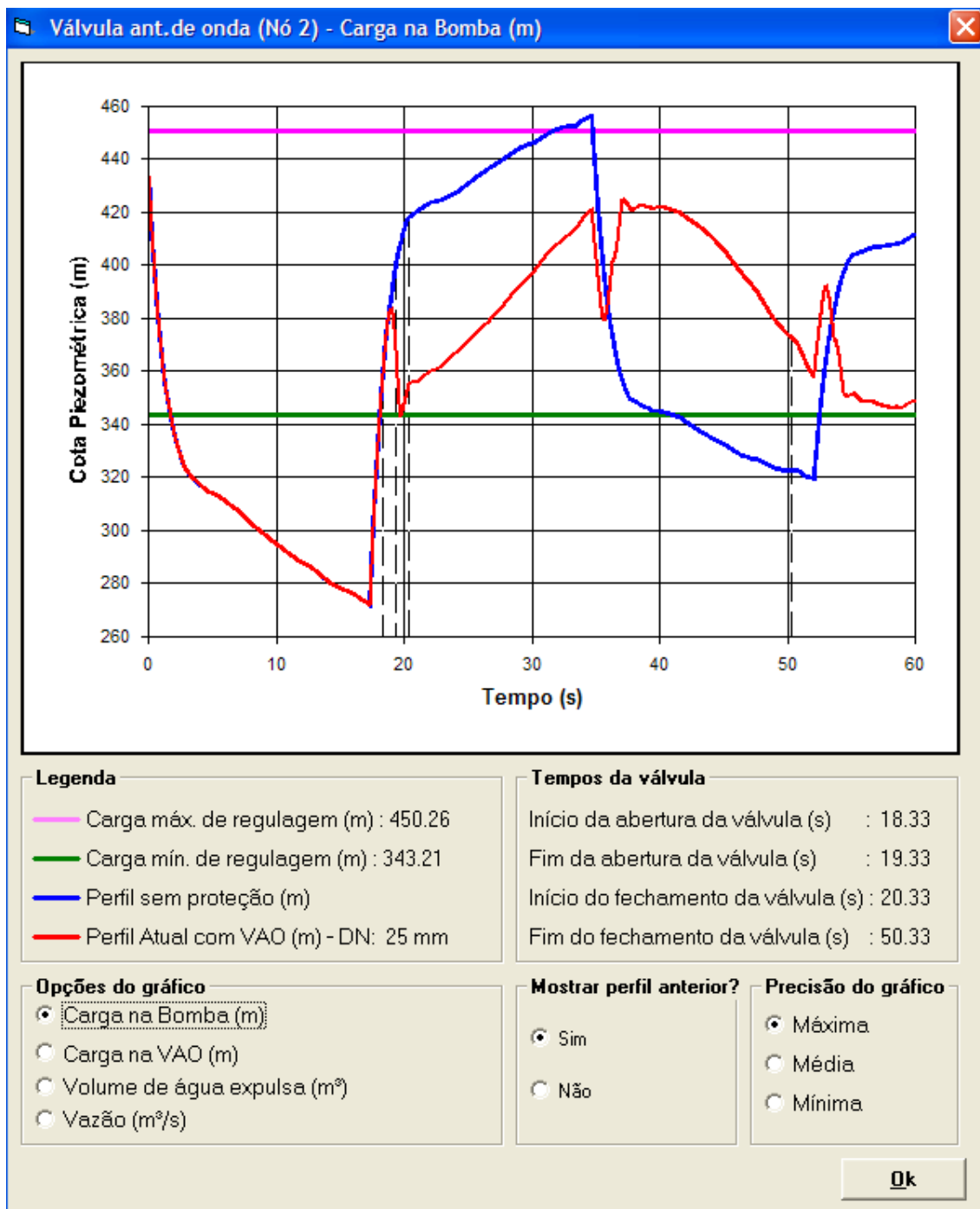


FIGURA 4. 5 - Gráfico do transiente na bomba

4.1.2. Tempo de simulação 120s

Com os mesmos dados de entrada da simulação com tempo de simulação (TS) de 60s, os gráficos das figuras 4.6 até 4.10 foram obtidos.

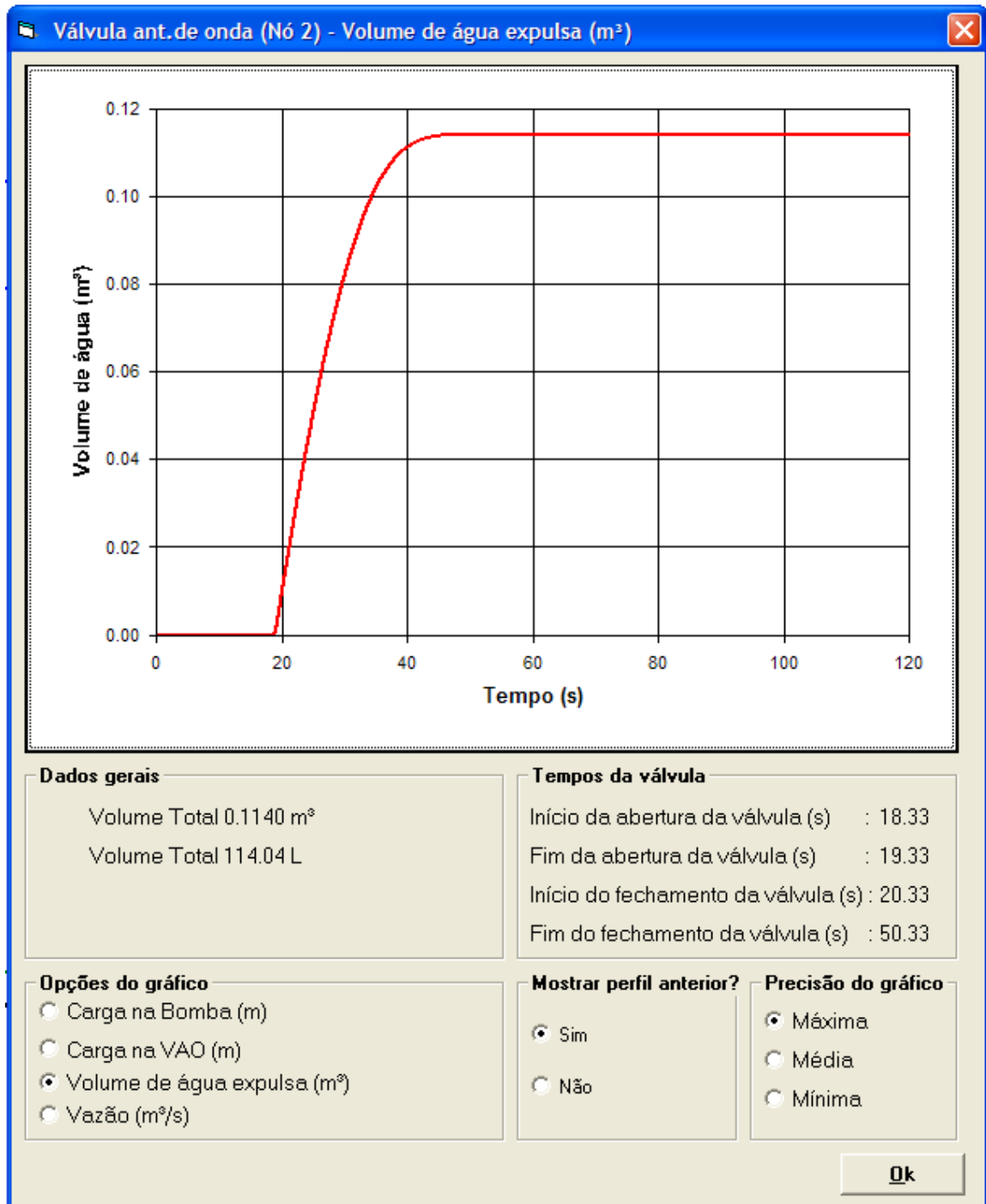


FIGURA 4. 6 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

No gráfico da figura 4.7, o valor máximo da vazão se localiza entre o fim da abertura da válvula e o começo do fechamento, onde área é máxima.

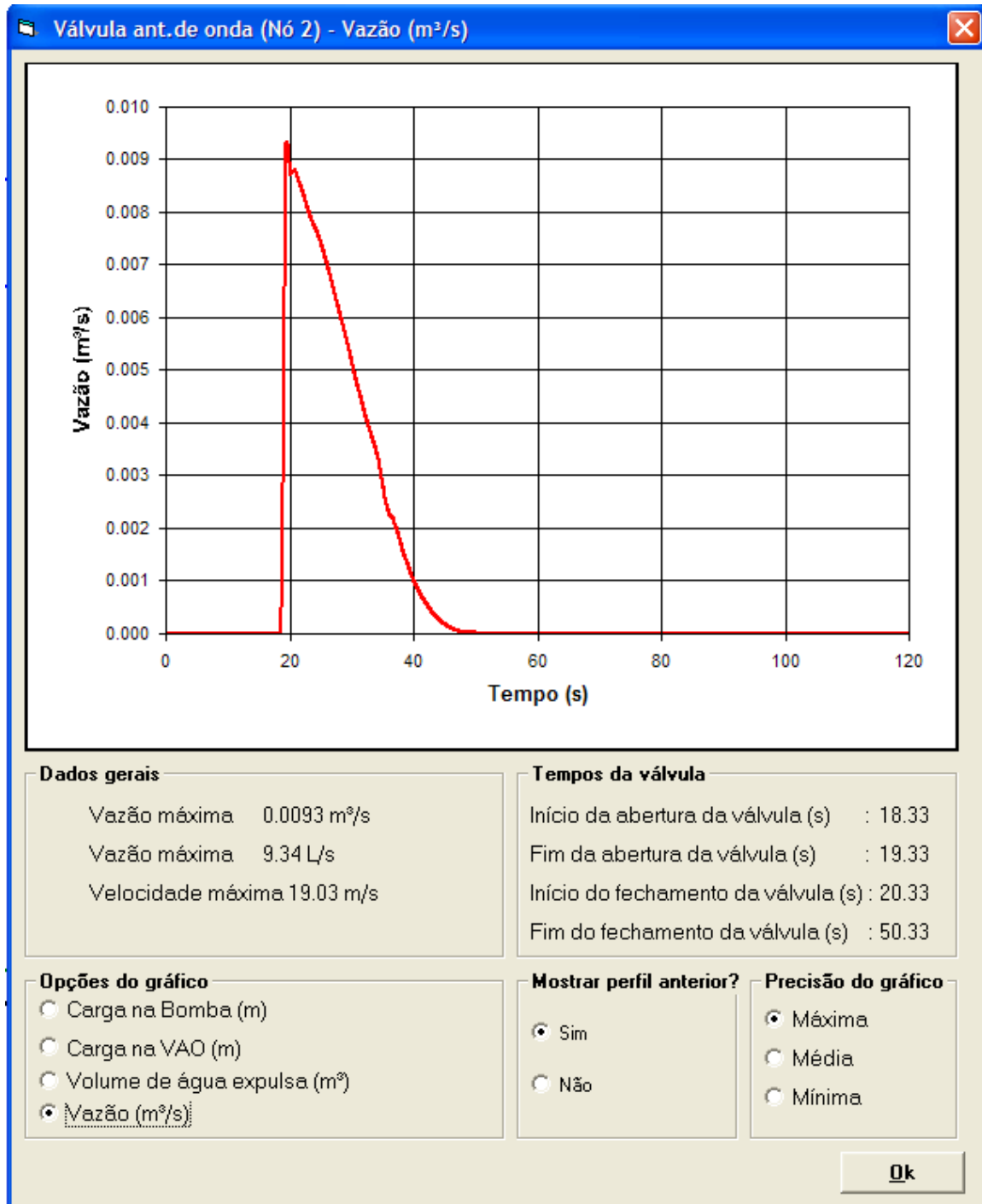


FIGURA 4. 7 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

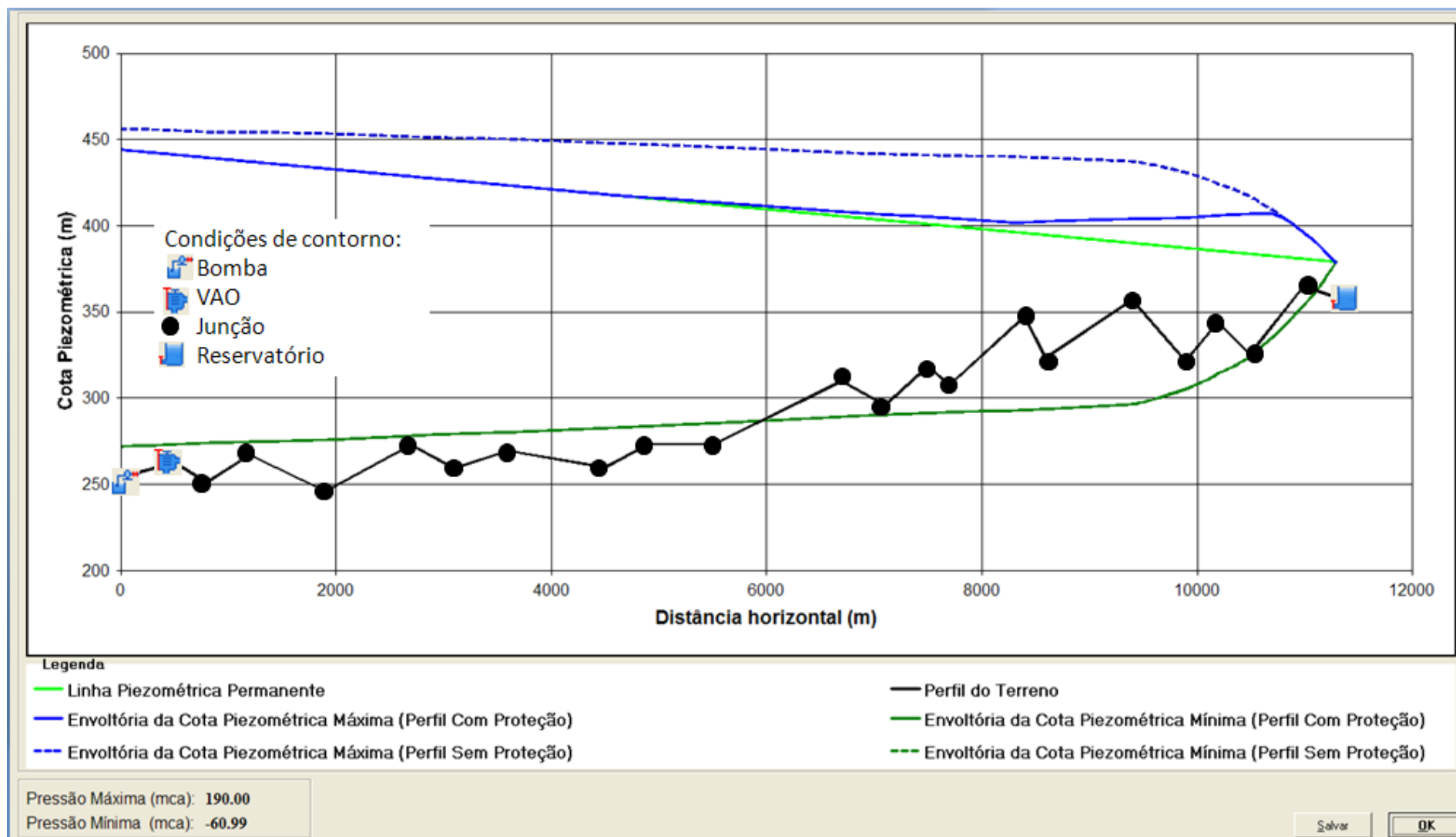


FIGURA 4. 8 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas TS de 120 s

- Atenuação do transiente na válvula

A diferença entre o gráfico da figura 4.4 e o da figura 4.9 é o tempo de simulação (TS). Desse modo, pode-se observar que com um tempo de simulação de 60 segundos a visualização do amortecimento da onda não é adequada. Por isso foi necessário um tempo de simulação que permitisse a visualização do amortecimento da onda na zona 5 do transiente para a válvula, indicado pelo gráfico da figura 4.9.

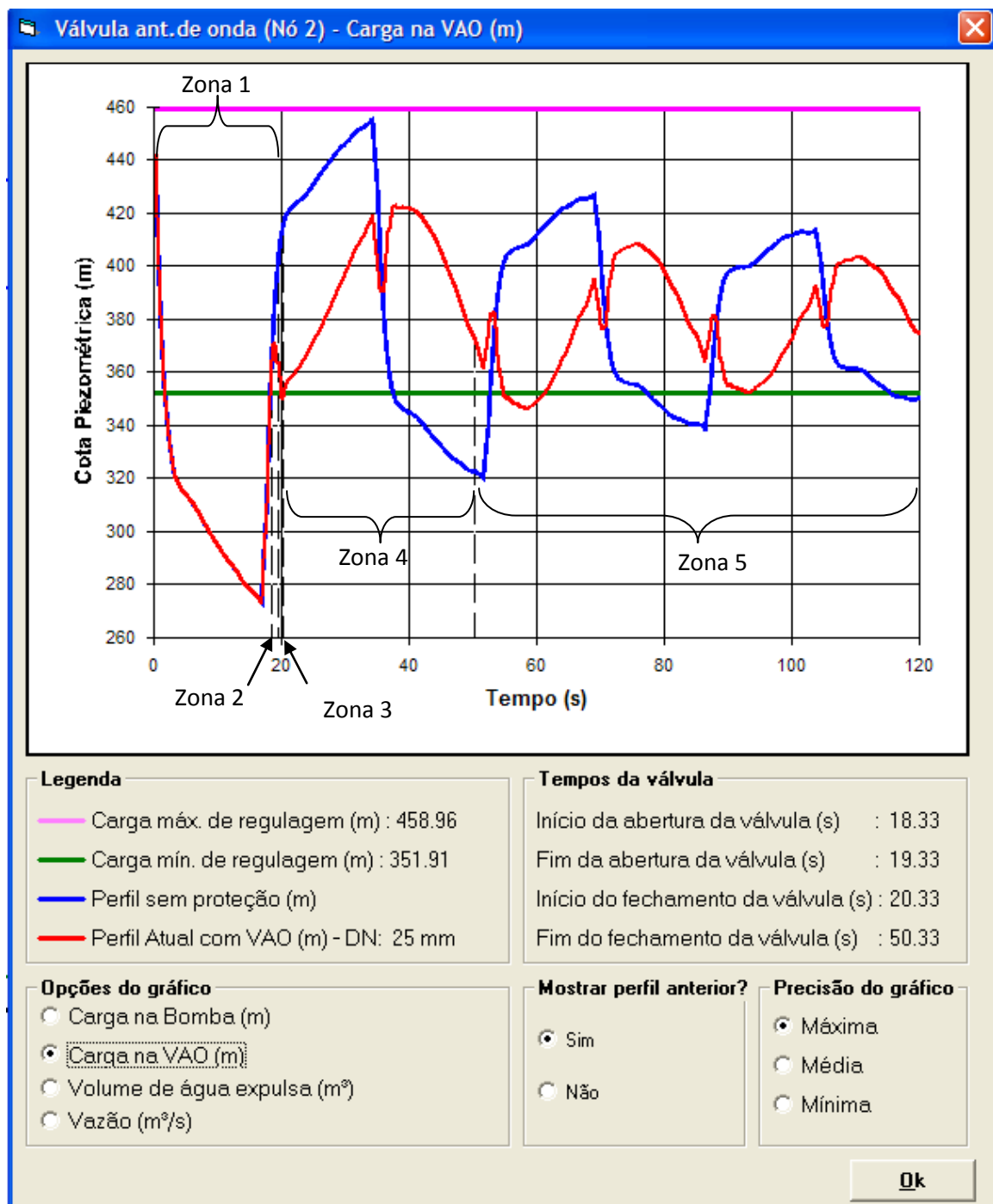


FIGURA 4. 9 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na bomba

O gráfico da figura 4.10 apresenta um comportamento semelhante ao gráfico da figura 4.9, devido à proximidade da válvula antecipadora de onda (nó 2) em relação à bomba (nó 1).

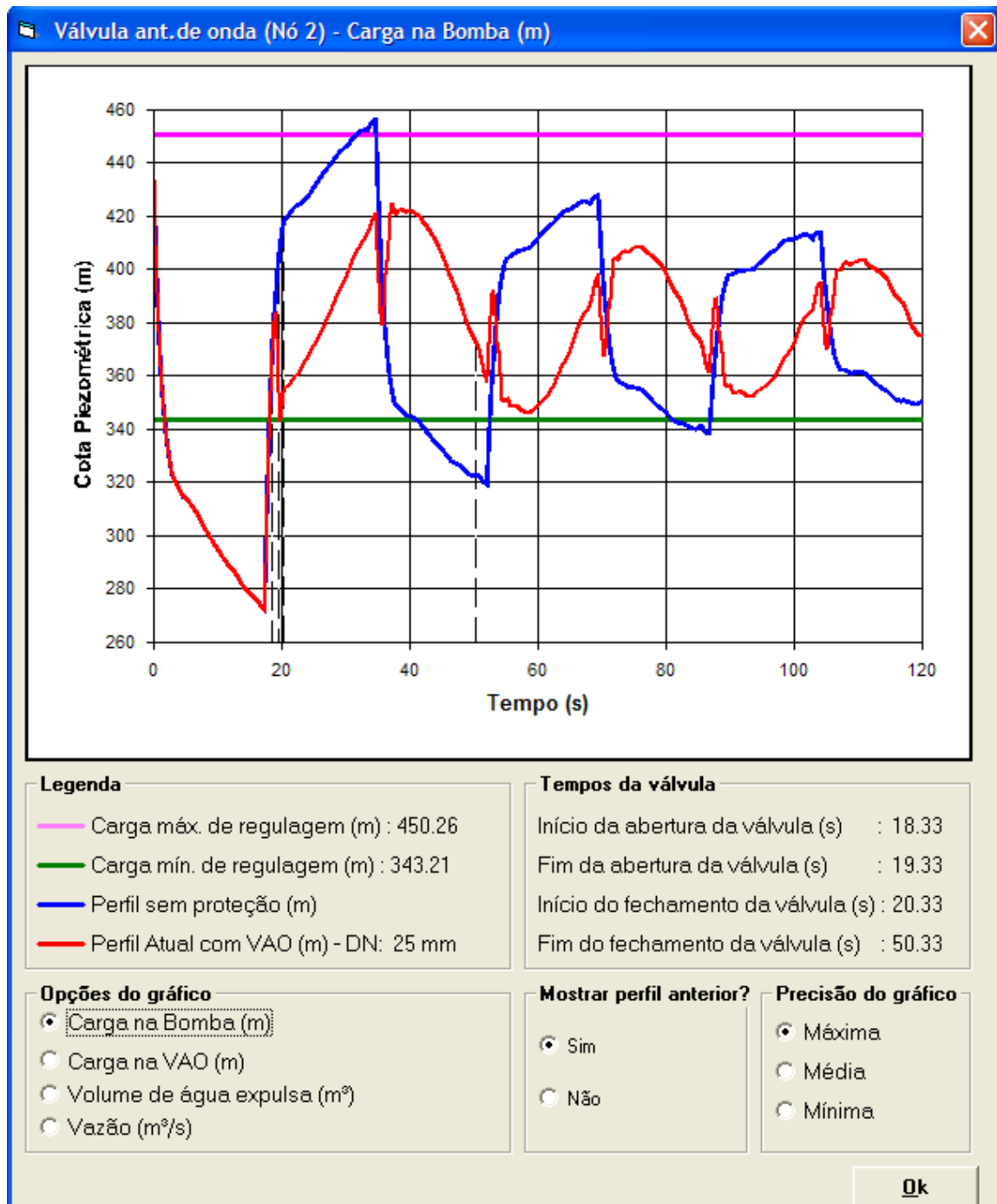


FIGURA 4. 10 - Gráfico do transiente na bomba

4.2. SIMULAÇÃO CUIÁ – ANÁLISE DO DN

A adutora Cuiá apresenta 8 nós, onde o primeiro nó é a bomba e o último nó é um reservatório de nível constante, e o número de divisões do menor trecho é igual a sete. O material da tubulação é PVC DeFoFo, com rugosidade de 0,0015 mm, módulo de elasticidade de 3 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,38, diâmetro interno de 0,2998 m e espessura de 13,1mm. Nessa simulação e nas subsequentes, o tempo de simulação será fixado em 100 s. A tabela 8 resume os dados de entrada dessa simulação.

TABELA 8 - Dados do trecho da adutora Cuiá

Trecho	C _{mont} (m)	C _{jus} (m)	L(m)	DN(mm)
1	3,61	2,50	200	300
2	2,50	11,00	500	300
3	11,00	8,00	430	300
4	8,00	27,69	60	300
5	27,69	37,80	110	300
6	37,80	39,35	50	300
7	39,35	40,00	420	300

Os dados de entrada do modelo da válvula antecipadora de onda são mostrados na tabela 9.

TABELA 9 - Dados de entrada da VAO

Variáveis	TI _{AV}	ΔT_{AV}	ΔT_{PVA}	ΔT_{FV}	P _{mínR}	P _{máxR}	DN
Valor	10,22	1,56	10,00	30,00	26,58	58,48	12/100/200
Unidade	s	s	s	s	mca	mca	mm

Com o intuito de verificar o comportamento do amortecimento da onda de sobrepressão, as simulações a seguir serão realizadas com os diâmetros da válvula antecipadora de onda de: 12 mm, 100 mm e 200 mm.

4.2.1. Diâmetro da válvula 12 mm (válvula subdimensionada)

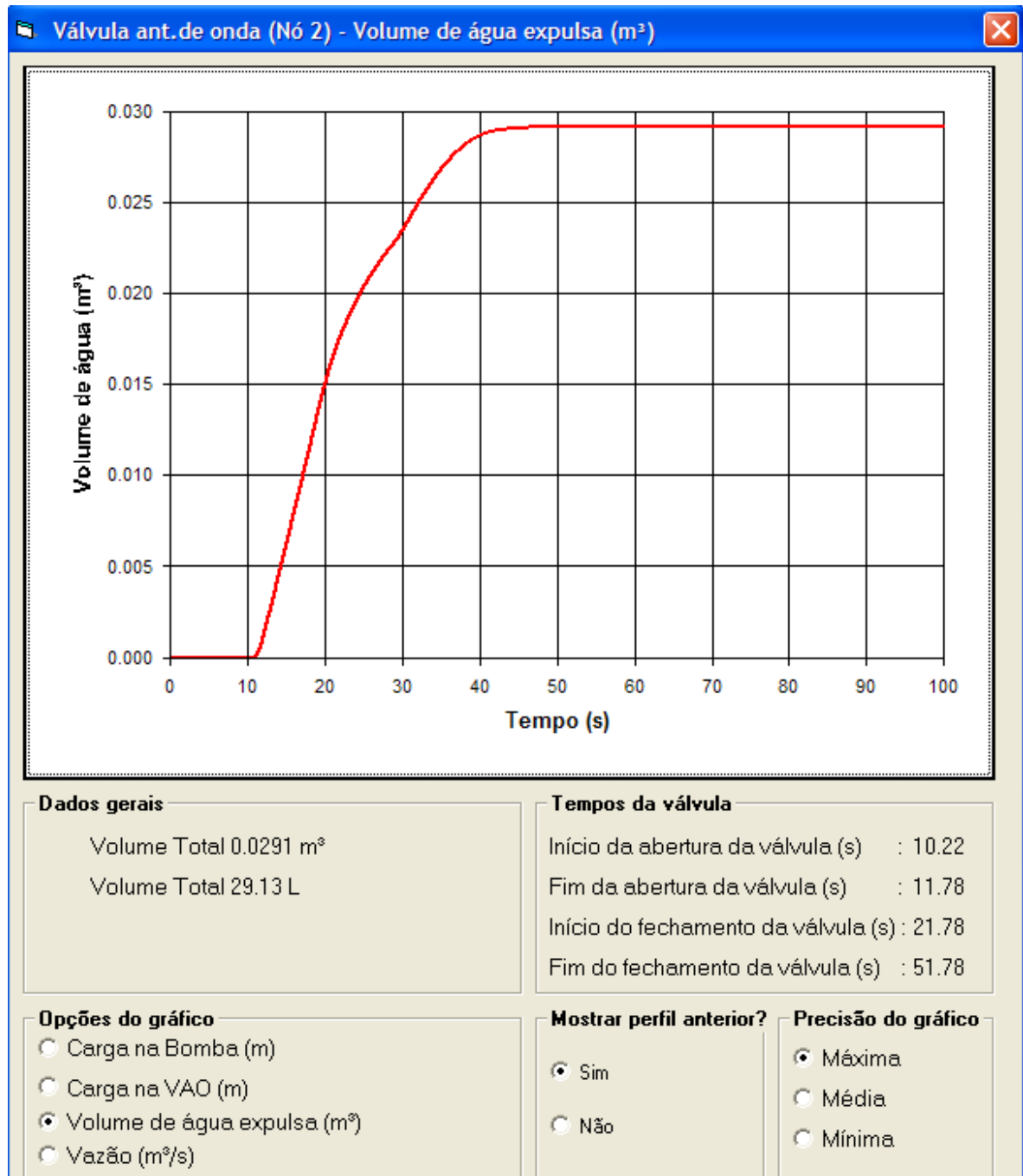


FIGURA 4. 11 - Gráfico do volume de água expulsa

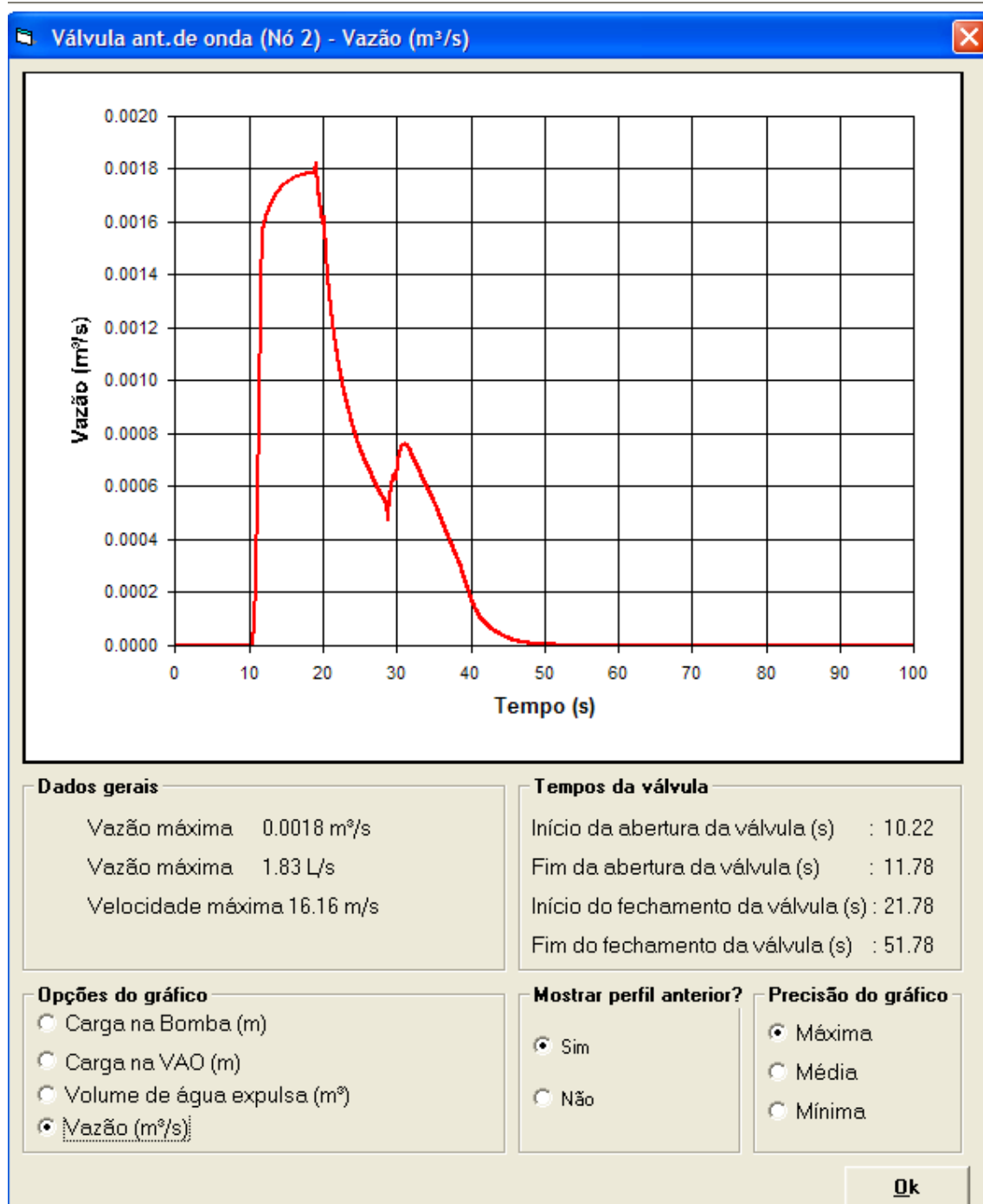


FIGURA 4. 12 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

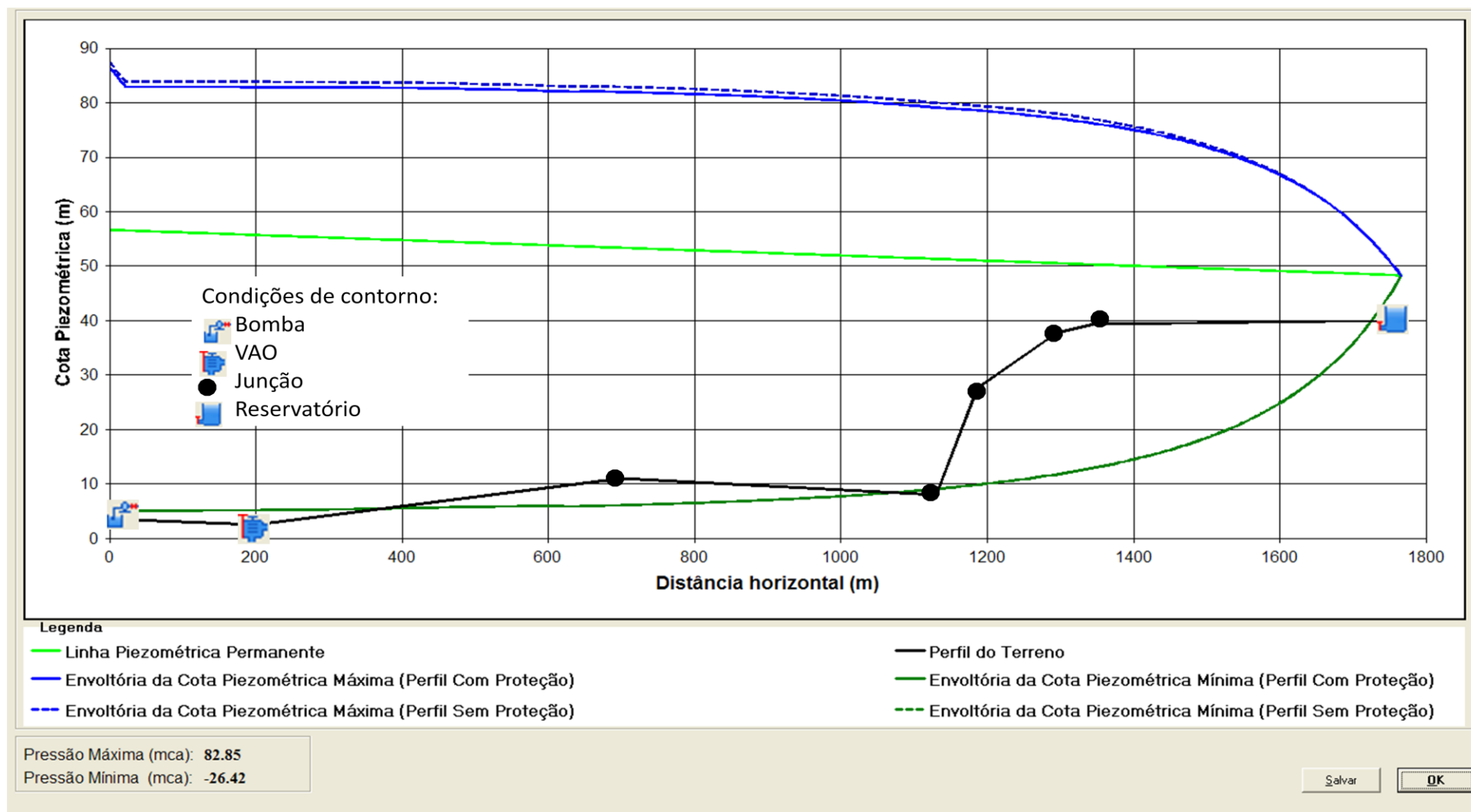


FIGURA 4. 13 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

- Atenuação do transiente na válvula

No gráfico da figura 4.14, observa-se que a cota piezométrica não permanece entre os limites de carga mínima e máxima de regulação, linhas verde e rosa respectivamente. Desse modo, com um diâmetro de 12 mm, a válvula antecipadora de onda está subdimensionada, e o diâmetro nominal deve ser modificado para que a proteção contra o transiente seja efetiva.

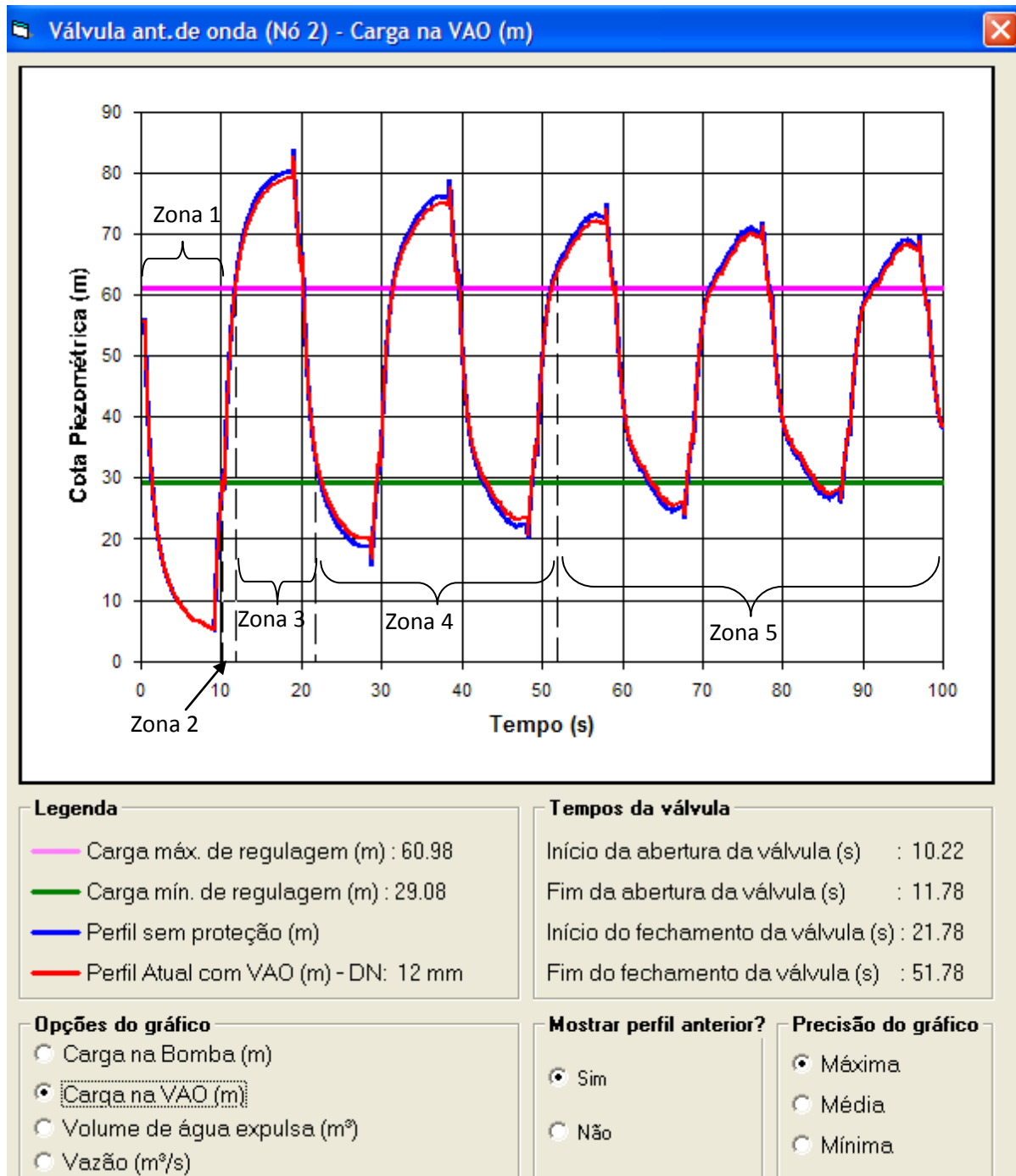


FIGURA 4.14 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na bomba

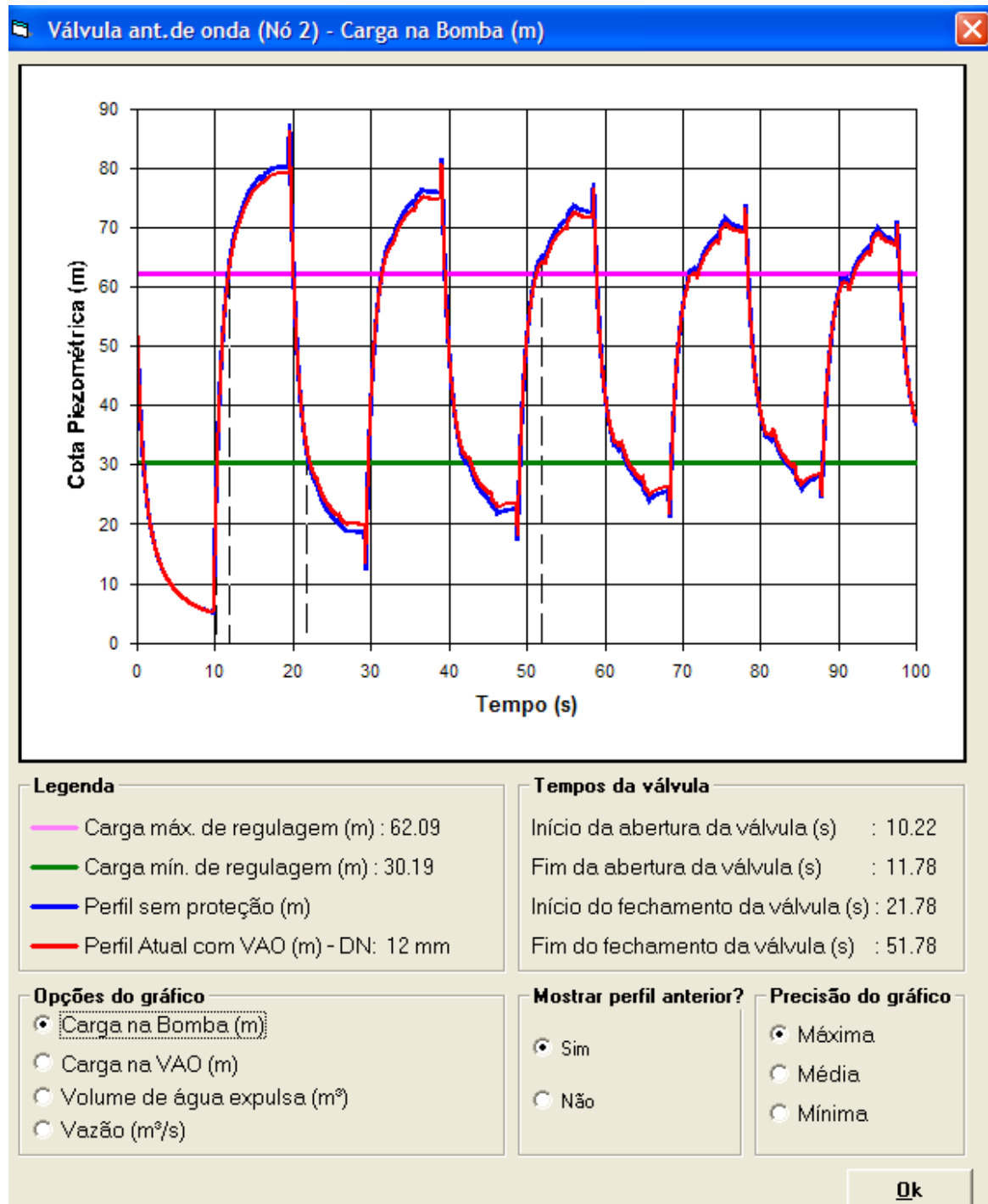


FIGURA 4.15 - Gráfico do transiente na bomba

4.2.2. Diâmetro da válvula 100 mm (dimensionamento correto)

Com o diâmetro de 100 mm, tem-se o dimensionamento correto da válvula antecipadora de onda. Assim, o volume expulso deve ser armazenado em uma caixa de concreto ou disposto em um manancial. Caso seja disposto em um manancial, a vazão deve ser considerada.

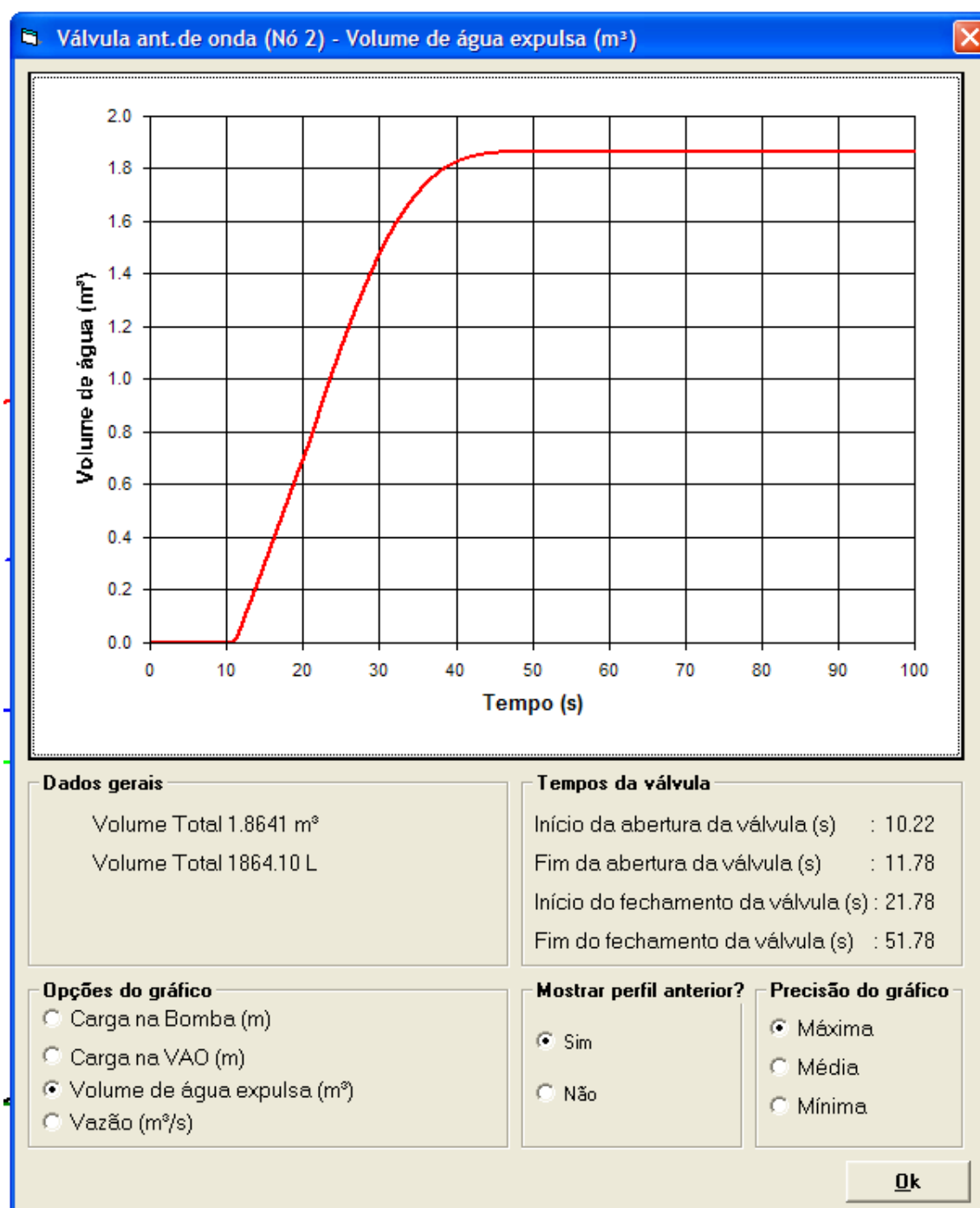


FIGURA 4.16 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

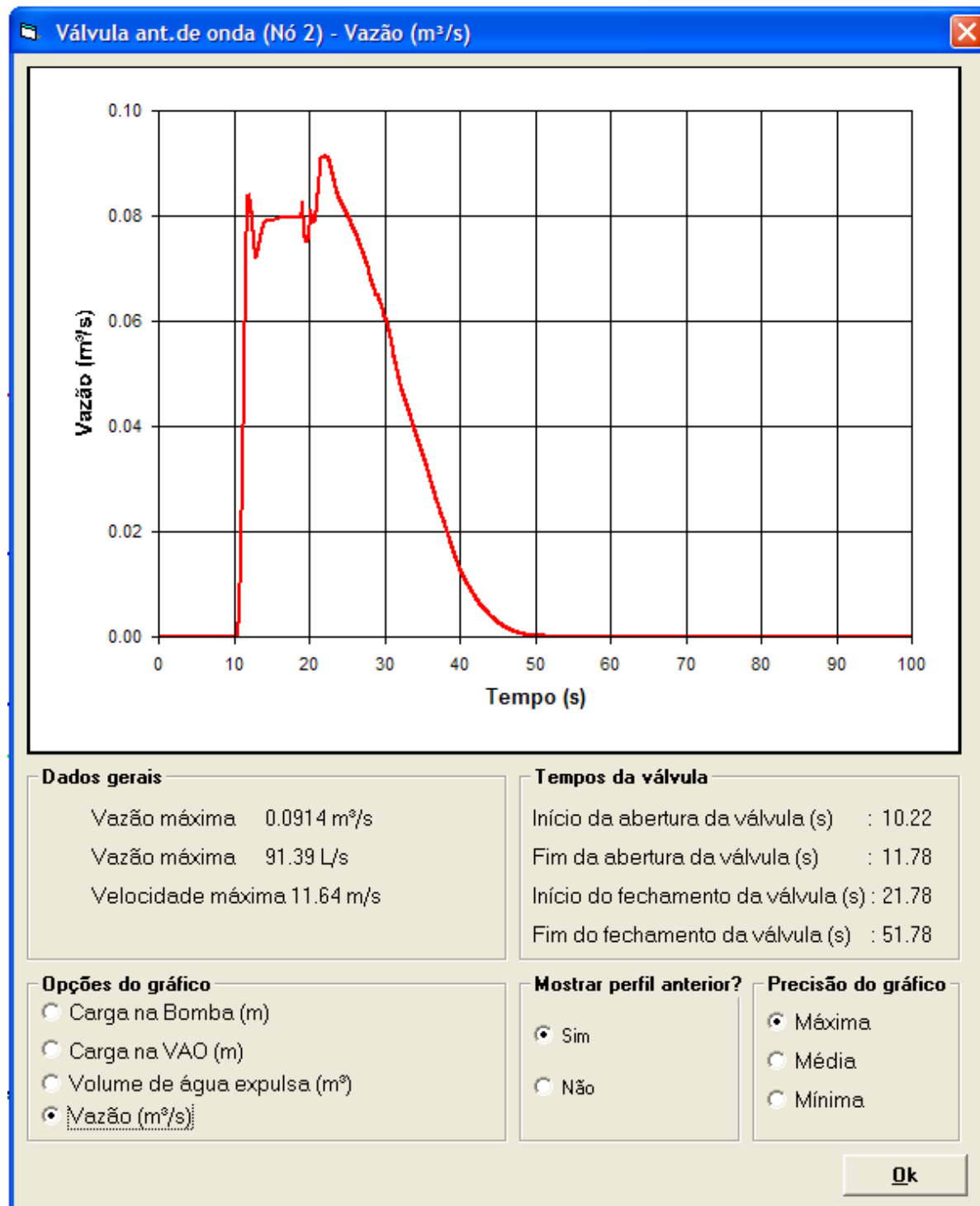


FIGURA 4.17 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

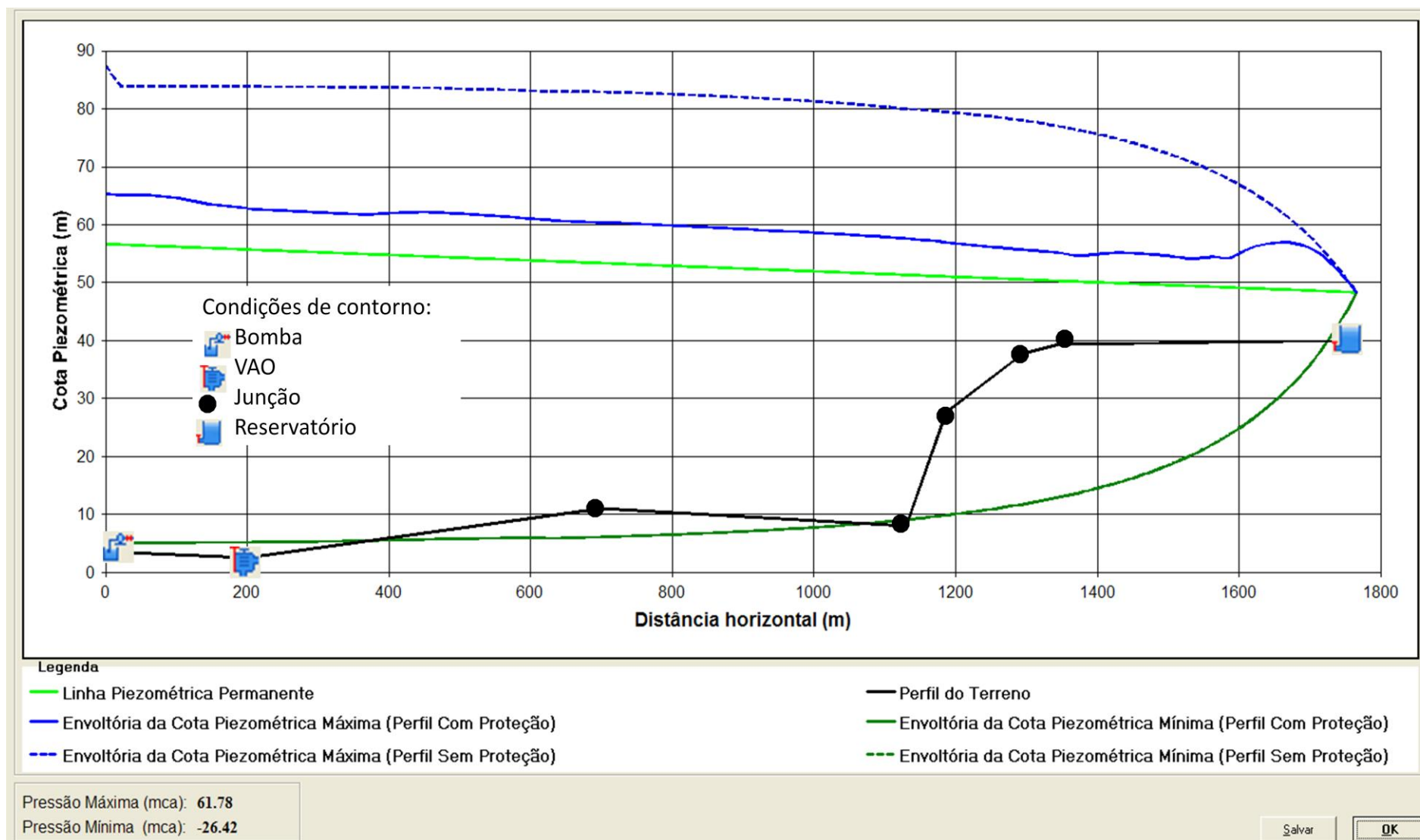


FIGURA 4.18 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

- Atenuação do transiente na válvula

A cota piezométrica está entre os limites máximo e mínimo de regulação, representado pelas linhas rosa e verde do gráfico da figura 4.19. Portanto, a válvula está com um dimensionamento adequado segundo o critério do diâmetro nominal.

Transiente é formada na zona 4, devido ao fechamento da válvula, sendo amortecido de forma adequada, pois na zona 5 as flutuações de pressão são muito inferiores ao caso sem proteção.

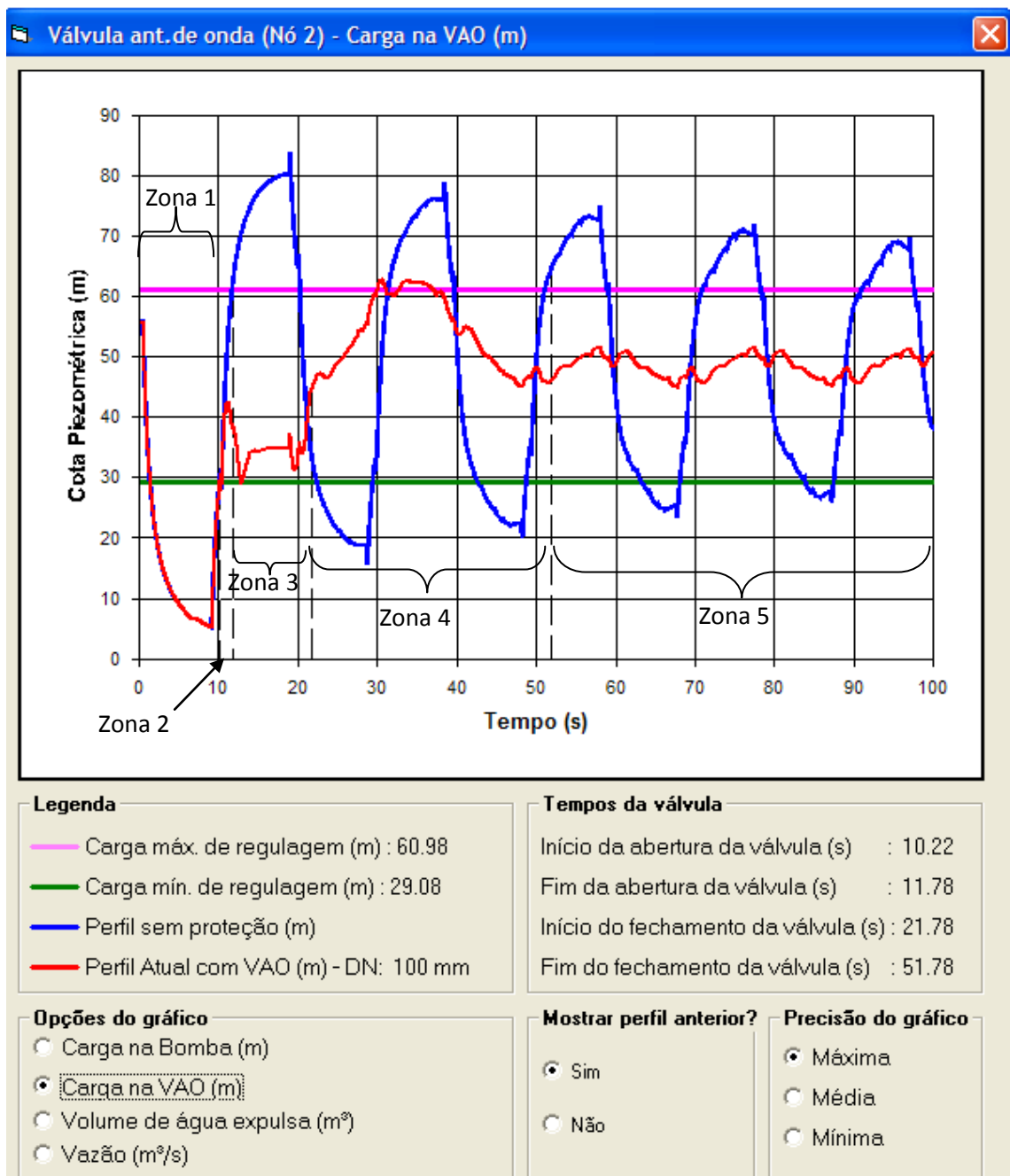


FIGURA 4.19 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na bomba

A cota piezométrica está entre os limites máximo e mínimo de regulação (linhas rosa e verde do gráfico da figura 4.20). Por isso, adotando o critério dos limites máximo e mínimo de regulação para a análise da proteção contra transientes indesejáveis na bomba, a proteção contra transiente é eficiente.

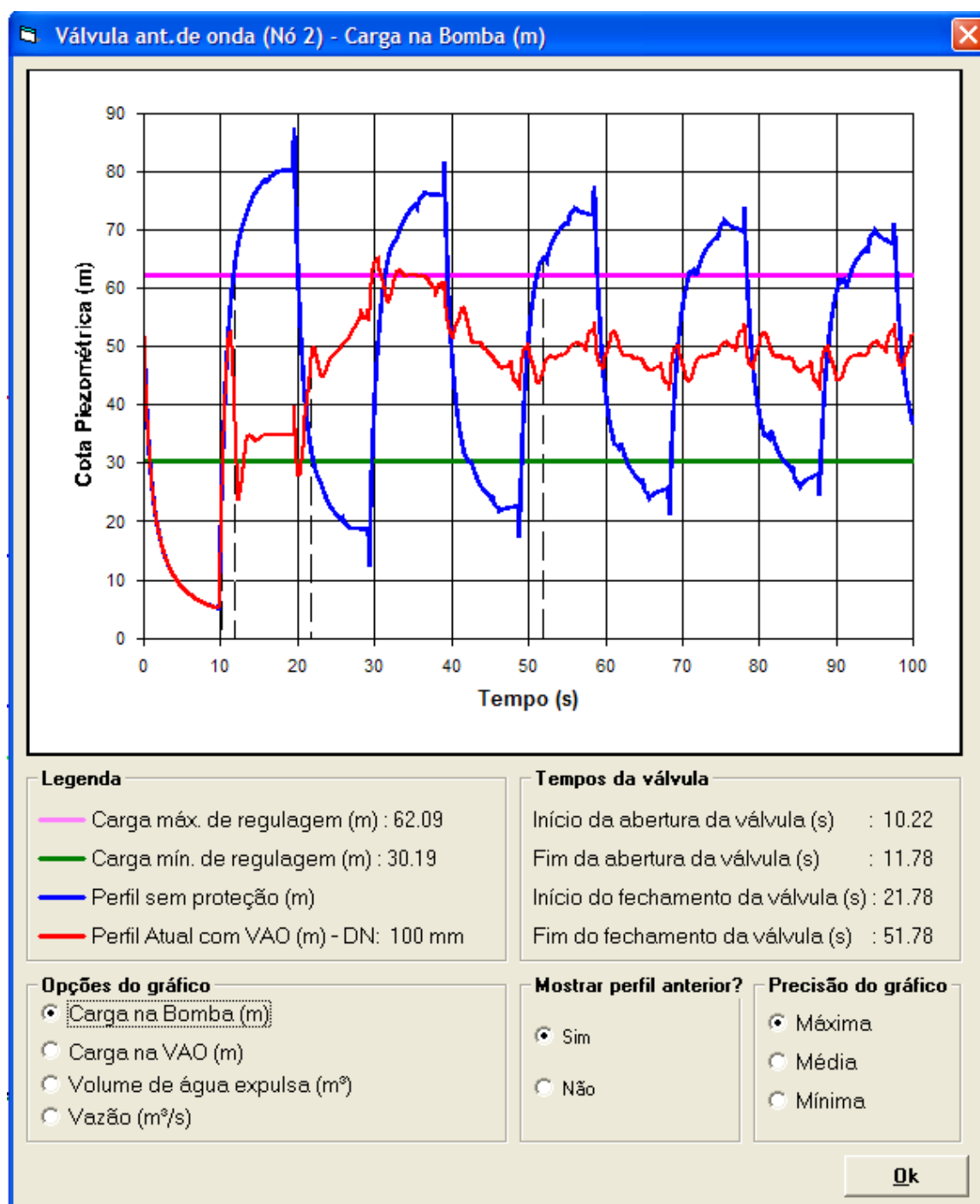


FIGURA 4.20 - Gráfico do transiente na bomba

4.2.3. Diâmetro da válvula 200 mm (válvula superdimensionada)

Com o diâmetro nominal de 200 mm a válvula antecipadora de onda está superdimensionada. O volume de líquido expulso pela válvula é muito superior ao caso do dimensionamento correto, por isso os custos com o armazenamento e disposição do fluido, em projetos de dimensionamento de válvulas, são superiores quando a válvula está superdimensionada.

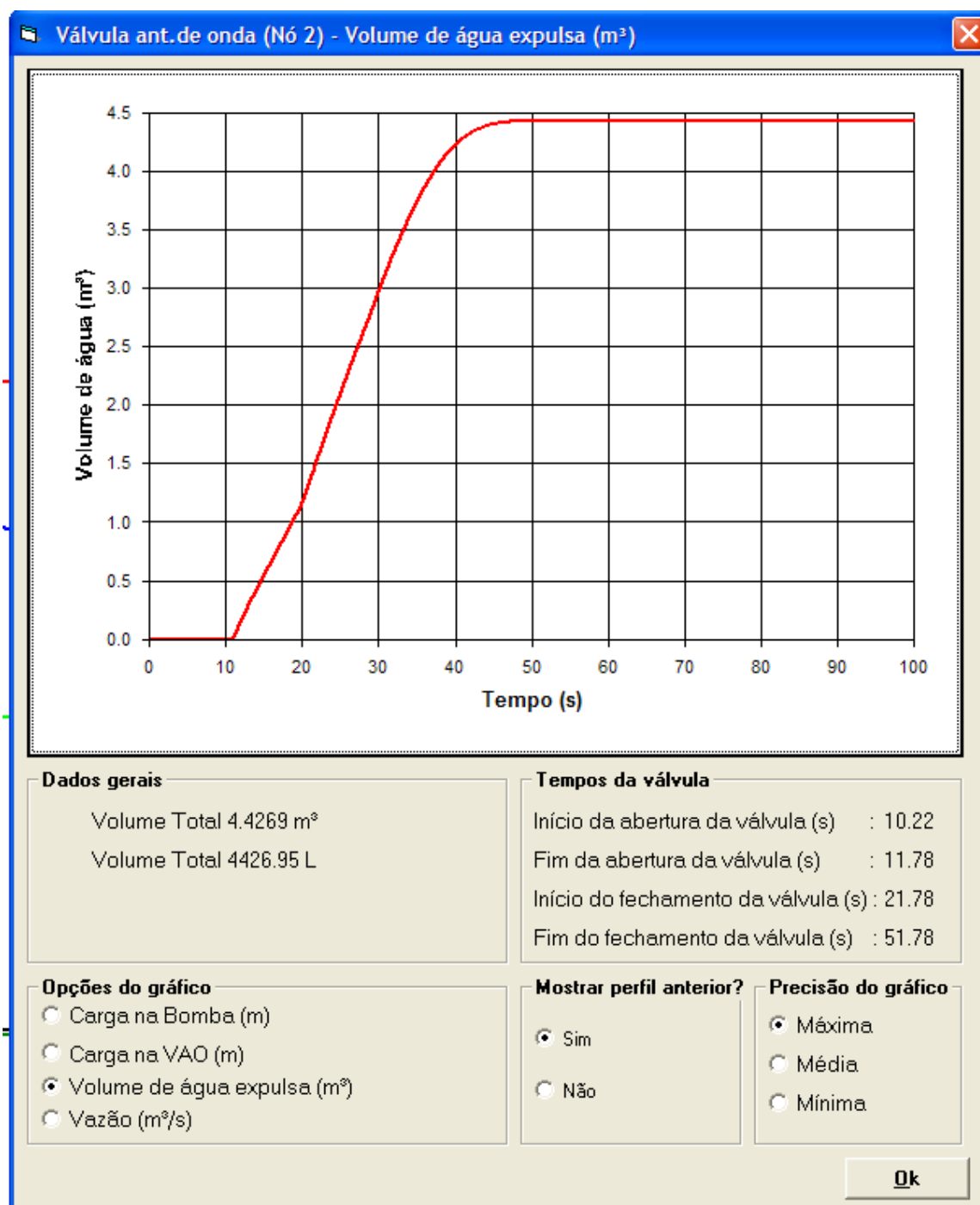


FIGURA 4.21 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

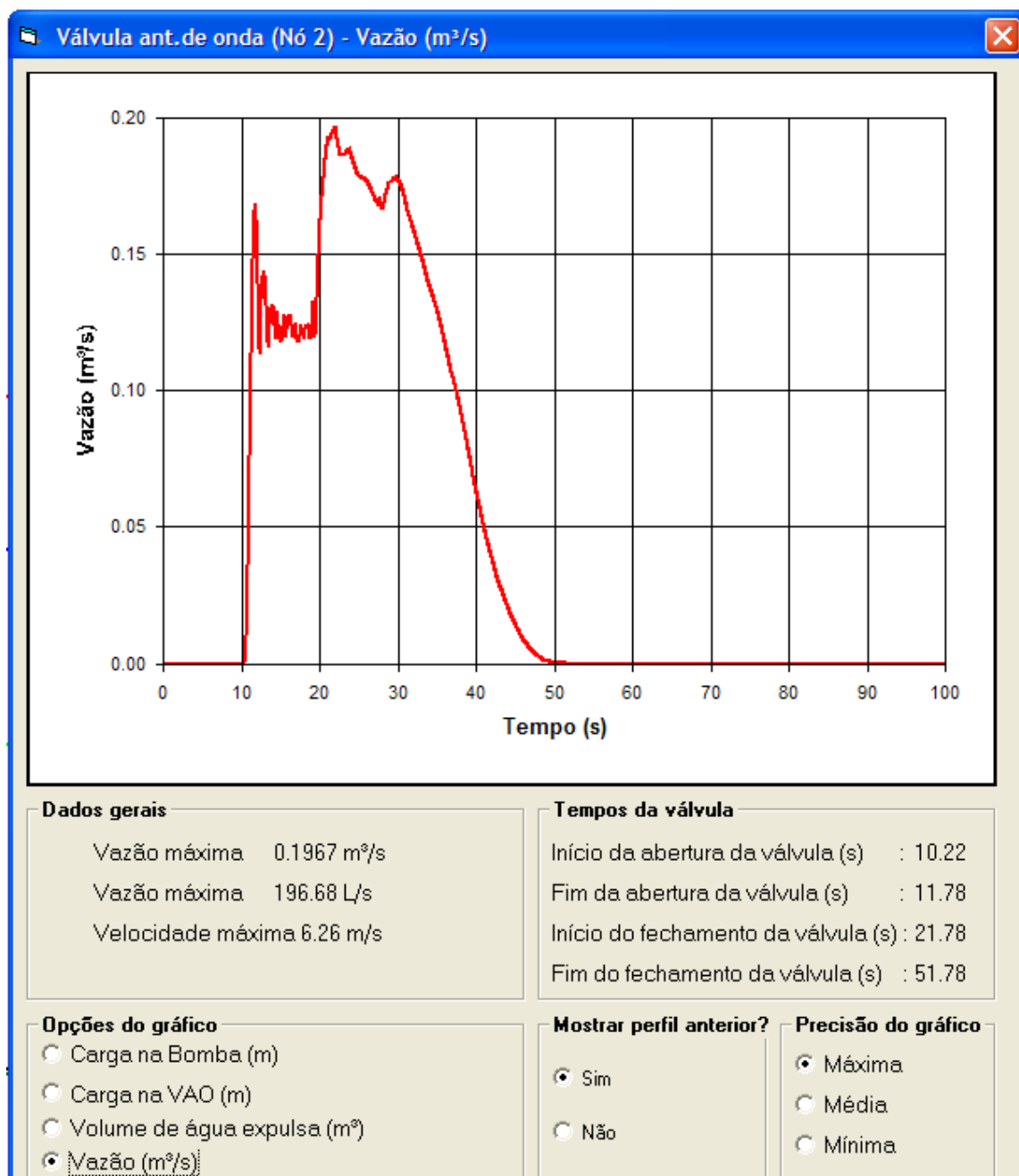


FIGURA 4.22 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

No gráfico da figura 4.23 pode-se observar uma zona de baixa pressão localizada entre a bomba e a válvula, isso ocorre devido ao alívio excessivo da pressão ocasionado pelo superdimensionamento da válvula.

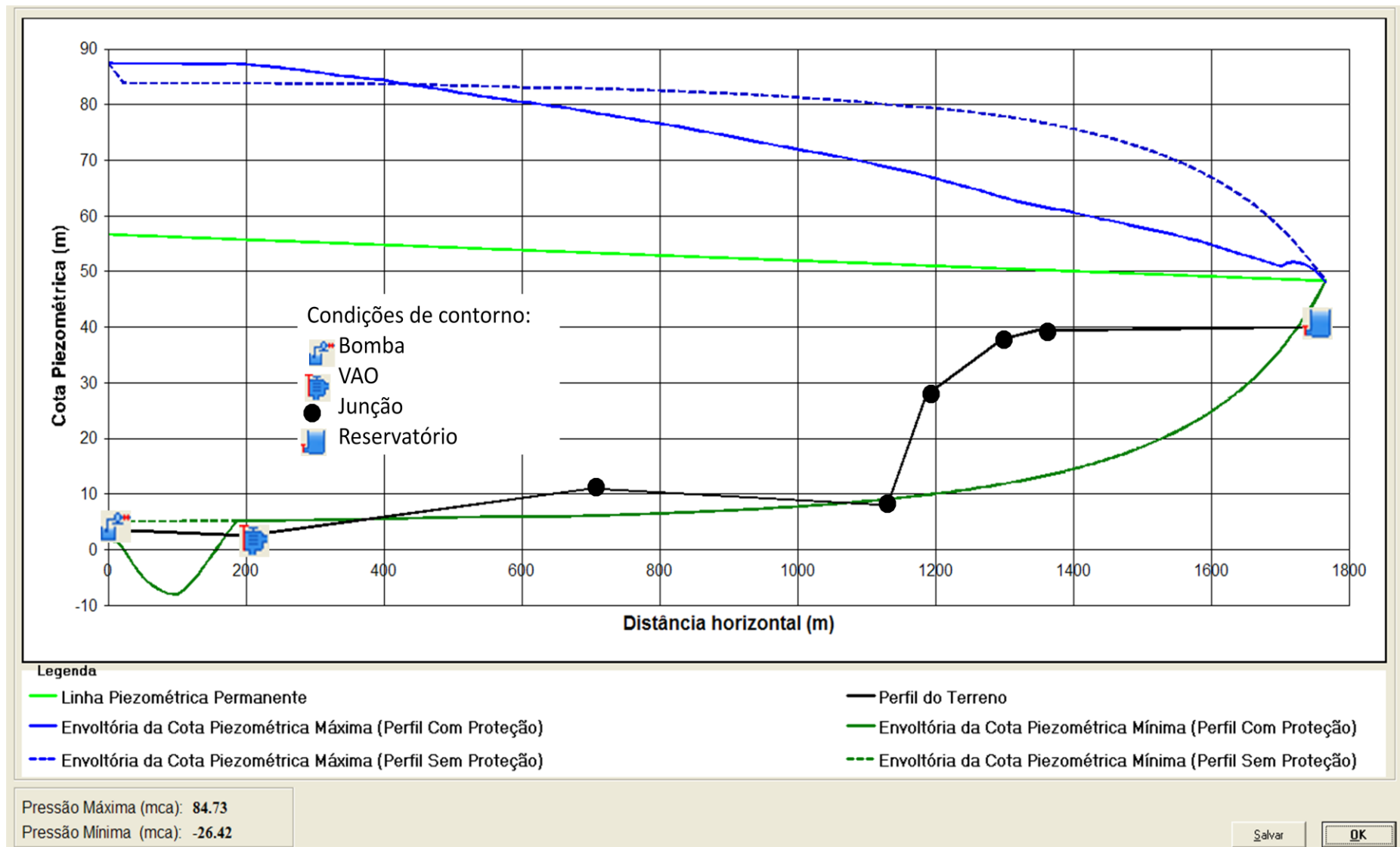


FIGURA 4.23 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

- Transiente na válvula

A cota piezométrica não está entre os limites máximo e mínimo de regulação (linhas rosa e verde do gráfico da figura 4.24). Portanto, a válvula está com um dimensionamento inadequado segundo o critério do diâmetro nominal.

Na zona 2, a válvula inicia a abertura com um diâmetro superior ao adequado. Por isso, o alívio de pressão é excessivo. Com a válvula completamente aberta na zona 3, a pressão no tubo, sofre um alívio em excesso, iniciando a formação da onda de baixa pressão seguido pela onda de alta pressão na zona 4. Portanto, para esse diâmetro, o dimensionamento segundo o critério do diâmetro nominal é inadequado.

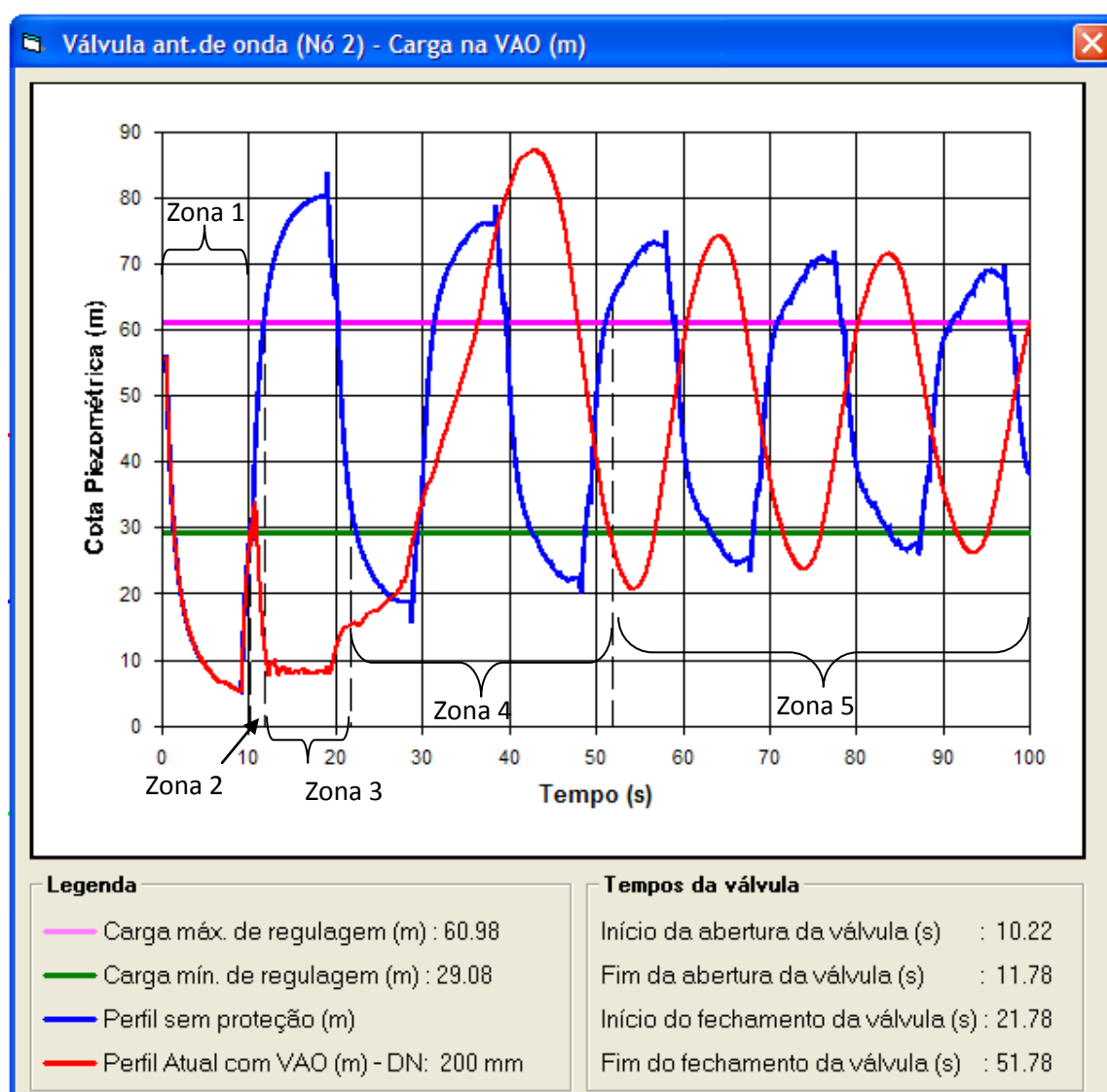


FIGURA 4.24 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Transiente na bomba

Devido ao dimensionamento inadequado da válvula antecipadora de onda, segundo o critério do diâmetro nominal, ocorre à formação de transiente na bomba.

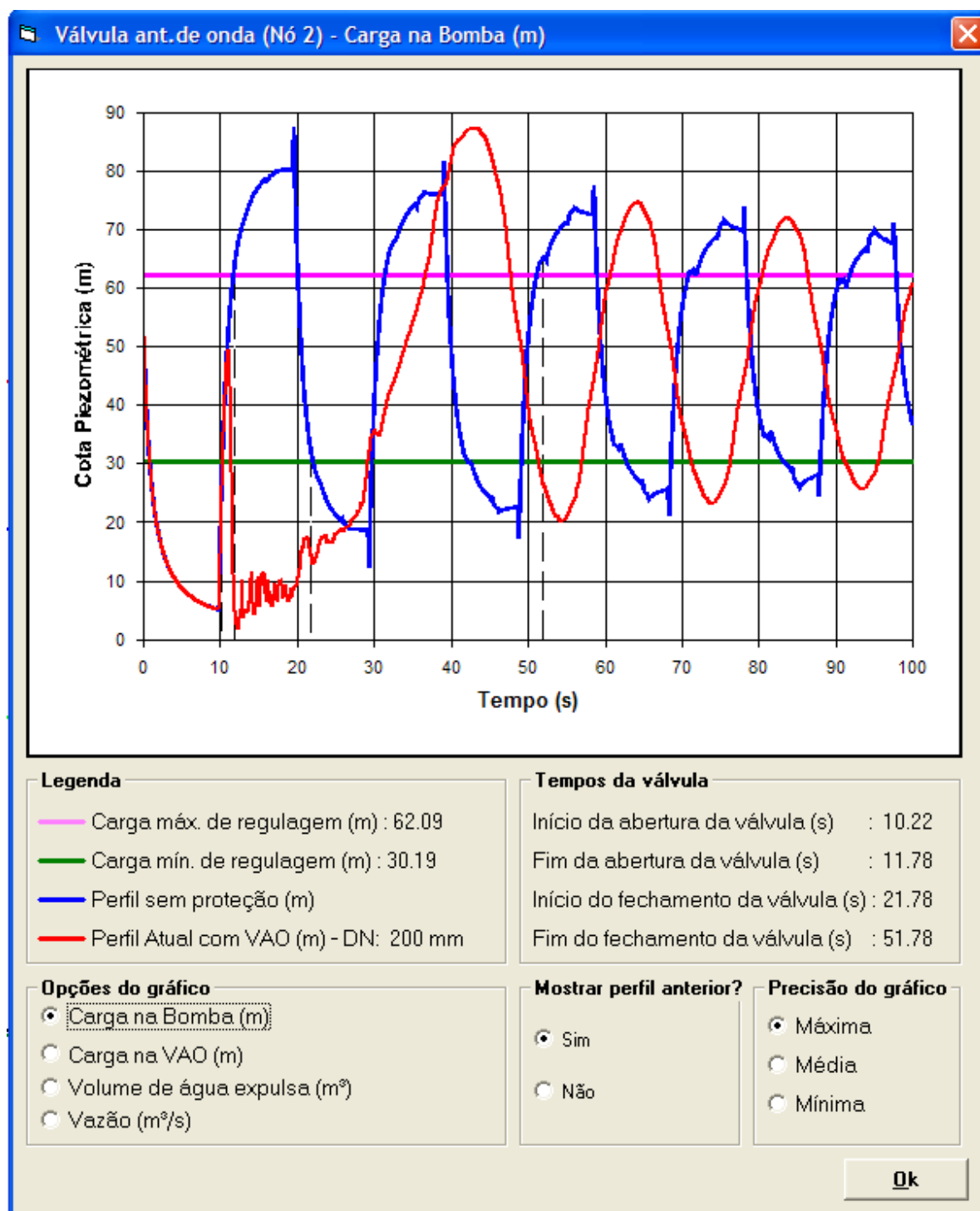


FIGURA 4.25 - Gráfico do transiente na bomba

4.3. SIMULAÇÃO A – ANÁLISE DO TIAV

A adutora será dividida em 22 nós, onde o primeiro nó é a bomba e o último nó é um reservatório de nível constante, e número de divisões do menor trecho igual a 7. O material da tubulação é PVC DEFOFO, com rugosidade de 0,0015 mm, módulo de elasticidade de 3 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,38; espessura de 19,2 mm. A tabela 10 resume os dados de entrada dessa simulação.

TABELA 10 - Dados do trecho da simulação A

Trecho	Cmont(m)	Cjus (m)	L(m)	DN(mm)
1	282,00	284,91	160	450
2	284,91	286,94	180	450
3	286,94	288,10	180	450
4	288,10	288,73	180	450
5	288,73	289,56	180	450
6	289,56	287,63	180	450
7	287,63	288,22	180	450
8	288,22	292,89	180	450
9	292,89	297,37	180	450
10	297,37	300,56	180	450
11	300,56	309,29	180	450
12	309,29	315,60	180	450
13	315,60	317,91	180	450
14	317,91	318,56	180	450
15	318,56	320,71	180	450
16	320,71	325,30	180	450
17	325,30	328,51	180	450
18	328,51	332,56	180	450
19	332,56	337,10	180	450
20	337,10	341,56	180	450
21	341,56	348,00	140	450

Os dados de entrada da VAO estão descritos na tabela 11.

TABELA 11 - Dados de entrada da VAO

Variáveis	TIAV	ΔTAV	$\Delta TPVA$	$\Delta T FV$	PmínR	PmáxR	DN
Valor	0,50	1,07	10,00	30,00	65,10	77,50	100
Unidade	s	s	s	s	mca	mca	mm

Nessa análise, foi considerado que a válvula está com o dimensionamento inadequado segundo o critério do tempo inicial de abertura da válvula. A válvula inicia a abertura num tempo inferior ao valor adequado, sendo representado pelos gráficos das figuras 4.26 até 4.30.

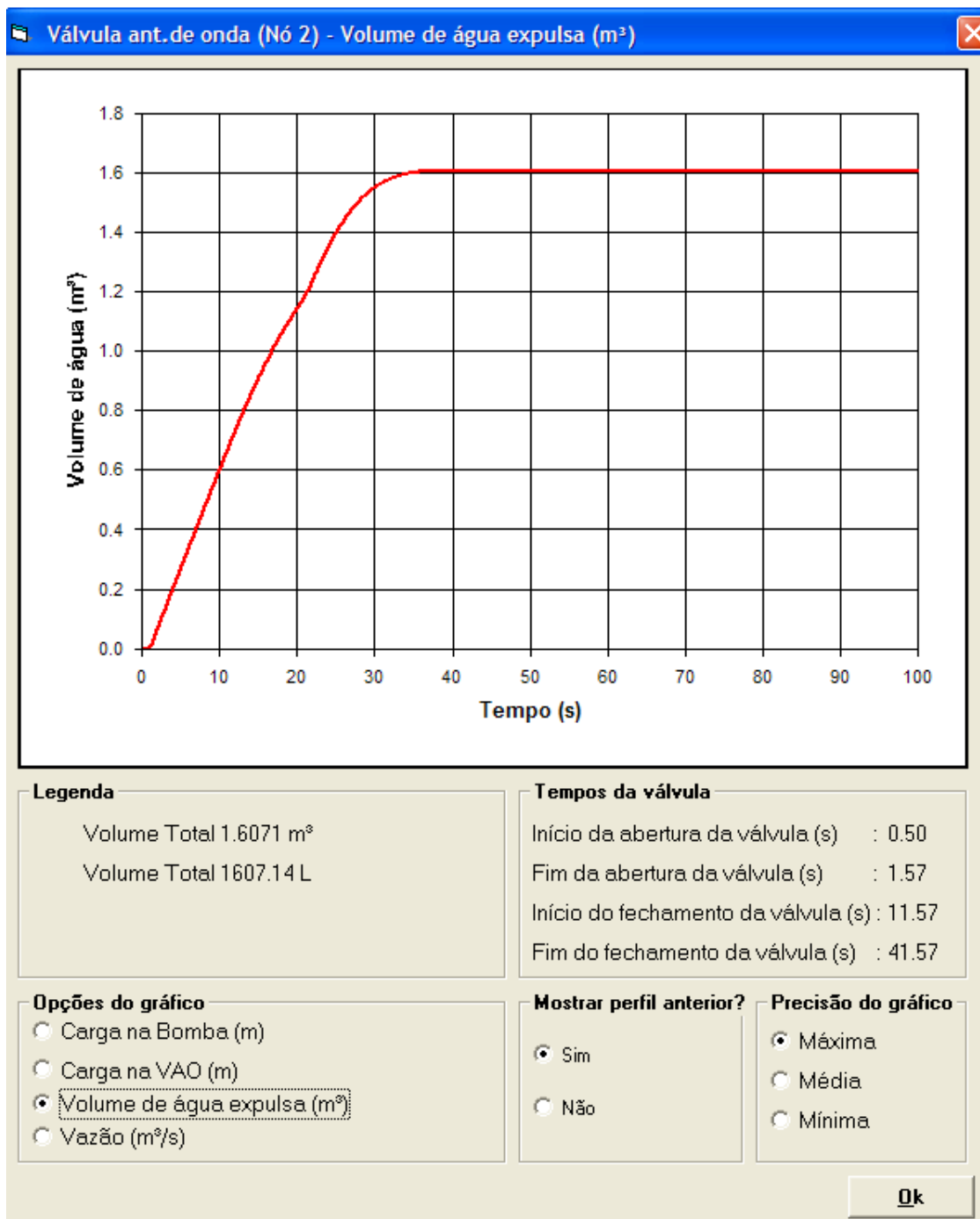


FIGURA 4.26 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

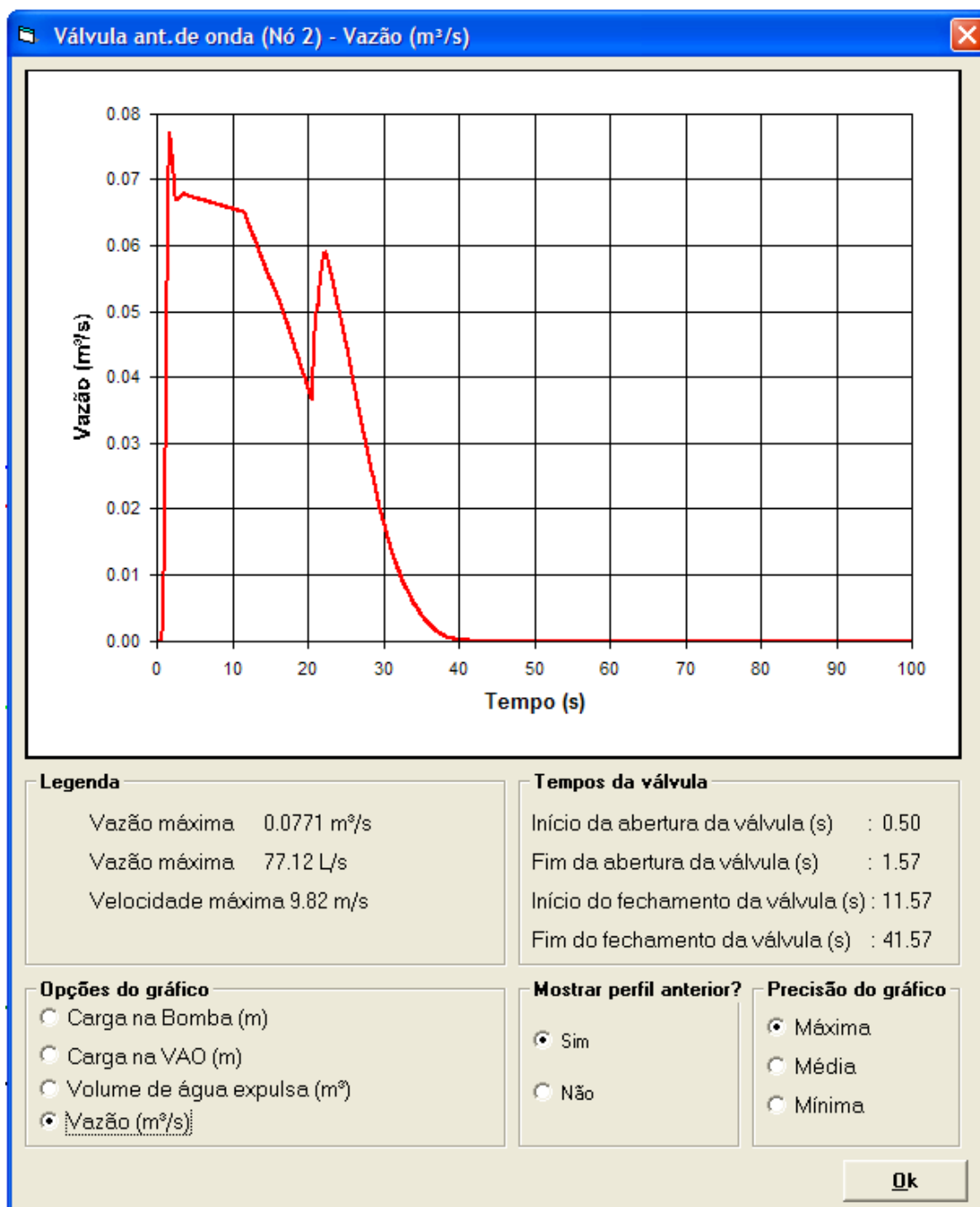


FIGURA 4.27 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

Nos gráficos das figuras 4.28 e 4.29 o dimensionamento da válvula, segundo o critério de abertura é inadequado, pois a válvula abre antes da passagem da onda de baixa pressão.

- Transiente na válvula

Devido a função de alívio da válvula e somando os efeitos de redução da pressão na tubulação, ocorre a formação de subpressão em relação ao caso sem a proteção. Desse modo, ocorre a formação de transiente e a onda de sobrepressão não é adequadamente amortecida.

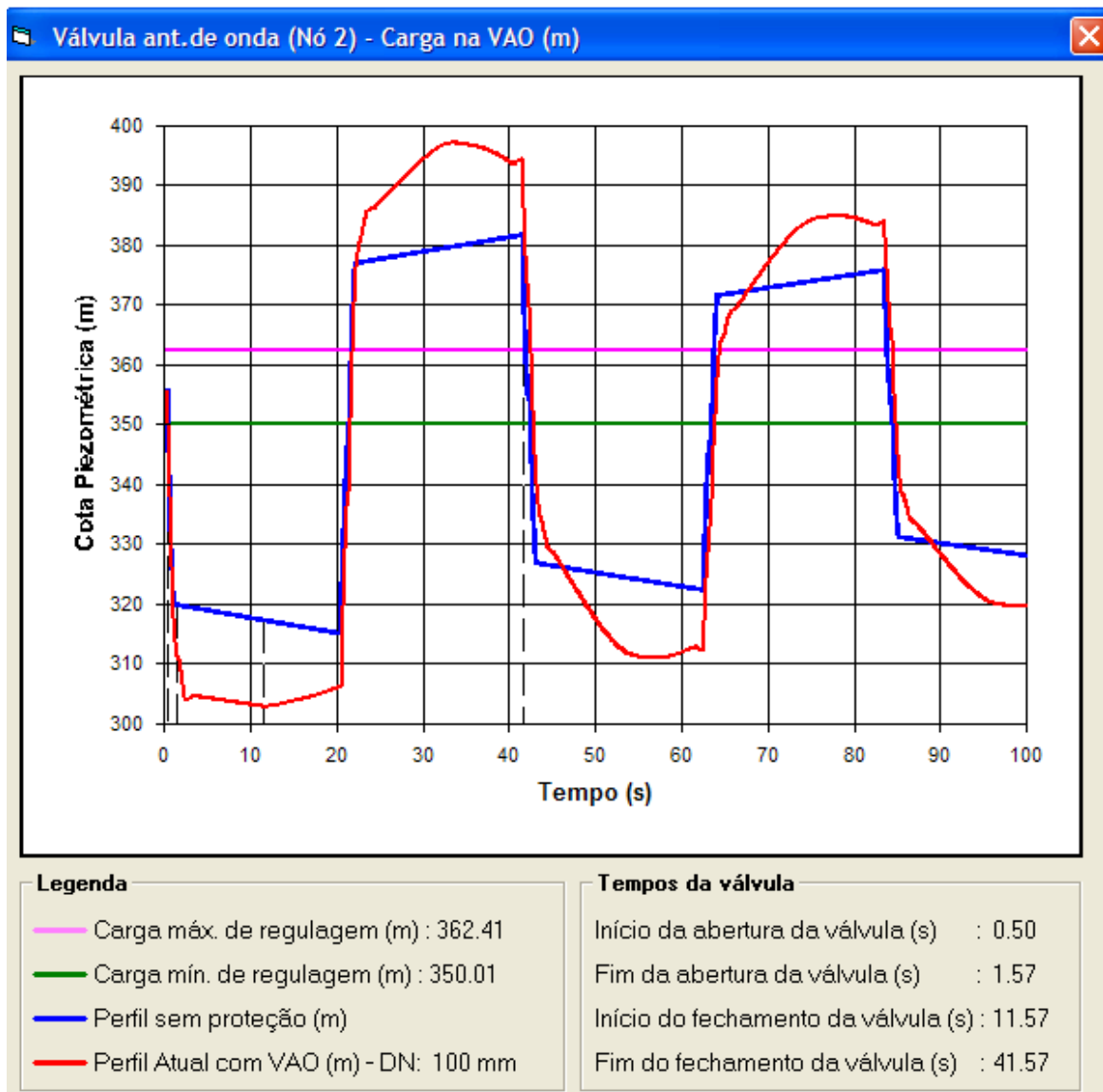


FIGURA 4.28 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Transiente na bomba

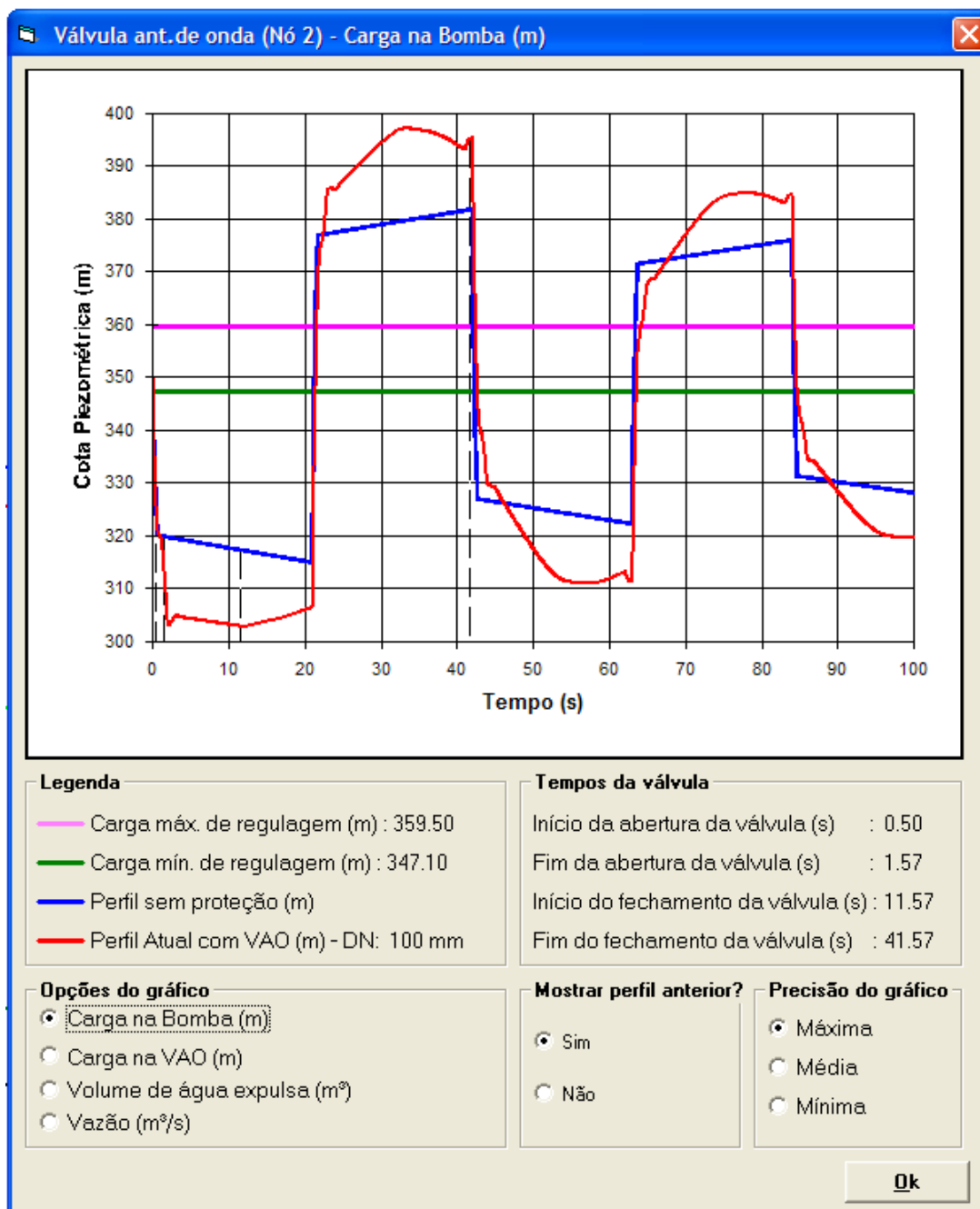


FIGURA 4.29 - Gráfico do transiente na bomba

No gráfico da figura 4.30, devido a abertura da válvula ocorrer antes da passagem da onda de subpressão, observa-se a formação de sobrepressão e subpressão em toda a tubulação.

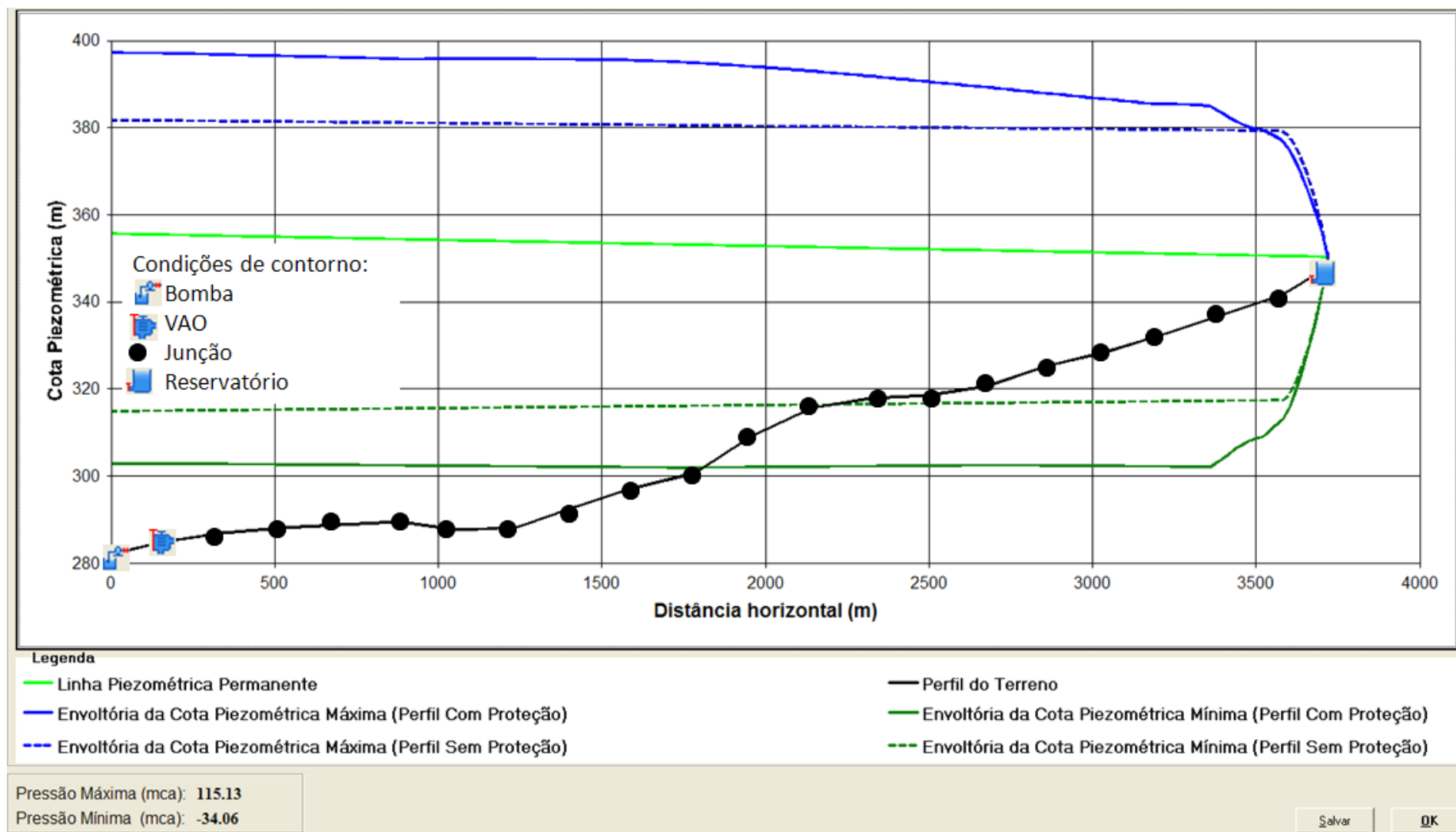


FIGURA 4.30 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

4.4. SIMULAÇÃO B – ANÁLISE DO Δ TFV

A adutora será dividida em 21 nós, onde o primeiro nó é a bomba e o último nó é um reservatório de nível constante, e número de divisões do menor trecho igual a 7. O material da tubulação é PVC DEFOFO, com rugosidade de 0,0015 mm, módulo de elasticidade de 3 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,38; espessura de 19,2 mm. . A tabela 12 resume os dados de entrada dessa simulação.

TABELA 12 - Dados do trecho da simulação B

Trecho	C _{mont} (m)	C _{jus} (m)	L(m)	DN(mm)
1	282,00	284,30	80	450
2	284,3	283,27	100	450
3	283,27	282,68	100	450
4	282,68	283,47	100	450
5	283,47	284,00	100	450
6	284,00	284,21	100	450
7	284,21	283,96	100	450
8	283,96	283,47	100	450
9	283,47	284,54	100	450
10	284,54	283,44	100	450
11	283,44	283,47	100	450
12	283,47	283,11	100	450
13	283,11	282,18	100	450
14	282,18	280,19	100	450
15	280,19	282,61	100	450
16	282,61	285,76	100	450
17	285,76	287,08	100	450
18	287,08	288,10	100	450
19	288,10	288,29	100	450
20	288,29	303,00	100	450

Os dados de entrada da VAO estão descritos na tabela 13

TABELA 13 - Dados de entrada da VAO

Variáveis	TIAV	Δ TAV	Δ TPVA	Δ TFV	P _{mín} R	P _{máx} R	DN
Valor	11,68	1,26	10,00	1,00/30,00	12,08	26,58	125
Unidade	s	s	s	s	mca	mca	mm

Nessa análise, foi considerado que a válvula está com o dimensionamento inadequado segundo o critério do intervalo do tempo de fechamento da válvula. A válvula fecha num tempo muito inferior ao valor adequado.

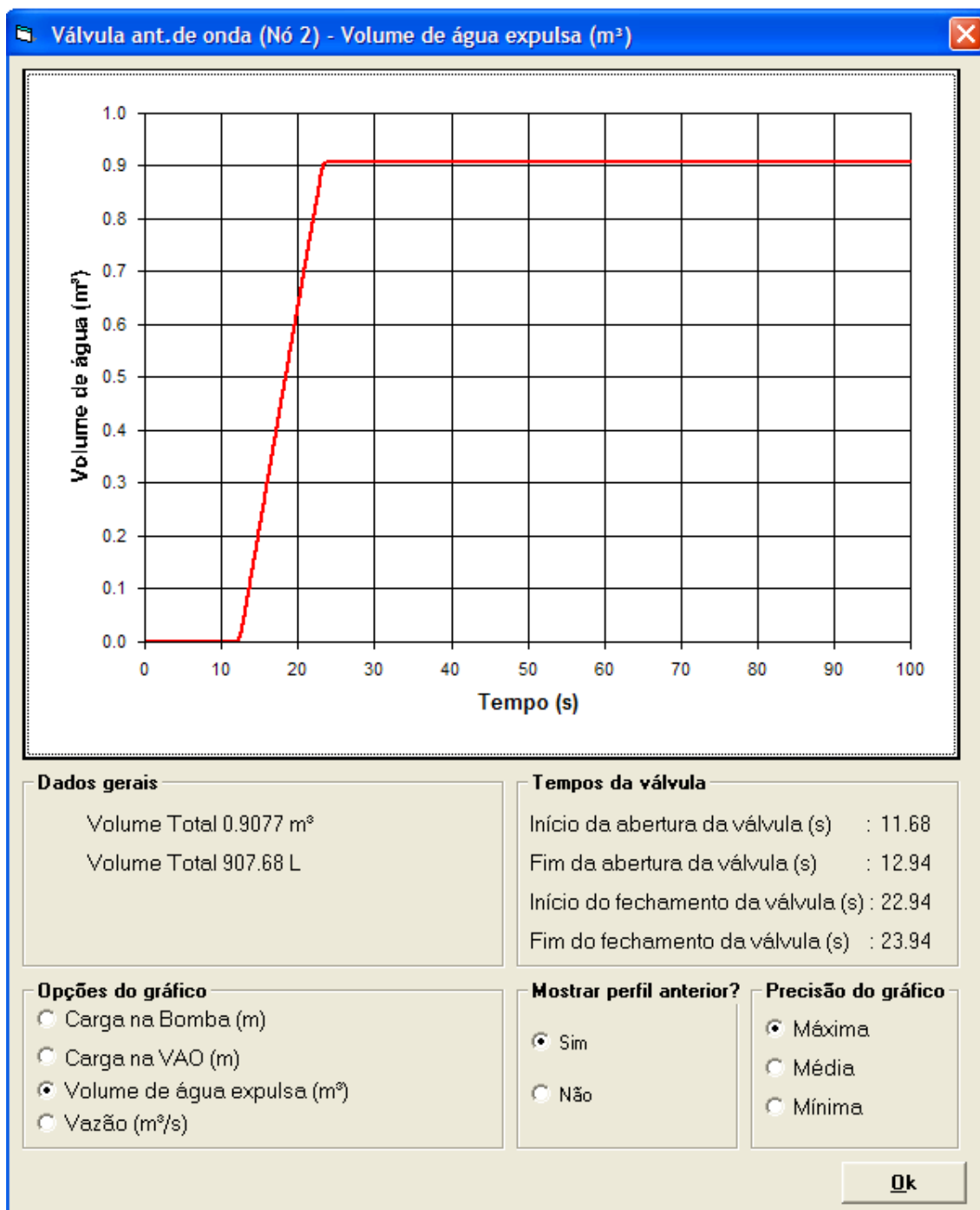


FIGURA 4.31 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

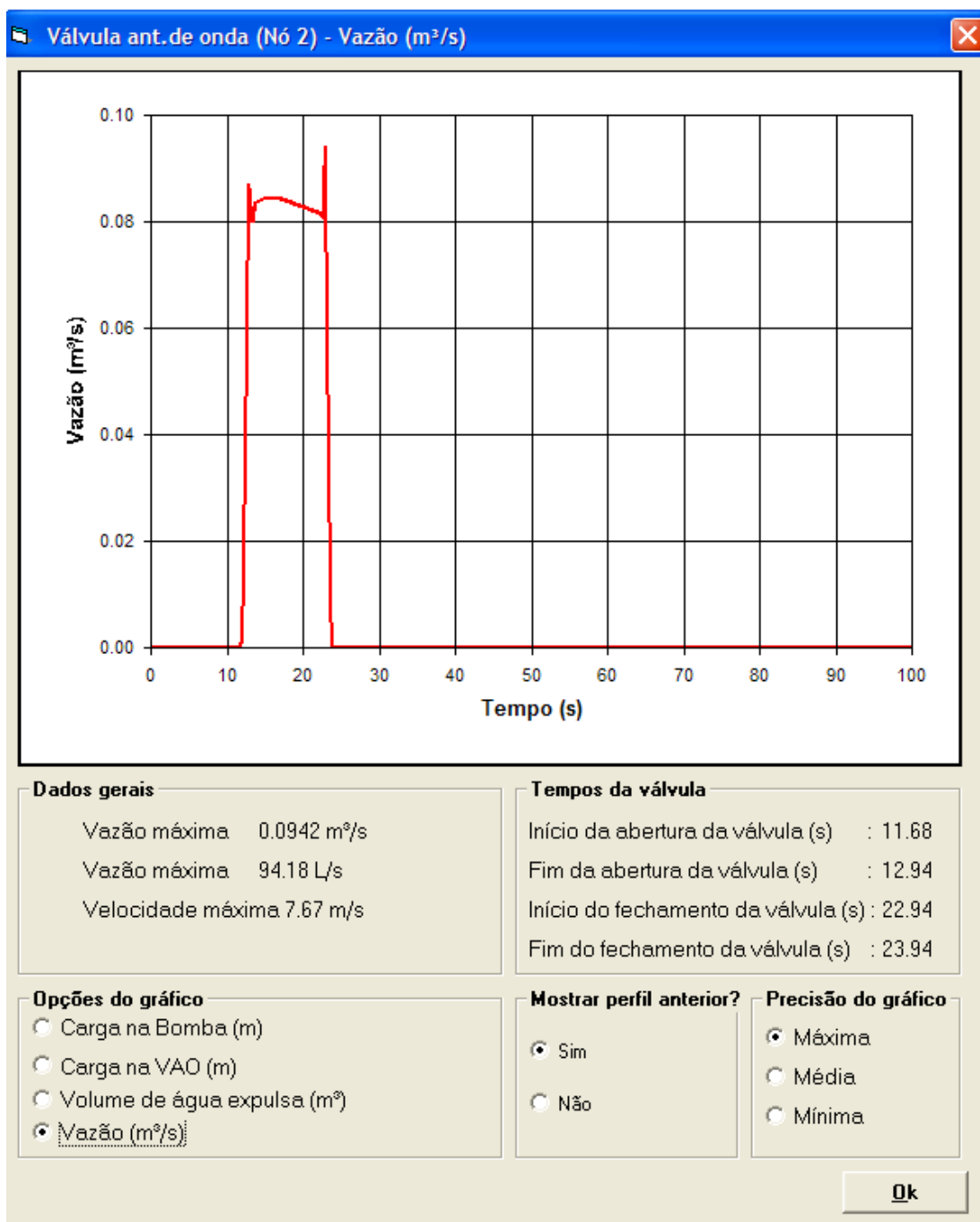


FIGURA 4.32 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

- Transiente na válvula

A perturbação ocasionada devido ao fechamento repentino da válvula na zona 4, gera transientes indesejáveis. Desse modo, esse efeito se estende para a zona 5, e o intervalo do tempo de fechamento da válvula deve ser modificado para que a válvula trabalhe corretamente.

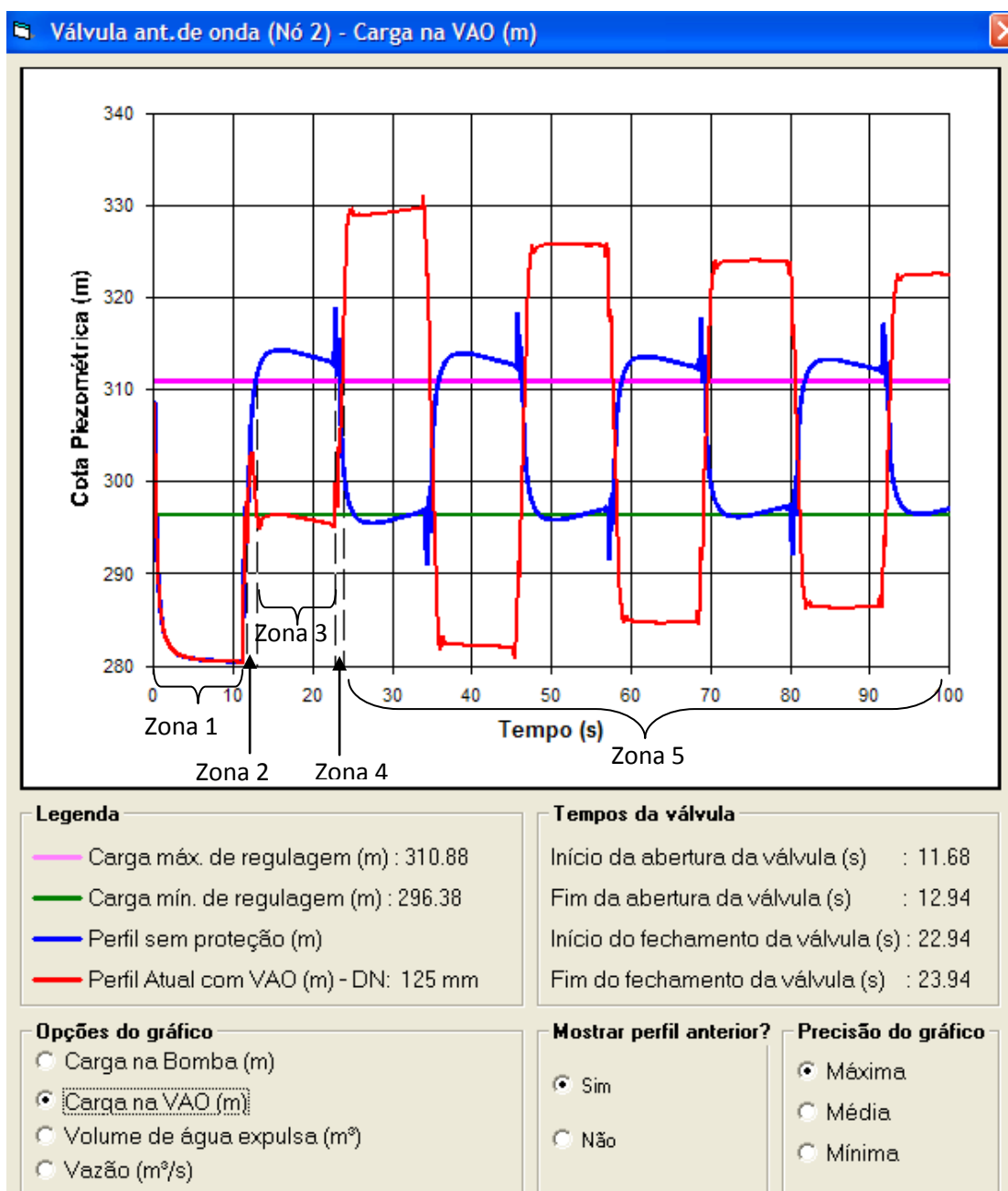


FIGURA 4.33 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Transiente na bomba

No gráfico da figura 4.34, ocorre a formação de transiente na bomba devido ao dimensionamento inadequado segundo o critério do de intervalo do tempo de fechamento da válvula.

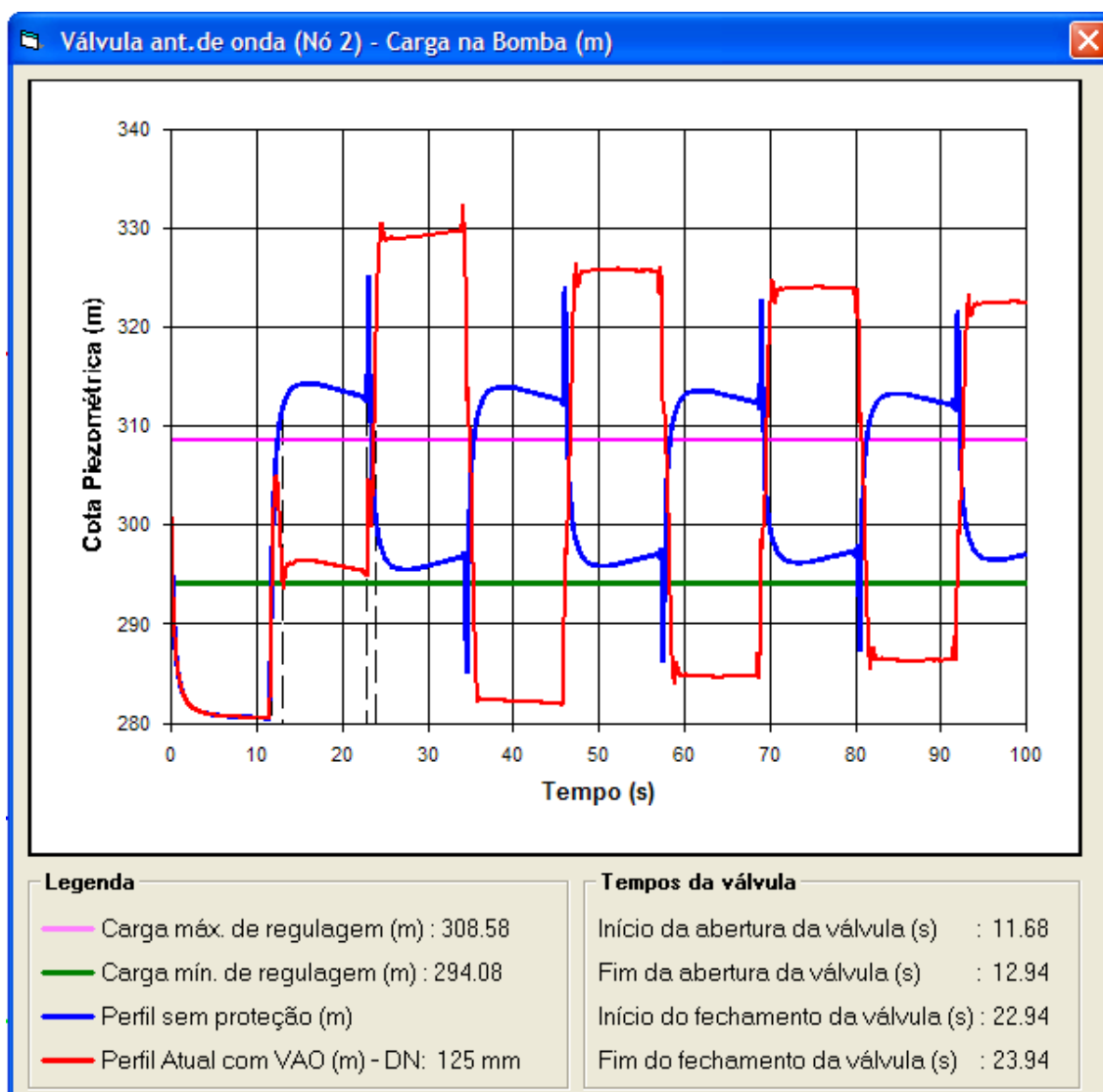


FIGURA 4.34 - Gráfico do transiente na bomba

No gráfico da figura 4.35 o fechamento inadequado ($\Delta T_{FV} = 1,00$ s) é comparado com o fechamento adequado ($\Delta T_{FV} = 30,00$ s).

A formação de transiente em toda a tubulação, ocorre devido ao dimensionamento inadequado do intervalo do tempo de fechamento da VAO mostrado pela envoltória representada em vermelho no gráfico da figura 4.35.

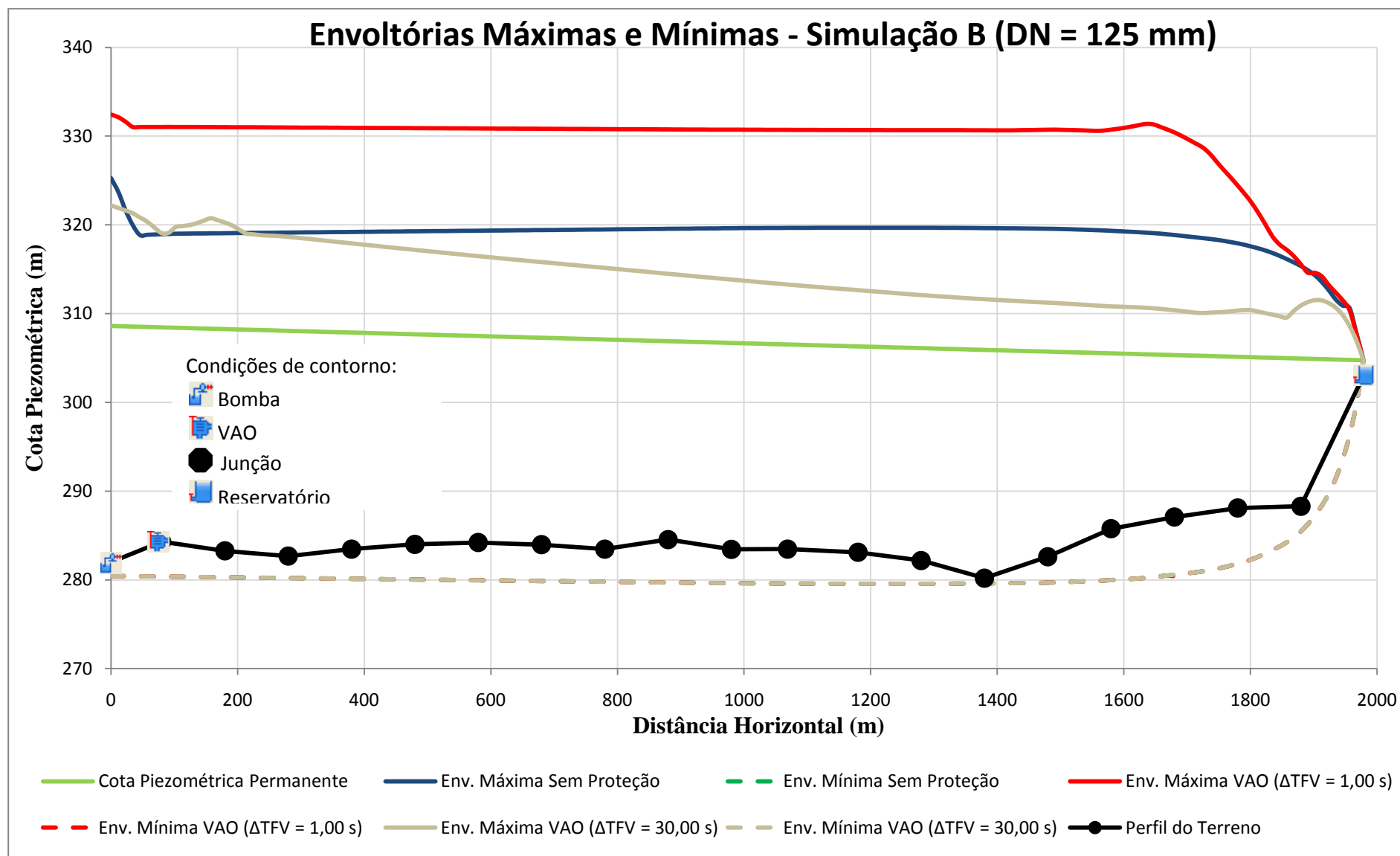


FIGURA 4.35 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

4.5. SIMULAÇÃO C

A adutora será dividida 22 nós, onde o primeiro nó é a bomba e o último nó é um reservatório de nível constante, e número de divisões do menor trecho igual a 7. O material da tubulação é PVC DEFOFO, com rugosidade de 0,0015 mm, módulo de elasticidade de 3 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,38; espessura de 11,0 mm. A tabela 14 resume os dados de entrada dessa simulação.

TABELA 14 - Dados do trecho da simulação C

Trecho	C _{mont} (m)	C _{jus} (m)	L(m)	DN(mm)
1	249,22	252,11	80,00	250
2	252,11	255,80	100,00	250
3	255,80	257,49	100,00	250
4	257,49	258,04	100,00	250
5	258,04	263,86	100,00	250
6	263,86	264,56	100,00	250
7	264,56	266,62	100,00	250
8	266,62	270,18	100,00	250
9	270,18	274,63	100,00	250
10	274,63	277,99	100,00	250
11	277,99	280,39	100,00	250
12	280,39	284,23	100,00	250
13	284,23	288,85	100,00	250
14	288,85	291,55	100,00	250
15	291,55	300,62	100,00	250
16	300,62	300,18	100,00	250
17	300,18	300,58	100,00	250
18	300,58	303,47	100,00	250
19	303,47	305,68	100,00	250
20	305,68	307,98	100,00	250
21	307,98	310,02	120,00	250

Os dados de entrada da VAO estão descritos na tabela 15.

TABELA 15 - Dados de entrada da VAO

Variáveis	TIAV	ΔTAV	$\Delta TPVA$	$\Delta T FV$	P _{mínR}	P _{máxR}	DN
Valor	11,88	0,54	10,00	30,00	37,85	83,27	65
Unidade	s	s	s	s	mca	mca	mm

Nessa análise foi considerado que a válvula está com o dimensionamento ótimo para todas as variáveis. Os valores ótimos são considerados com base no exposto no item 3.4 deste trabalho, onde considera-se esses valores como dados de entrada para o modelo da VAO.

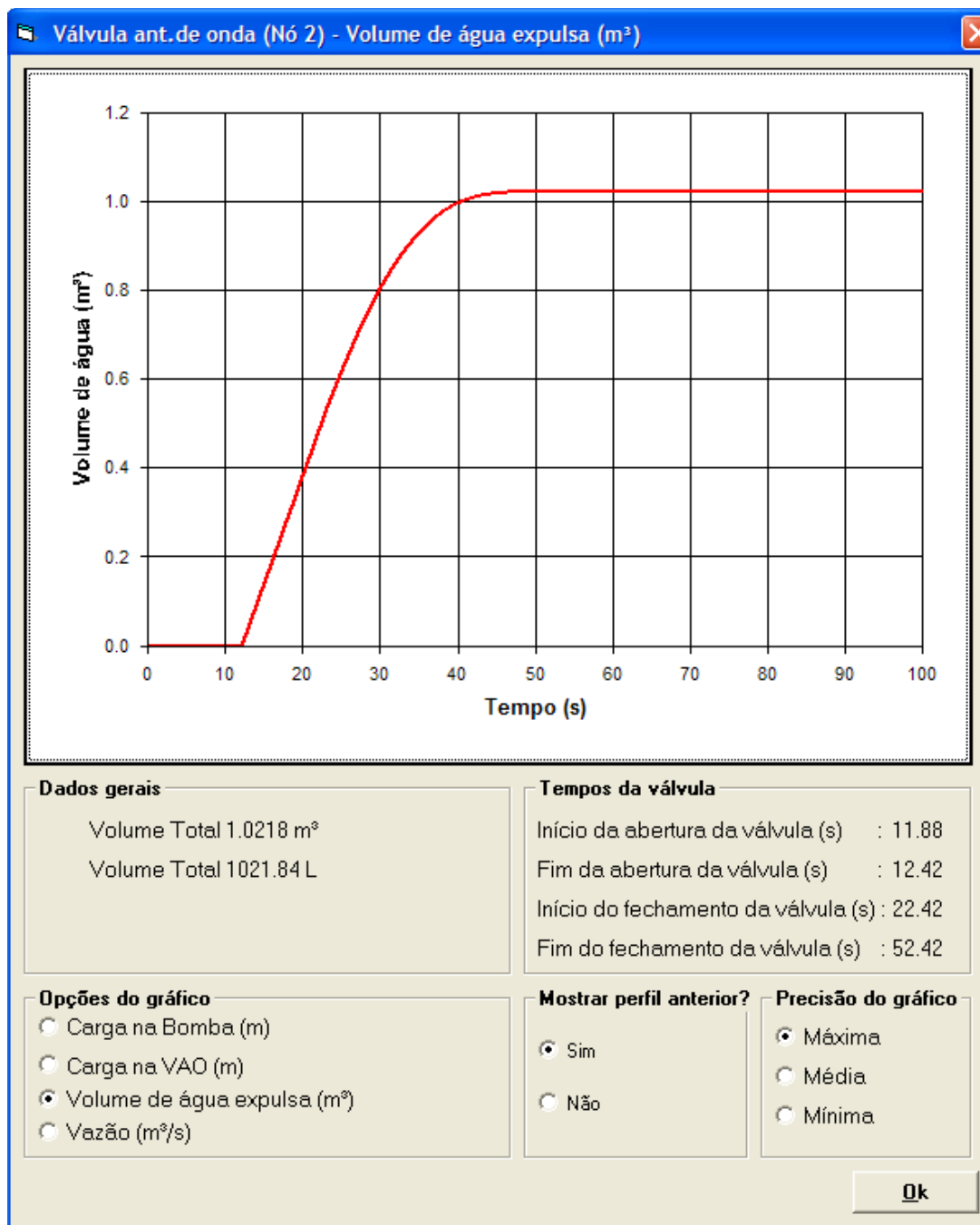


FIGURA 4.36 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

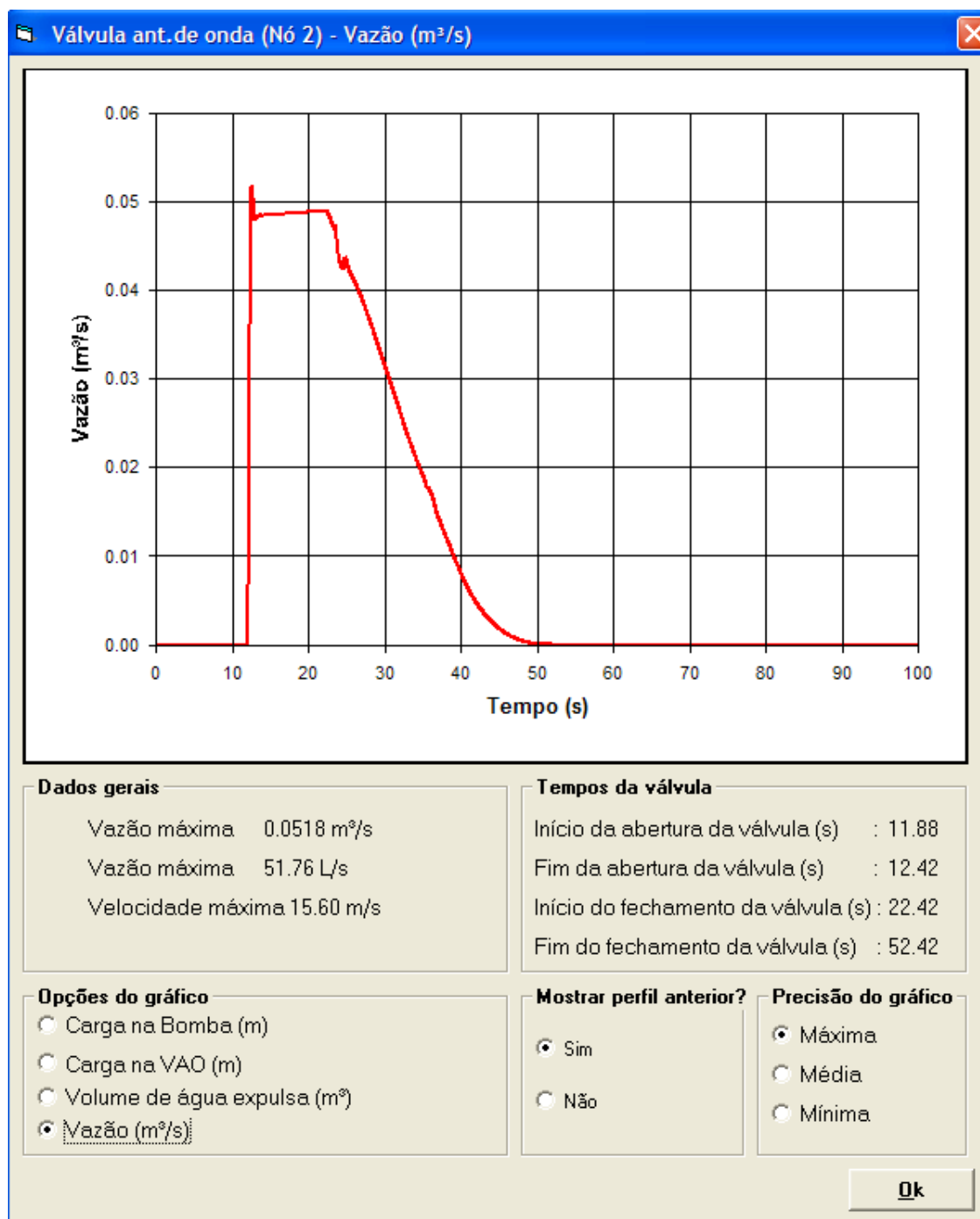


FIGURA 4.37 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na válvula

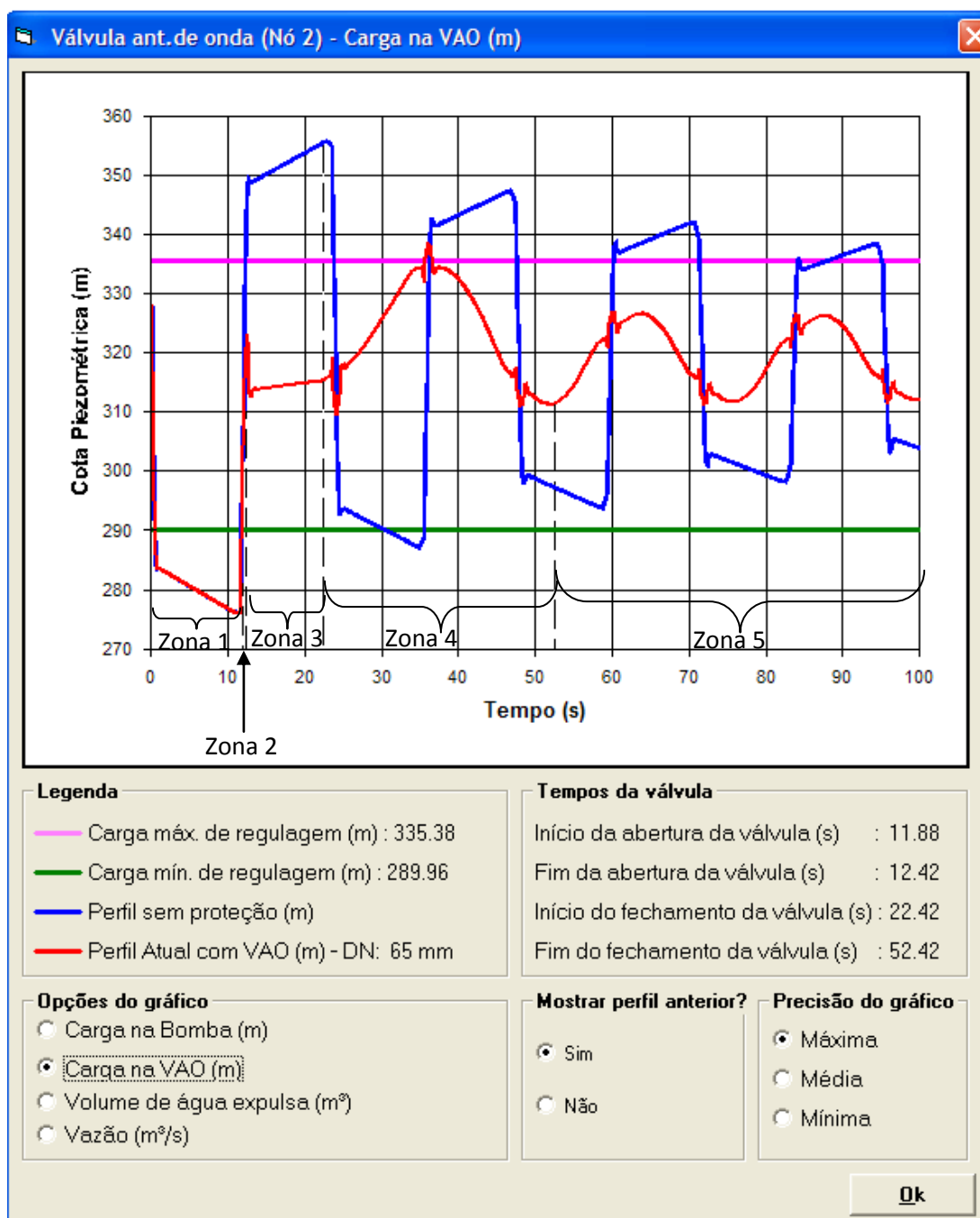


FIGURA 4.38 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na bomba

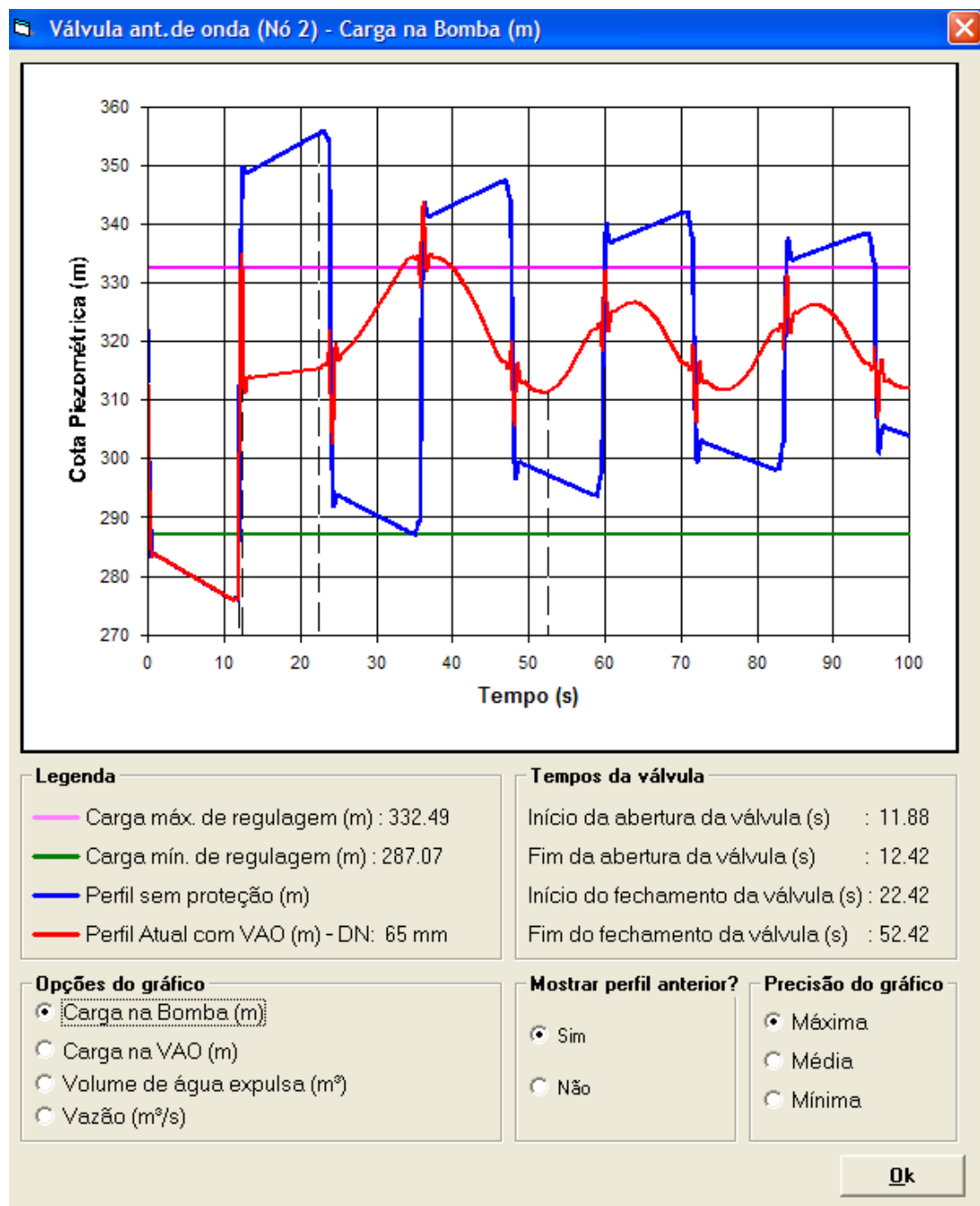


FIGURA 4.39 - Gráfico do transiente na bomba

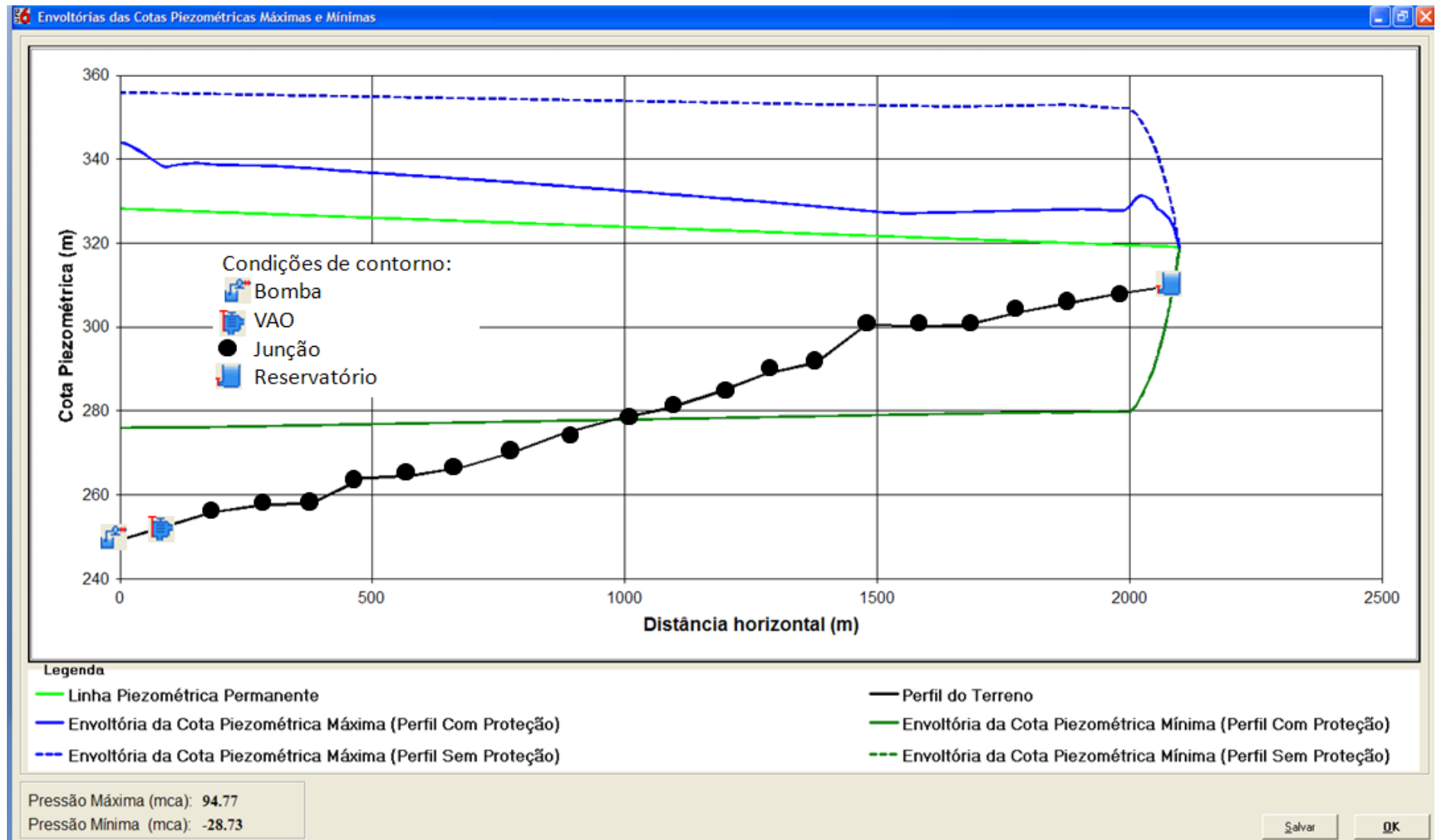


FIGURA 4.40 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

4.6. SIMULAÇÃO D

A adutora será dividida em 25 nós, onde o primeiro nó é a bomba e o último nó é um reservatório de nível constante, e número de divisões do menor trecho igual a 7. O material da tubulação é o Ferro Fundido Dúctil Classe K7, com rugosidade de 0,26 mm, módulo de elasticidade de 172 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,28; espessura de 8,0 mm. A tabela abaixo resume os dados de entrada dessa simulação.

TABELA 16 - Dados do trecho da simulação D

Trecho	C _{mont} (m)	C _{jus} (m)	L(m)	DN (mm)
1	319,00	363,13	351,74	250
2	363,13	331,05	580,65	250
3	331,05	376,19	620,00	250
4	376,19	400,18	620,00	250
5	400,18	389,50	620,00	250
6	389,50	405,88	620,00	250
7	405,88	428,99	620,00	250
8	428,99	429,33	620,00	250
9	429,33	424,85	620,00	250
10	424,85	443,18	620,00	250
11	443,18	415,81	620,00	250
12	415,81	388,03	620,00	250
13	388,03	377,22	620,00	250
14	377,22	371,12	620,00	250
15	371,12	365,05	620,00	250
16	365,05	384,84	620,00	250
17	384,84	402,52	620,00	250
18	402,52	408,23	620,00	250
19	408,23	402,93	620,00	250
20	402,93	381,85	620,00	250
21	381,85	374,04	620,00	250
22	374,04	390,73	620,00	250
23	390,73	389,21	620,00	250
24	389,21	407,10	284,20	250

Nessa análise, foi considerado que a válvula está com o dimensionamento ótimo para todas as variáveis consideradas. Os valores ótimos são considerados com base no exposto no item 3.4 deste trabalho, onde considera-se esses valores como dados de entrada para o modelo da VAO. Porém, nessa simulação, o intervalo do tempo de abertura foi modificado de

5,48 s para 1,00 s, sendo uma modificação que acarretou numa melhora significativa do amortecimento da onda de sobrepressão.

A tabela 17 mostra os dados de entrada da válvula antecipadora de onda.

TABELA 17 - Dados de entrada da VAO

Variáveis	TIAV	ΔTAV	$\Delta TPVA$	$\Delta TFCV$	PmínR	PmáxR	DN
Valor	24,29	1,00/5,48	10,00	30,00	51,36	112,99	40
Unidade	s	s	s	s	mca	mca	mm

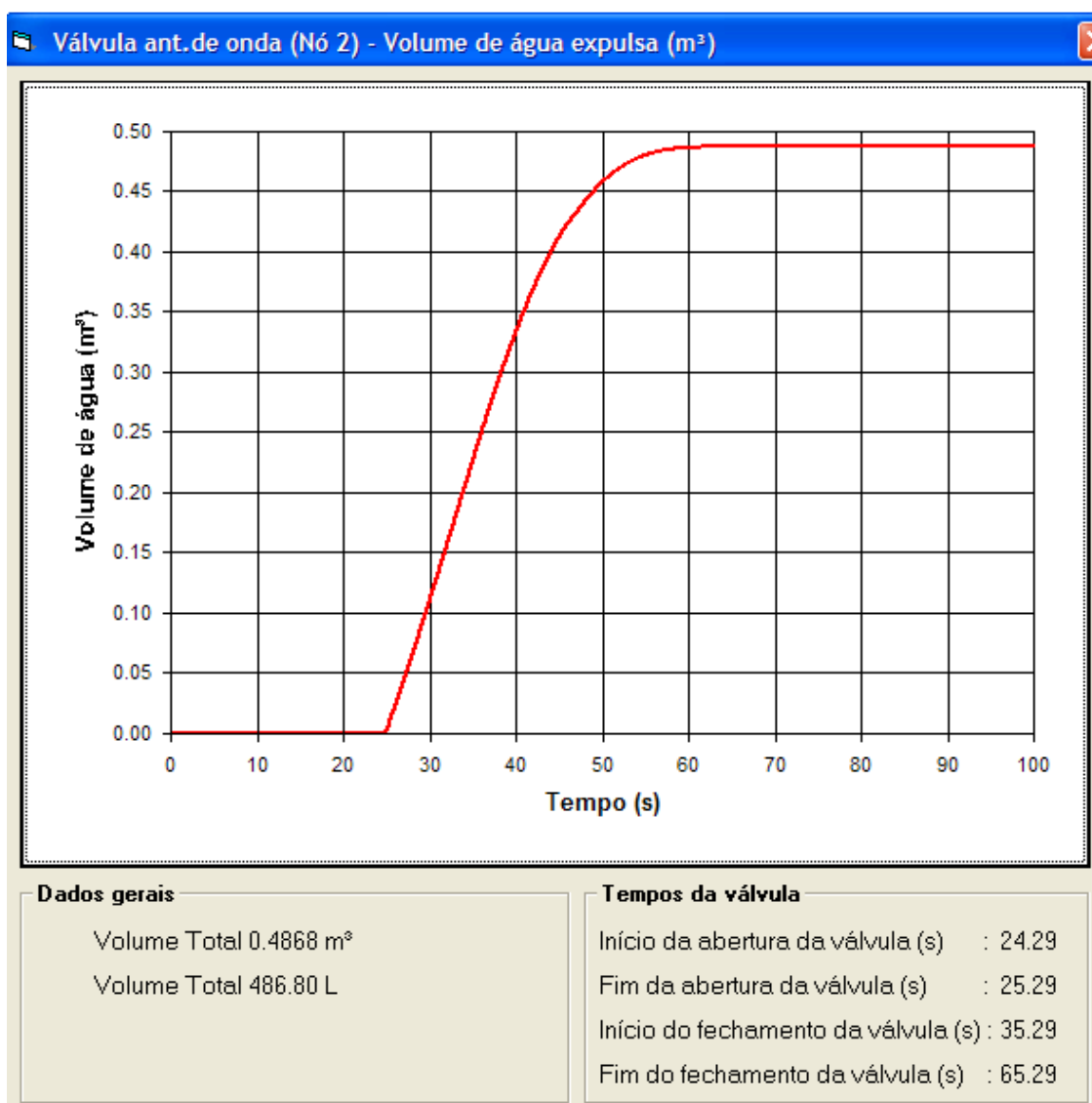


FIGURA 4.41 - Gráfico do volume de água expulsa pela válvula antecipadora de onda

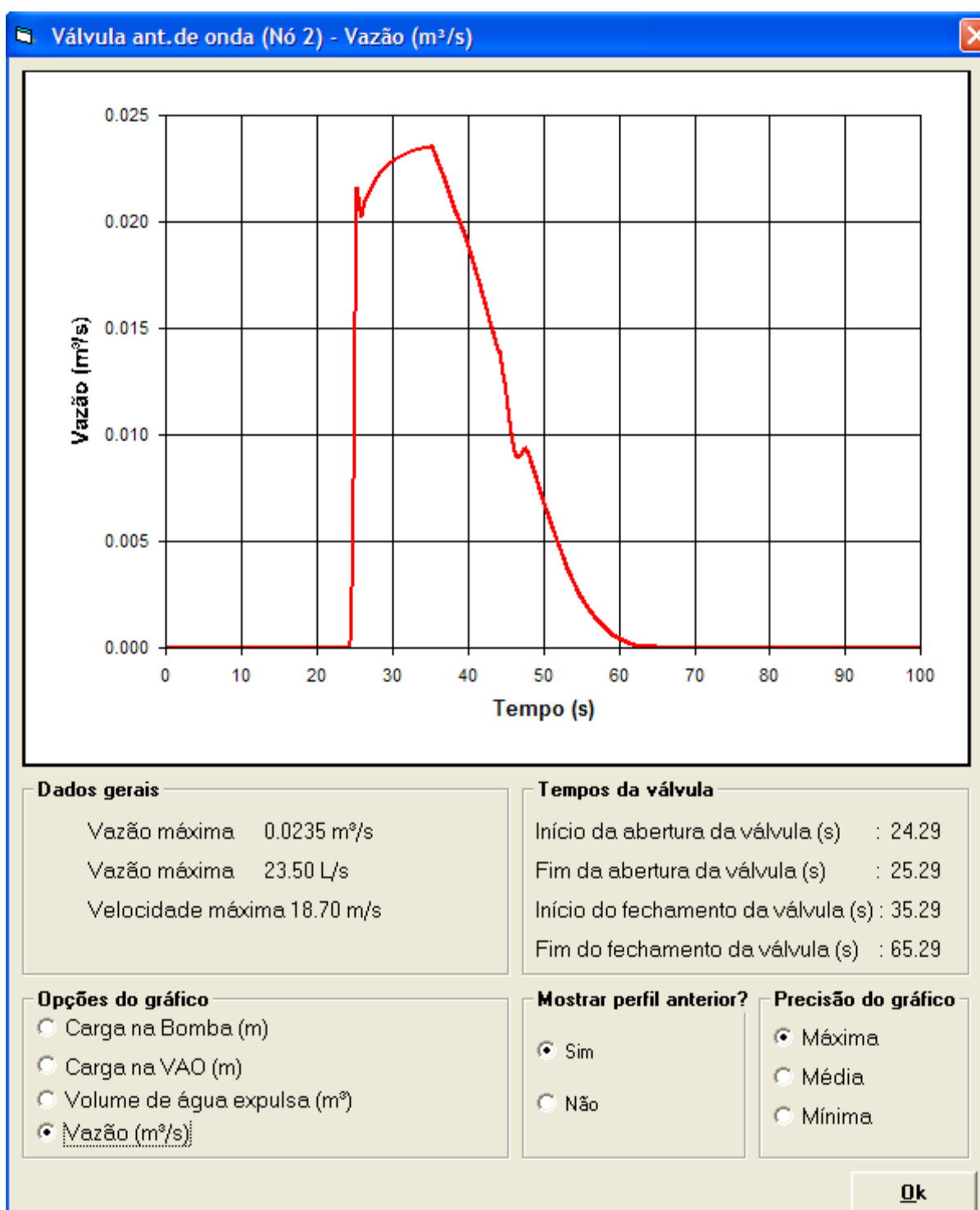


FIGURA 4.42 - Gráfico da vazão de água na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na válvula

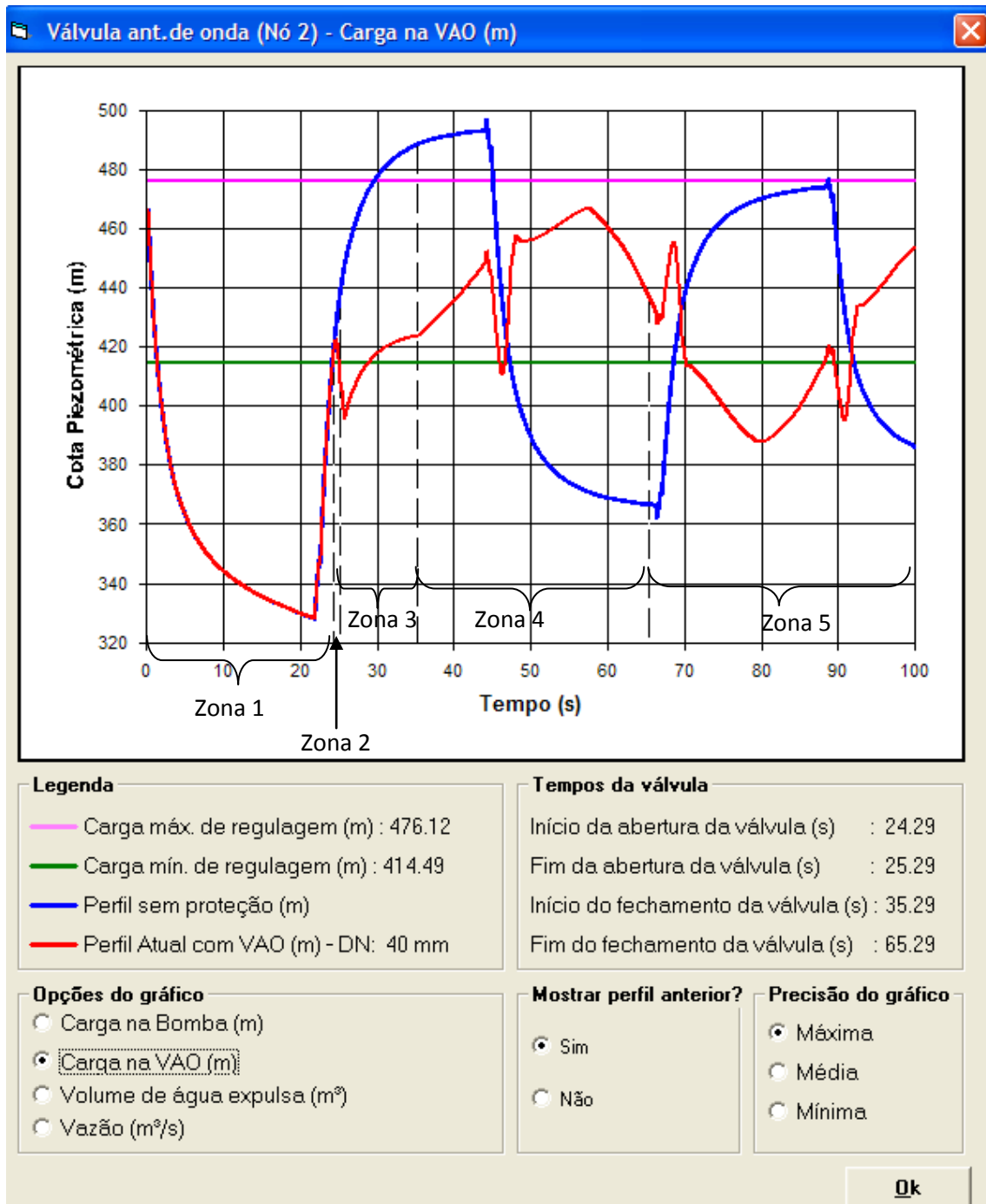


FIGURA 4.43 - Gráfico do transiente na válvula antecipadora de onda

- Atenuação do transiente na bomba

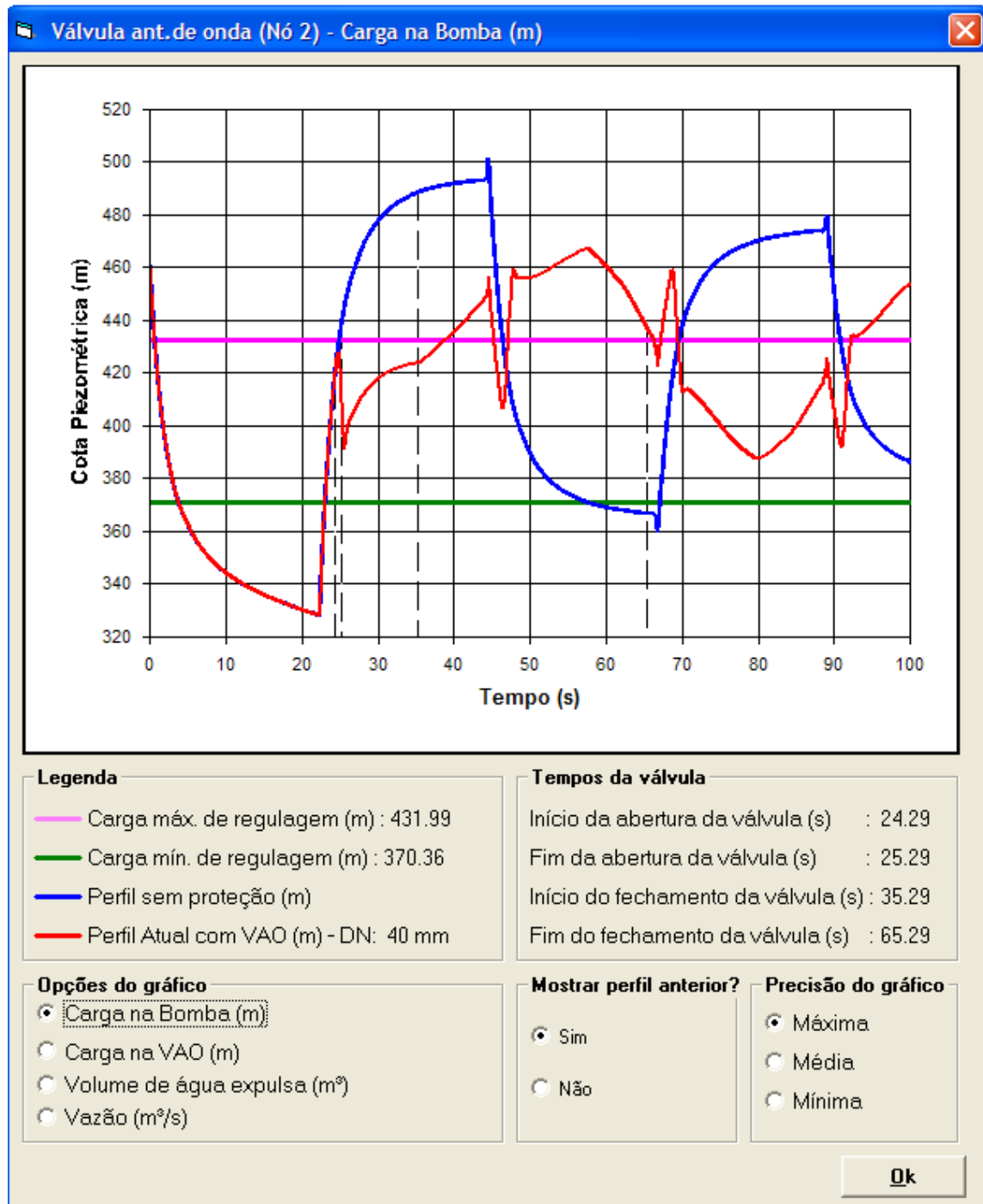


FIGURA 4.44 - Gráfico do transiente na bomba

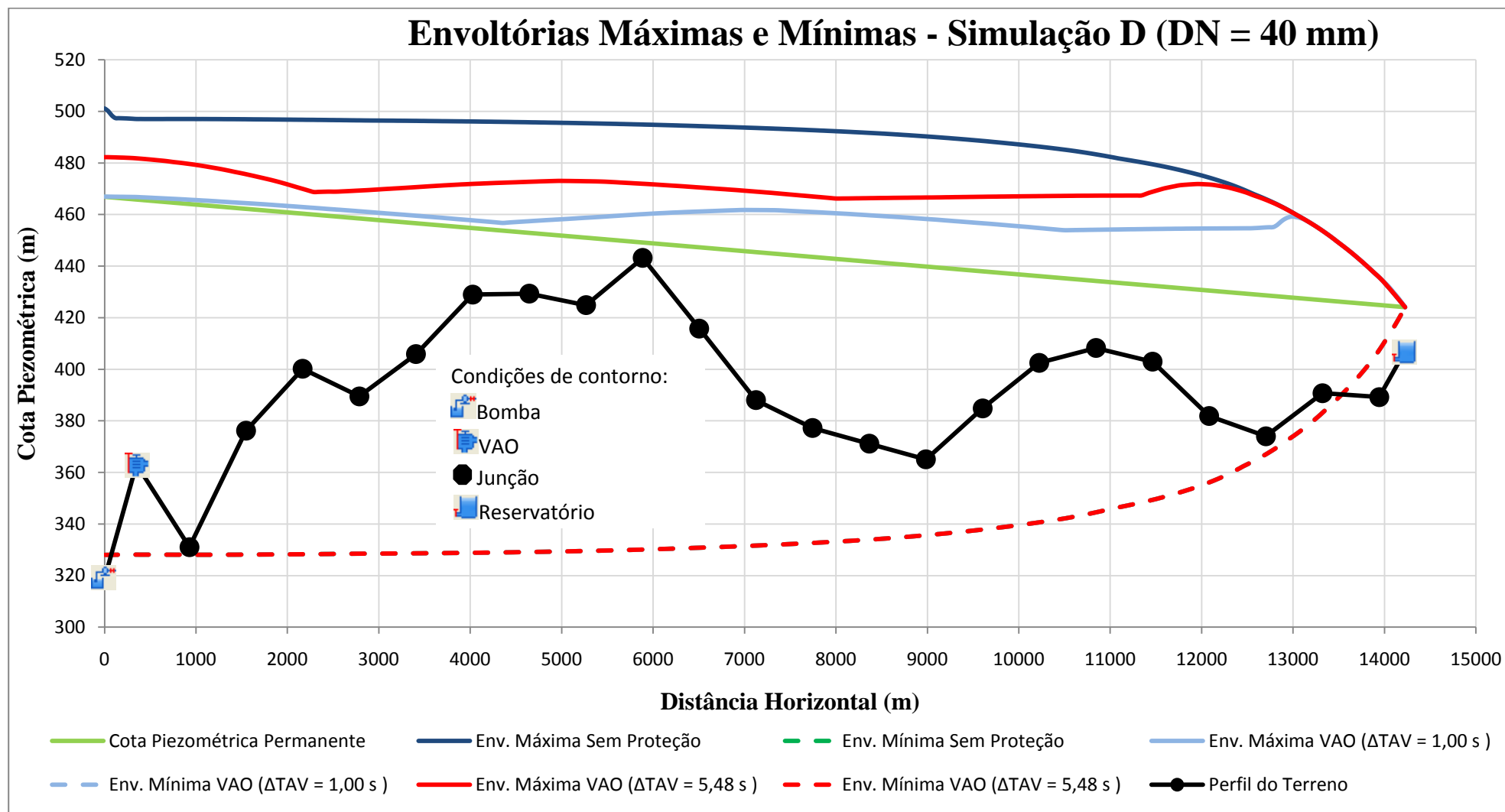


FIGURA 4.45 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas

4.7. CONDIÇÕES DE CONTORNO DA VAO

Como intuito de mostrar os problemas gerados pelo dimensionamento incorreto da VAO, as seguintes variáveis que influenciam no transiente hidráulico foram testadas: Diâmetro nominal da válvula (DN), tempo inicial de abertura da válvula (TIAV), intervalos do tempo de abertura da válvula (ΔTAV), do tempo de permanência da válvula aberta ($\Delta TPVA$) e do tempo de fechamento da válvula ($\Delta TFFV$). As tabelas de 18 até 22 sintetizam as variáveis de entrada no modelo da VAO.

TABELA 18 - Dados das simulações (análise do DN)

Simulação	Numeração da figura	DN (mm)	P _{máxR} (mca)	P _{minR} (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	$\Delta TFFV$ (s)
Cuiá	4.46	12/100/200	58,48	26,58	10,22	1,56	10,00	30,00
A	4.47	40/100/150	77,50	35,23	20,72	1,07	10,00	30,00
B	4.48	25/75/200	26,58	12,08	11,68	1,26	10,00	30,00
C	4.49	20/65/125	83,27	37,85	11,88	0,54	10,00	30,00

TABELA 19 - Dados das simulações (análise do TIAV)

Simulação	Numeração da figura	DN (mm)	P _{máxR} (mca)	P _{minR} (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	$\Delta TFFV$ (s)
Cuiá	4.50	100	58,48	26,58	0,10/10,22	1,56	10,00	30,00
A	4.51	100	77,50	35,23	0,90/20,72/25,00	1,07	10,00	30,00
B	4.52	75	26,58	12,08	11,68/20,00	1,26	10,00	30,00
C	4.53	65	83,27	37,85	0,40/11,88/23,00	0,54	10,00	30,00

TABELA 20 - Dados das simulações (análise do ΔTAV)

Simulação	Numeração da figura	DN (mm)	P _{máxR} (mca)	P _{minR} (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	$\Delta TFFV$ (s)
Cuiá	4.54	100	58,48	26,58	10,22	0,10/1,56/5,00	10,00	30,00
A	4.55	100	77,50	35,23	20,72	0,10/1,07/5,00	10,00	30,00
B	4.56	75	26,58	12,08	11,68	0,10/1,26/5,00	10,00	30,00
C	4.57	65	83,27	37,85	11,88	0,10/0,54/5,00	10,00	30,00

TABELA 21 - Dados das simulações (análise do $\Delta TPVA$)

Simulação	Numeração da figura	DN (mm)	P _{máxR} (mca)	P _{minR} (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	$\Delta TFFV$ (s)
Cuiá	4.58	100	58,48	26,58	10,22	1,56	1,00/10,00/20,00	30,00
A	4.59	100	77,50	35,23	20,72	1,07	1,00/10,00/20,00	30,00
B	4.60	75	26,58	12,08	11,68	1,26	5,00/10,00/20,00	30,00
C	4.61	65	83,27	37,85	11,88	0,54	1,00/10,00/20,00	30,00

TABELA 22 - Dados das simulações (análise do $\Delta TFFV$)

Simulação	Numeração da figura	DN (mm)	P _{máxR} (mca)	P _{minR} (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	$\Delta TFFV$ (s)
Cuiá	4.62	100	58,48	26,58	10,22	1,56	10,00	10,00/20,00/30,00
A	4.63	100	77,50	35,23	20,72	1,07	10,00	10,00/30,00/40,00
B	4.64	75	26,58	12,08	11,68	1,26	10,00	10,00/30,00/40,00
C	4.65	65	83,27	37,85	11,88	0,54	10,00	5,00/30,00/40,00

Os gráficos das figuras 4.46 até 4.49 representam a análise do diâmetro nominal da válvula, assim a análise dos extremos (válvula subdimensionada e superdimensionada) será efetuado nesses gráficos.

Os gráficos das figuras 4.50 até 4.53 representam a análise do tempo inicial de abertura da válvula, dessa forma, o efeito do início da abertura, repentina ou atrasada será analisada.

Os gráficos das figuras 4.54 até 4.57 representam a análise do intervalo do tempo de abertura da válvula, desse modo os efeitos da abertura serão analisados.

Os gráficos das figuras 4.58 até 4.61 representam a análise do intervalo do tempo de permanência da válvula aberta, assim verifica-se a influência desta variável no modelo da válvula antecipadora de onda.

Os gráficos das figuras 4.62 até 4.65 representam a análise do intervalo do tempo de fechamento da válvula. A formação de transiente será verificada para o caso de fechamento repentino.

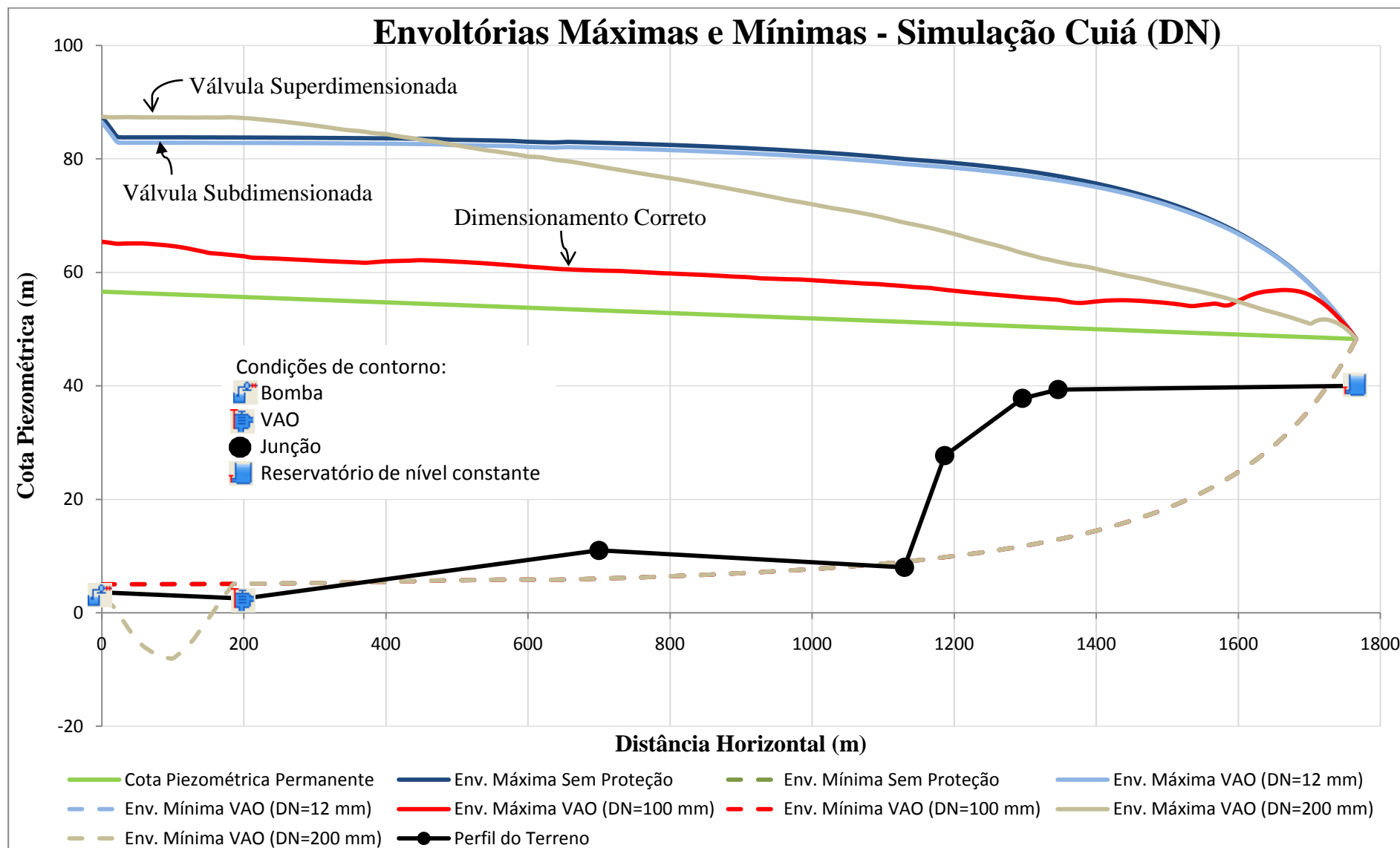


FIGURA 4.46 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”

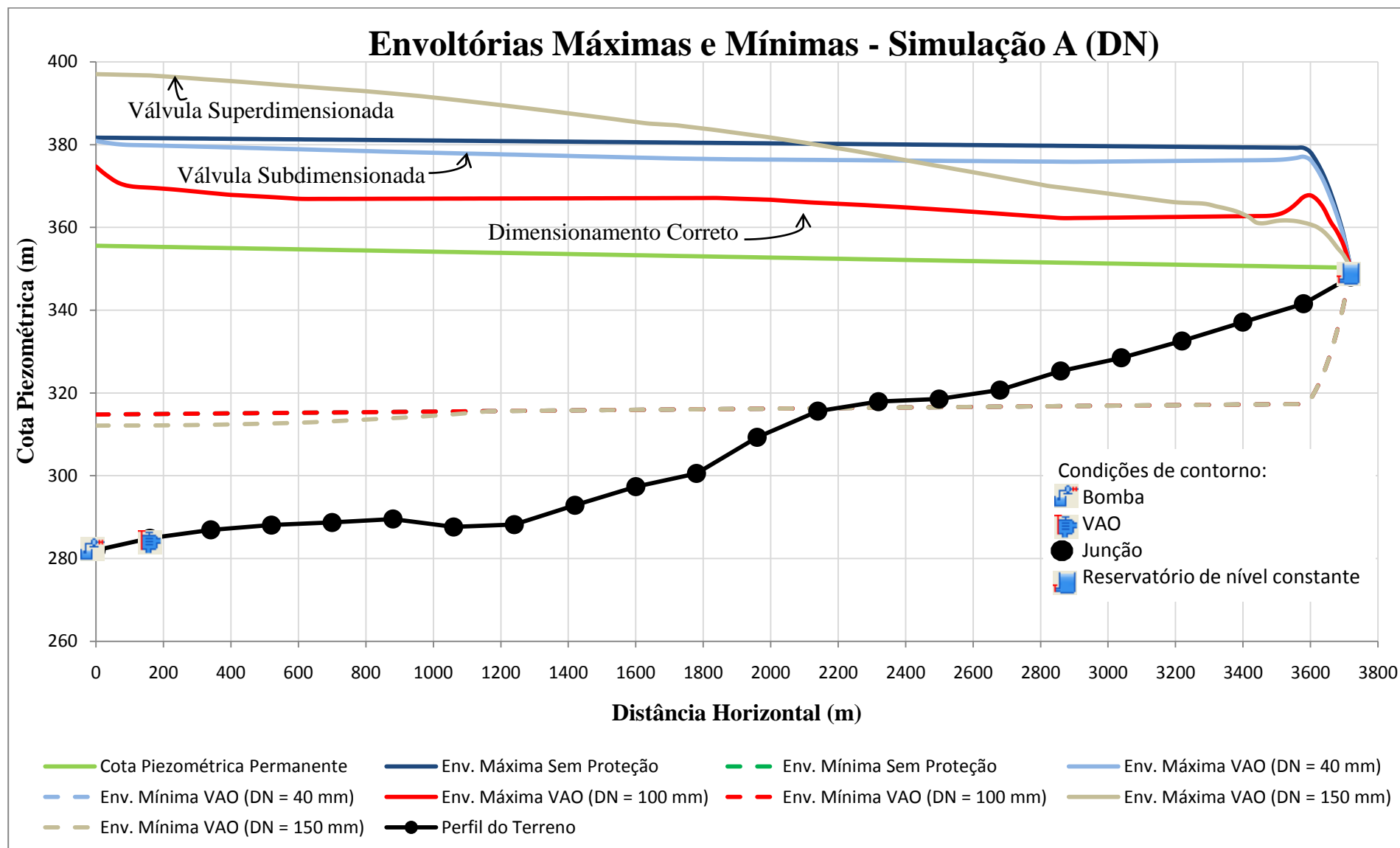


FIGURA 4.47 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”

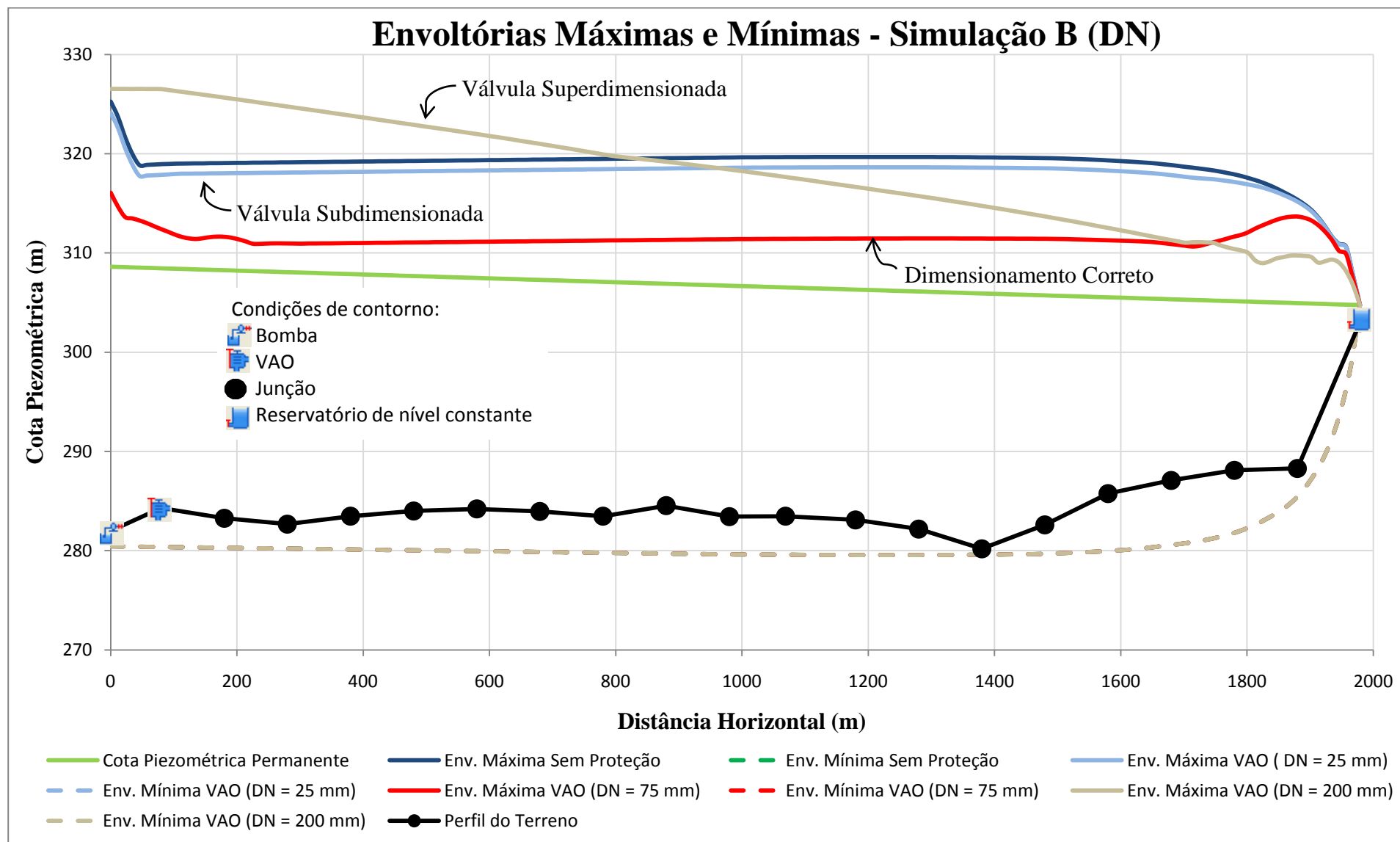


FIGURA 4.48 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”

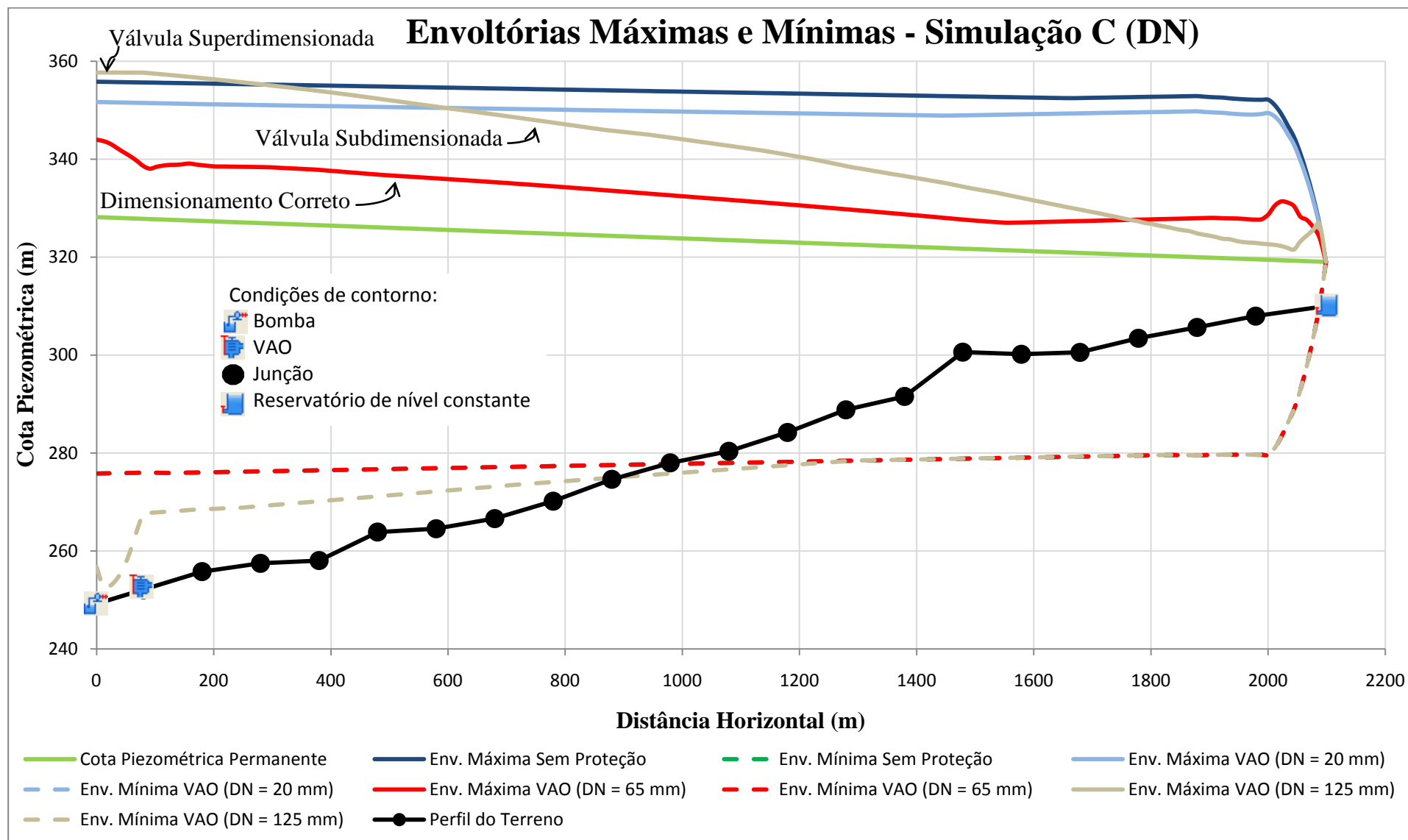


FIGURA 4.49 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”

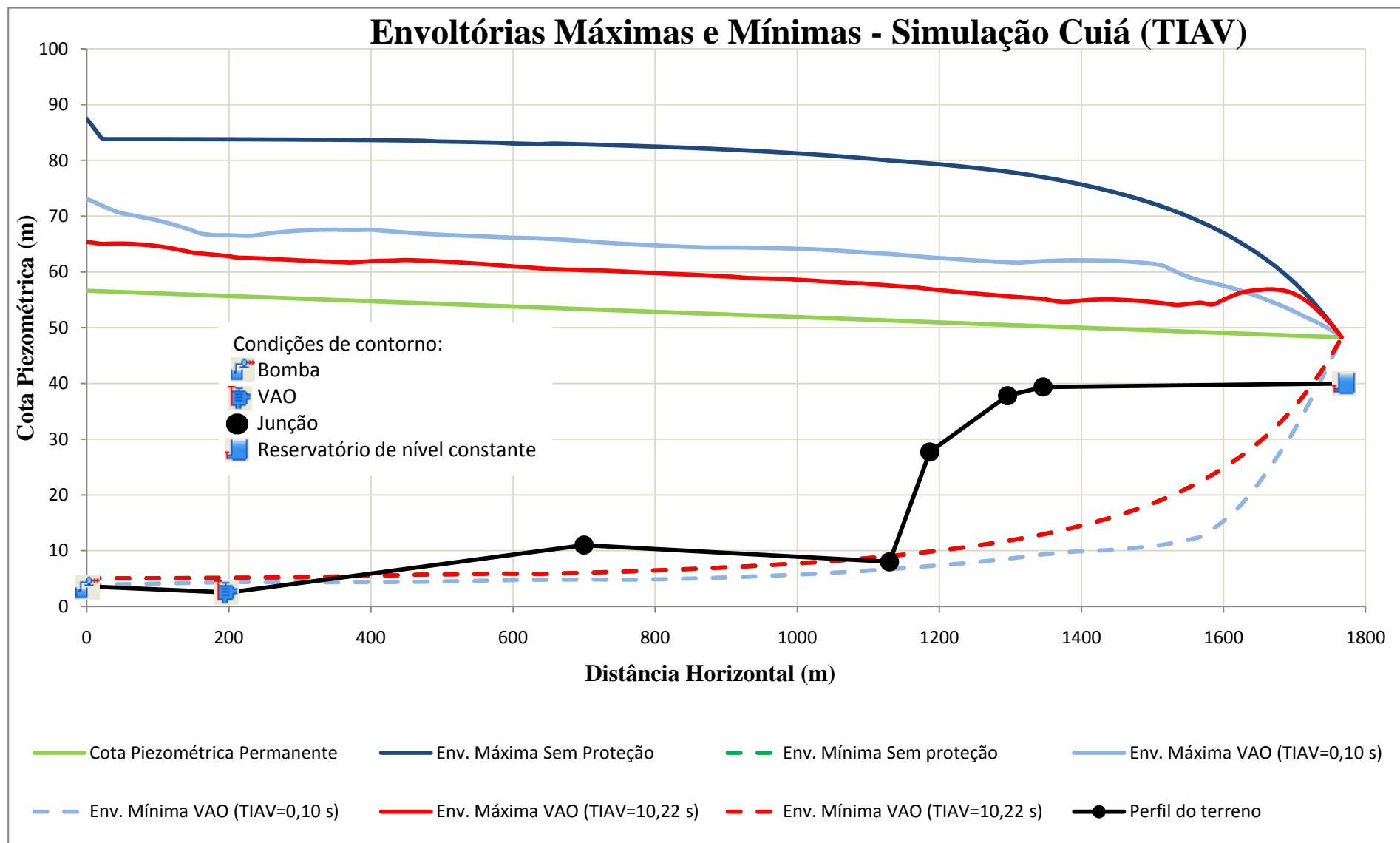


FIGURA 4.50 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”

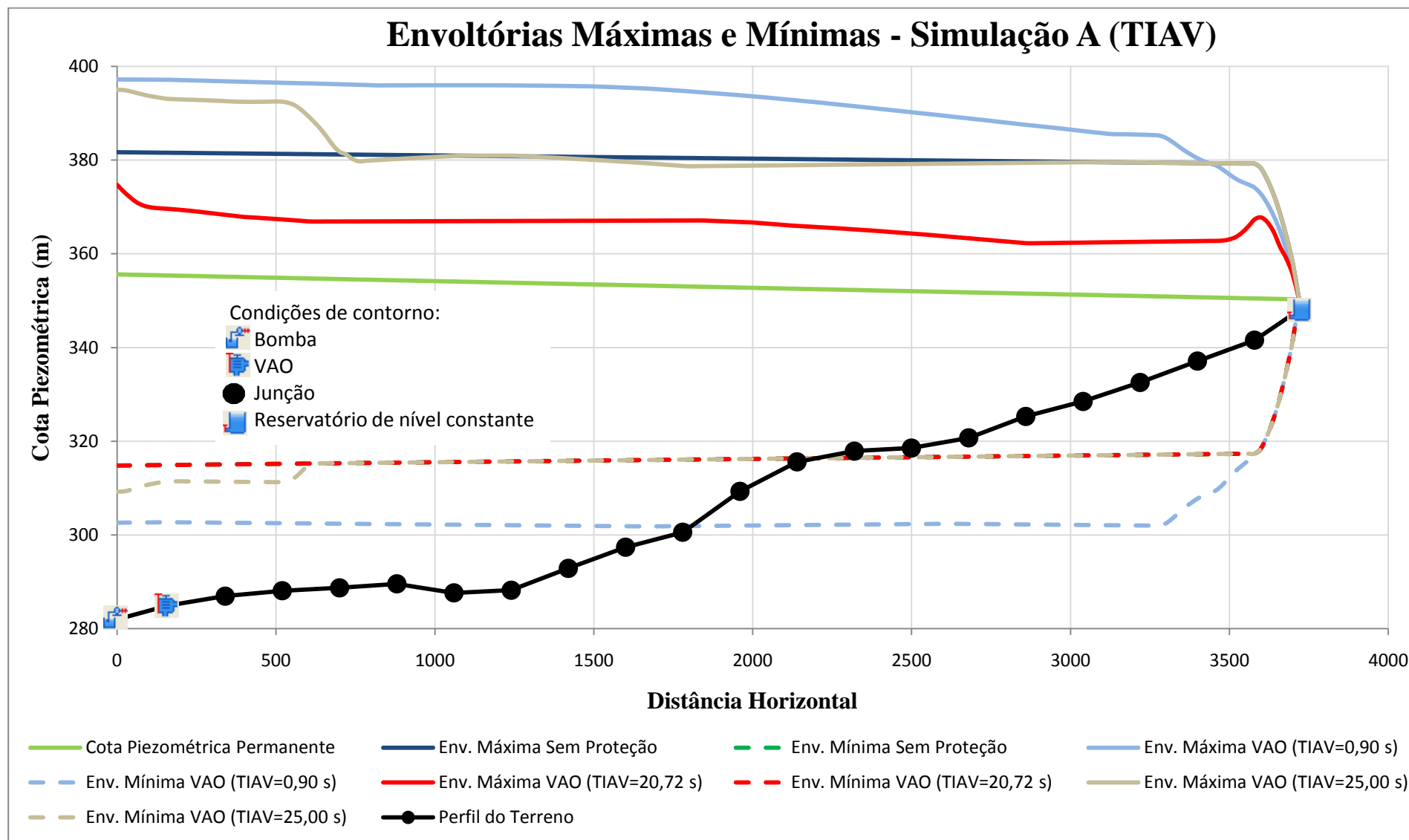


FIGURA 4.51 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”

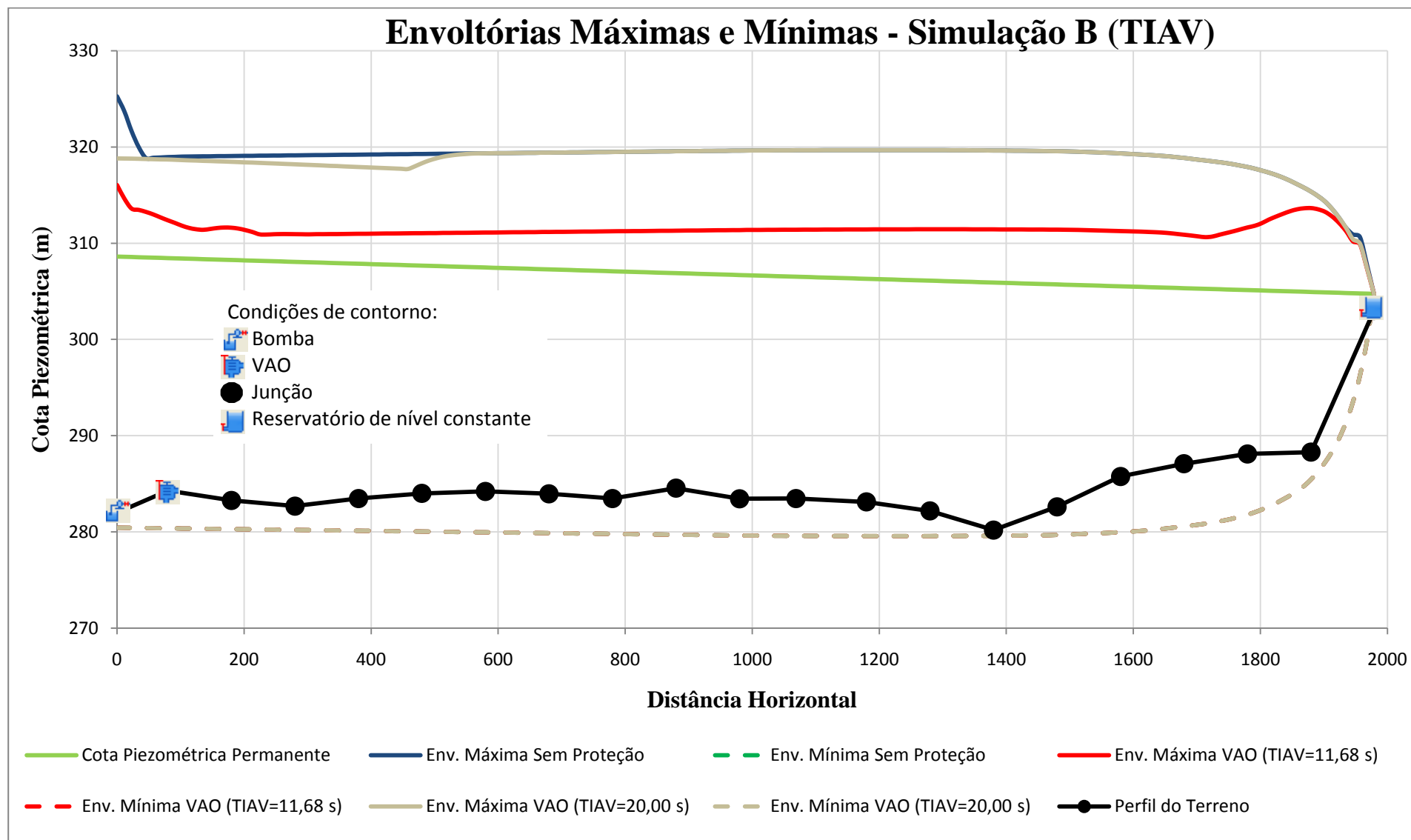


FIGURA 4.52 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”

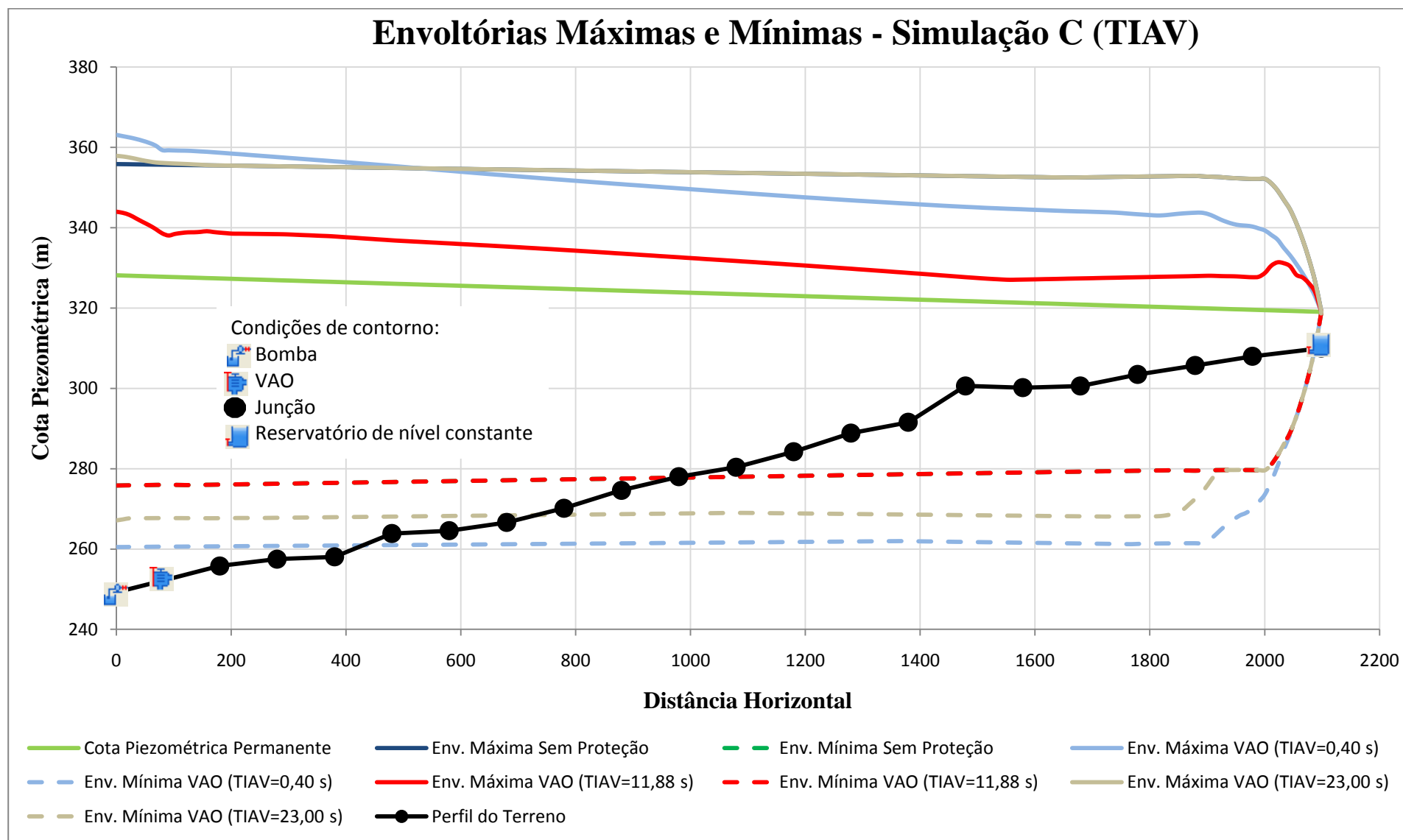


FIGURA 4.53 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”

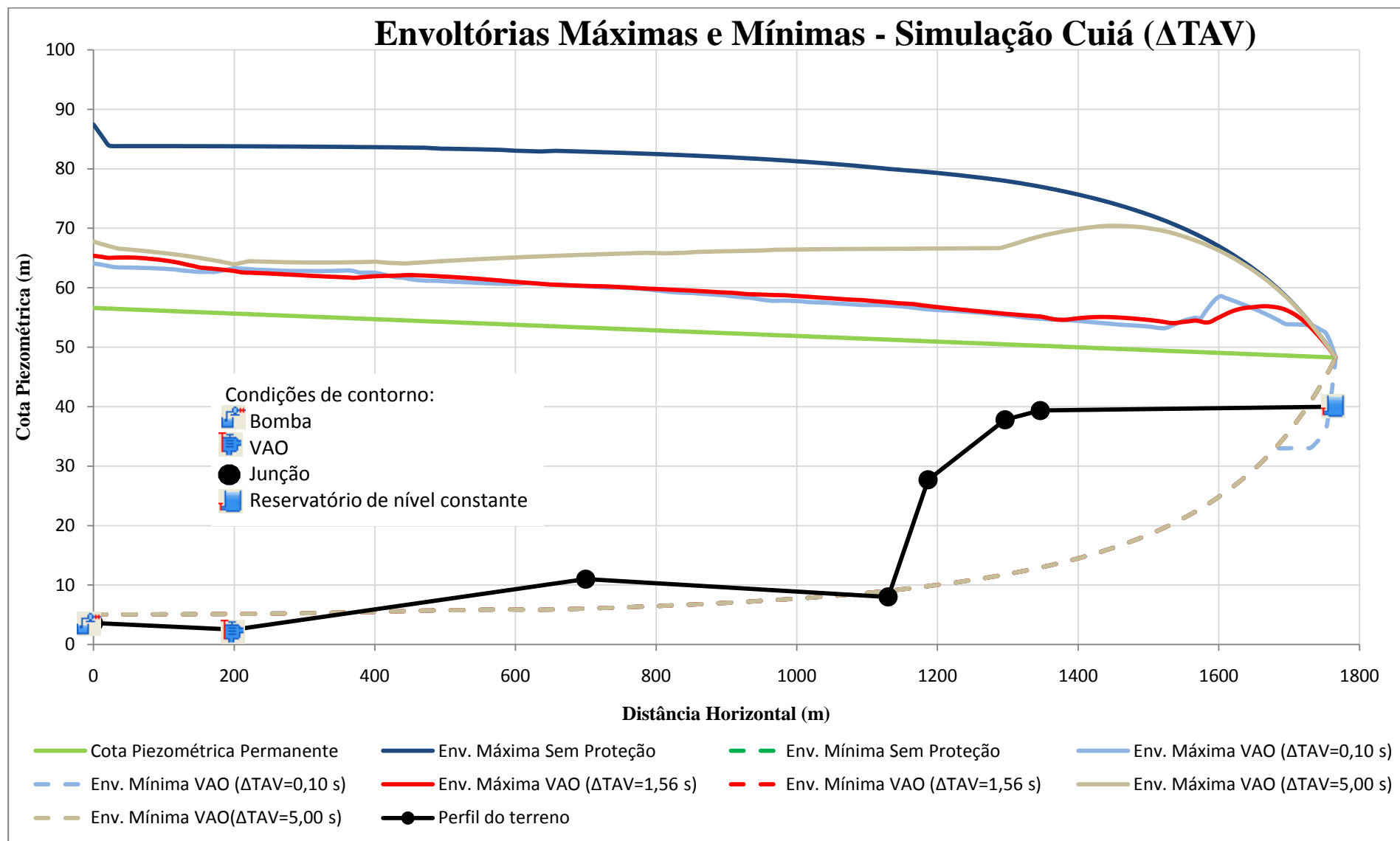


FIGURA 4.54 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”

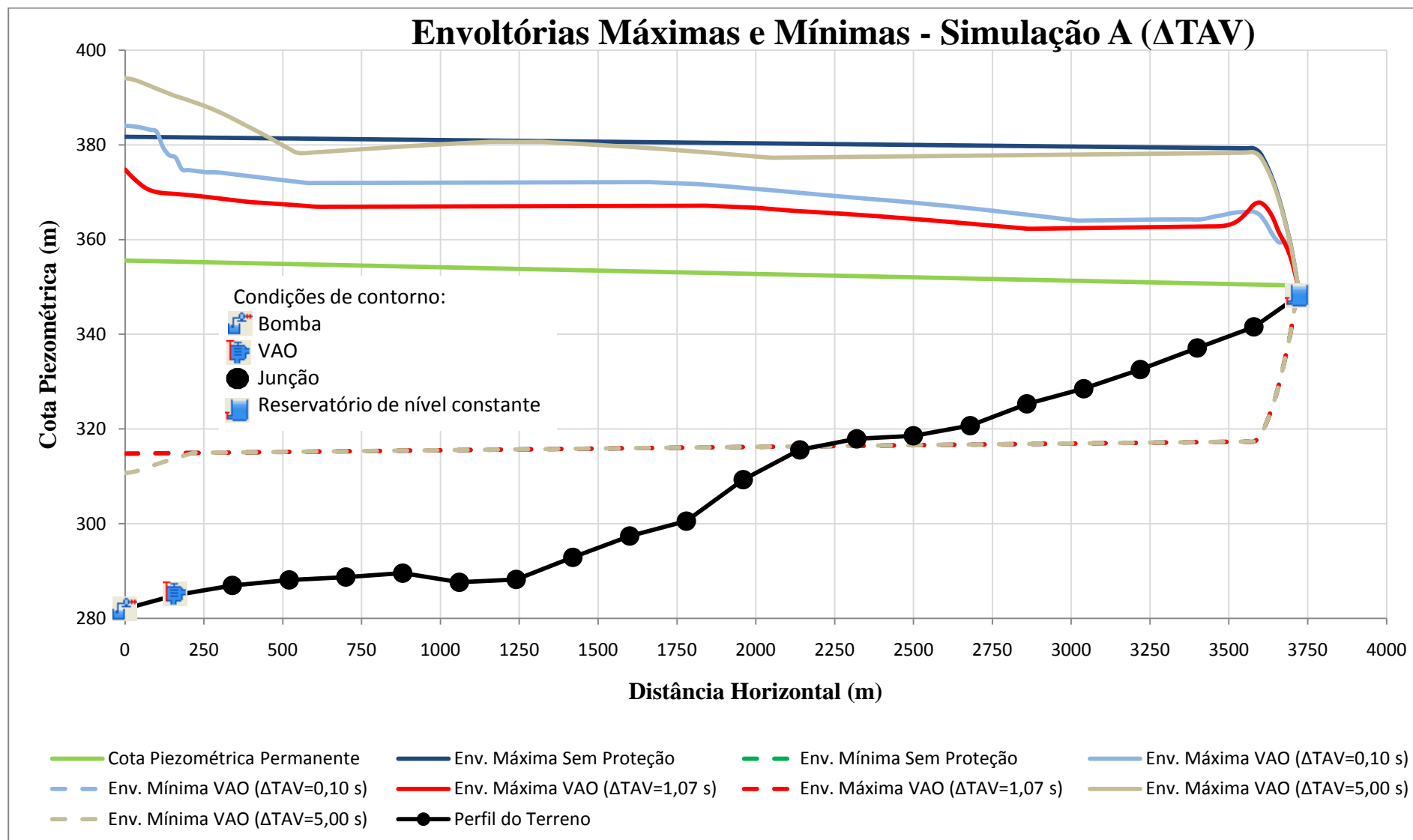


FIGURA 4.55 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”

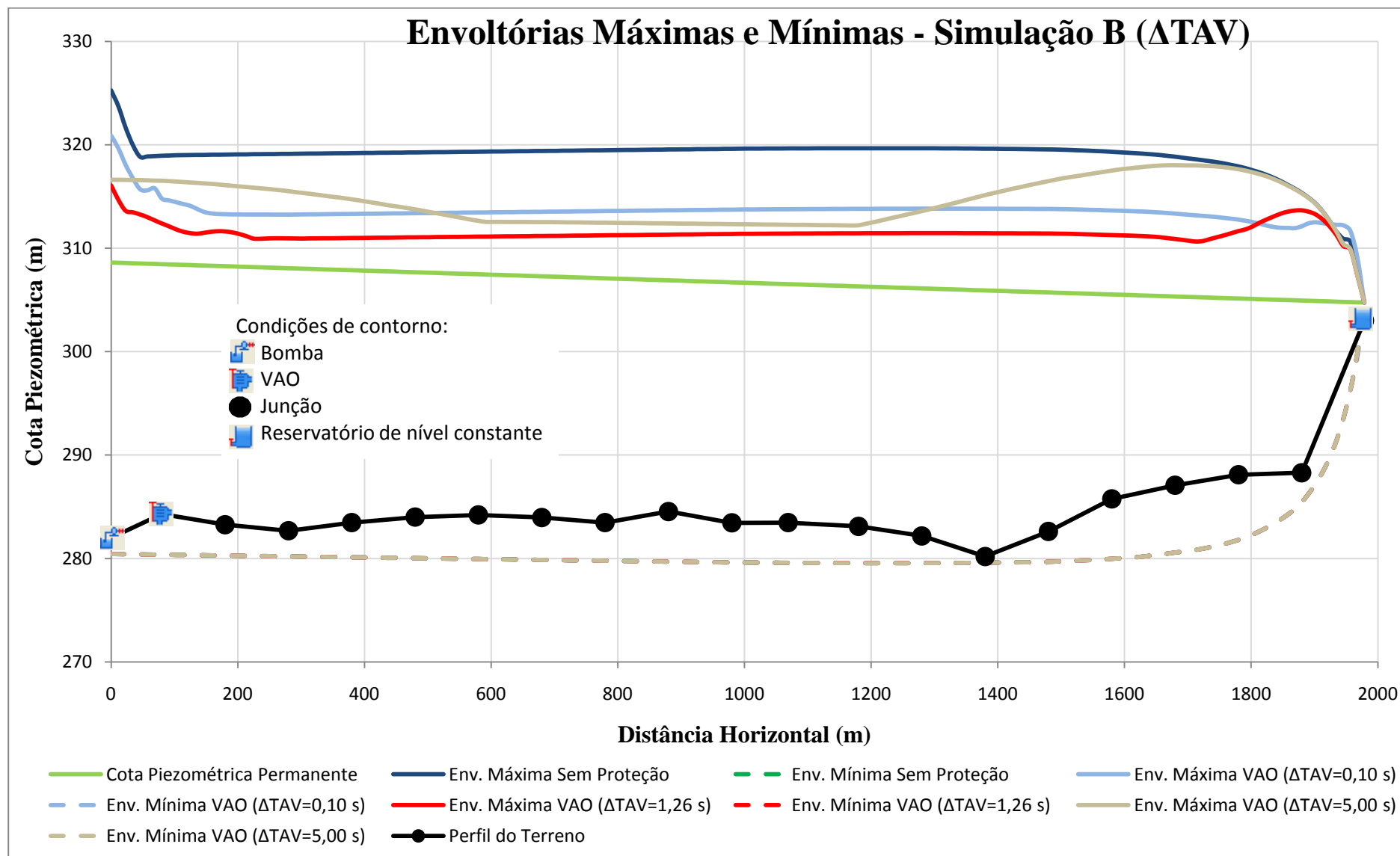


FIGURA 4.56 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”

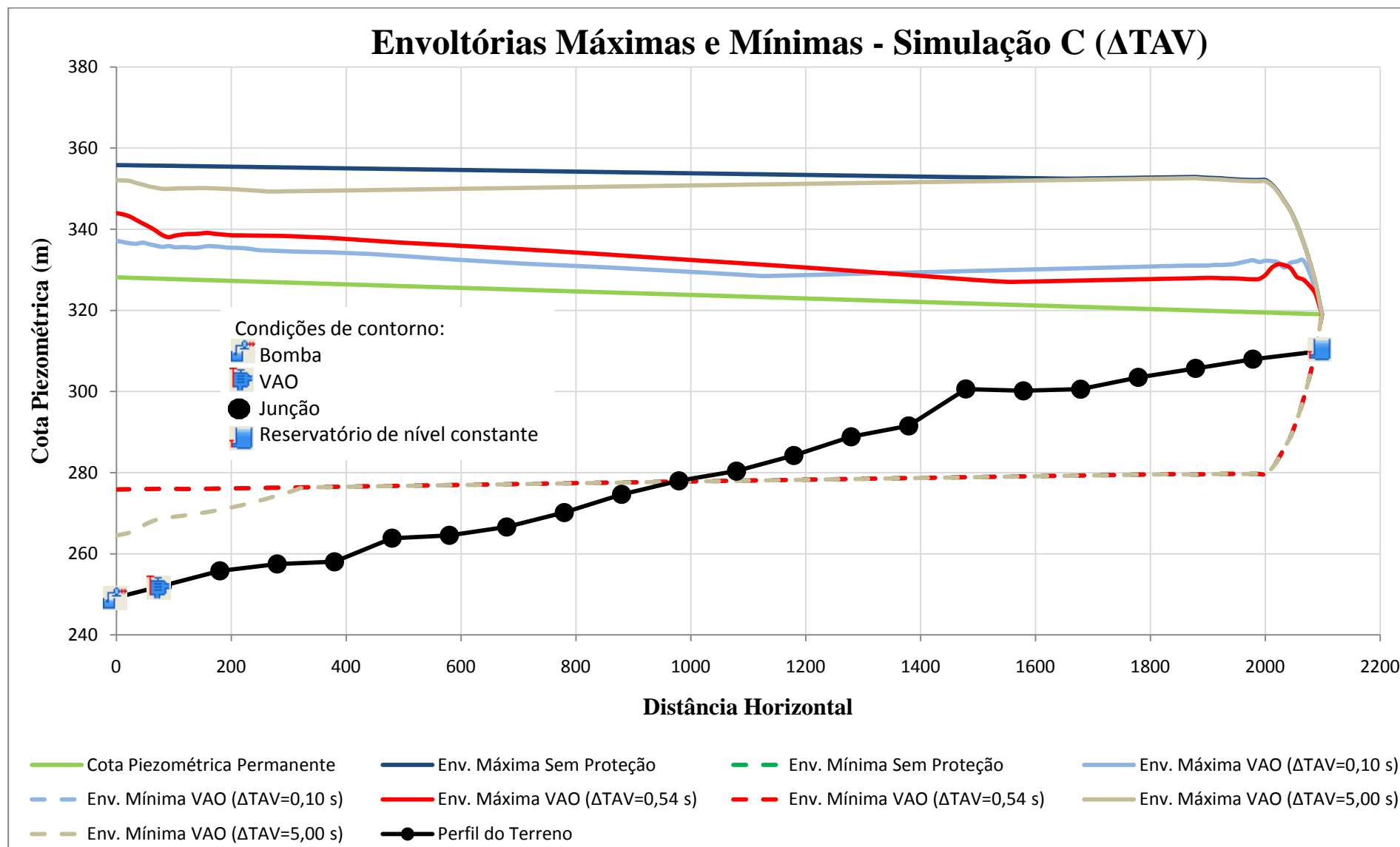


FIGURA 4.57 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”

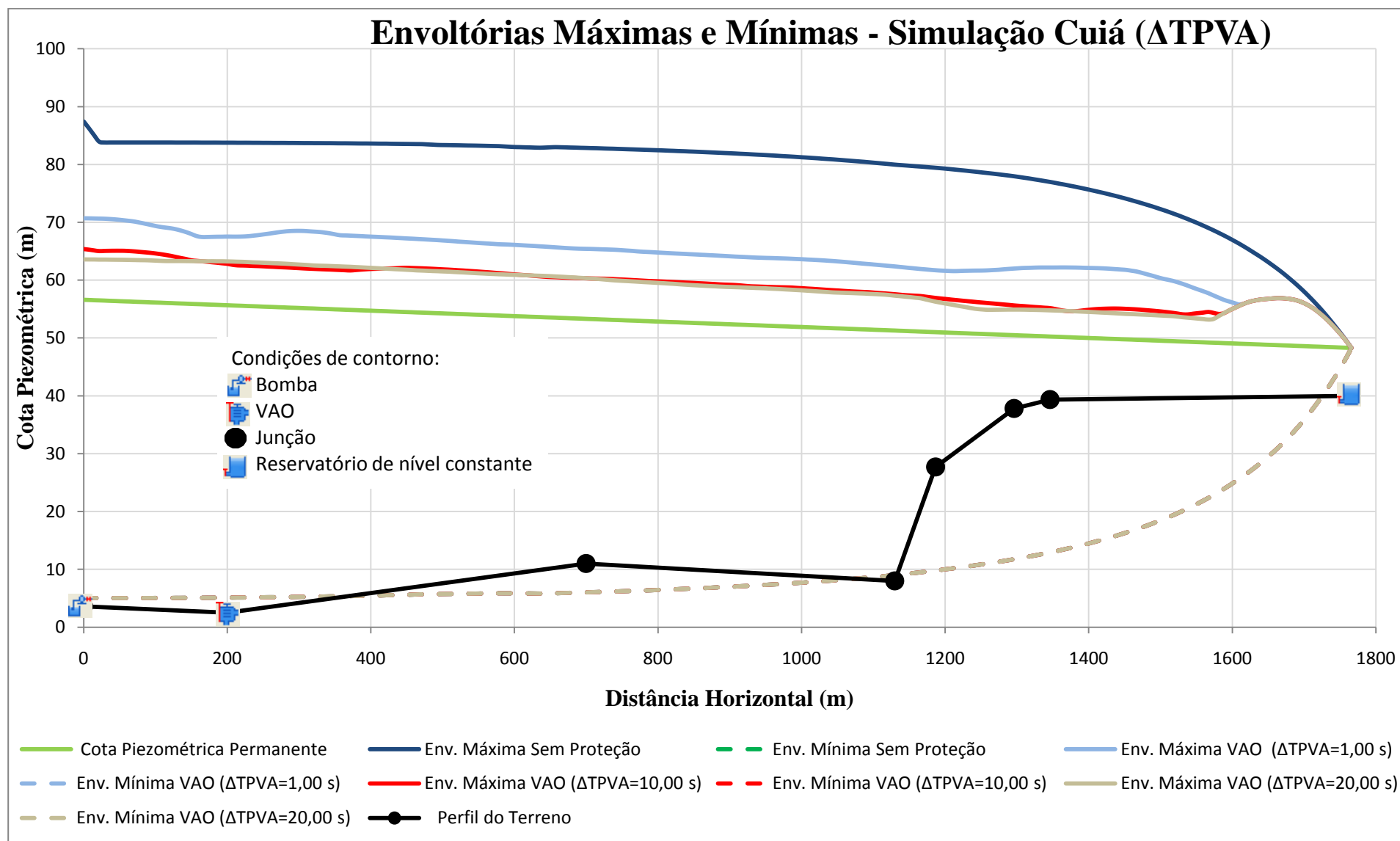


FIGURA 4.58 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”

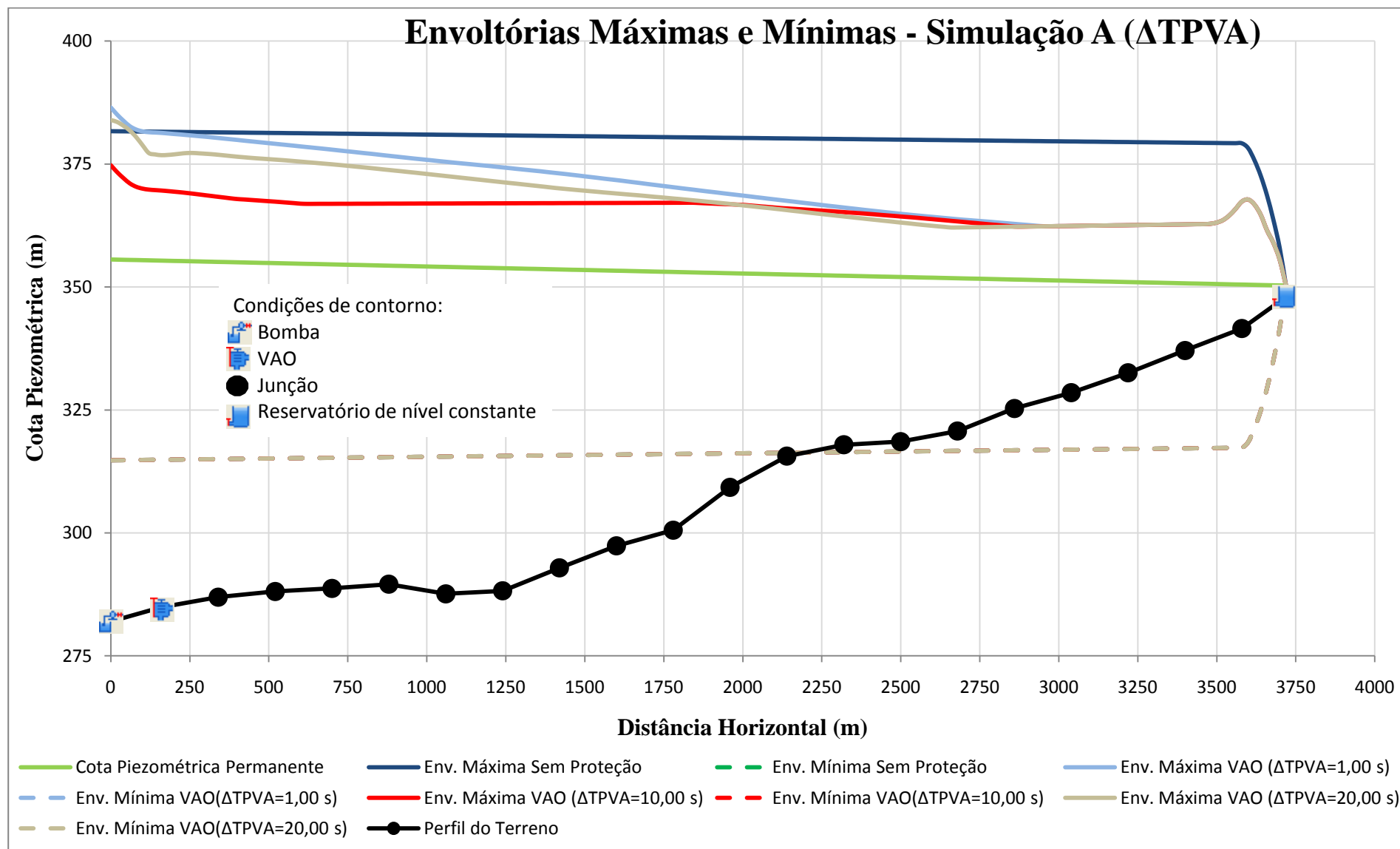


FIGURA 4.59 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”

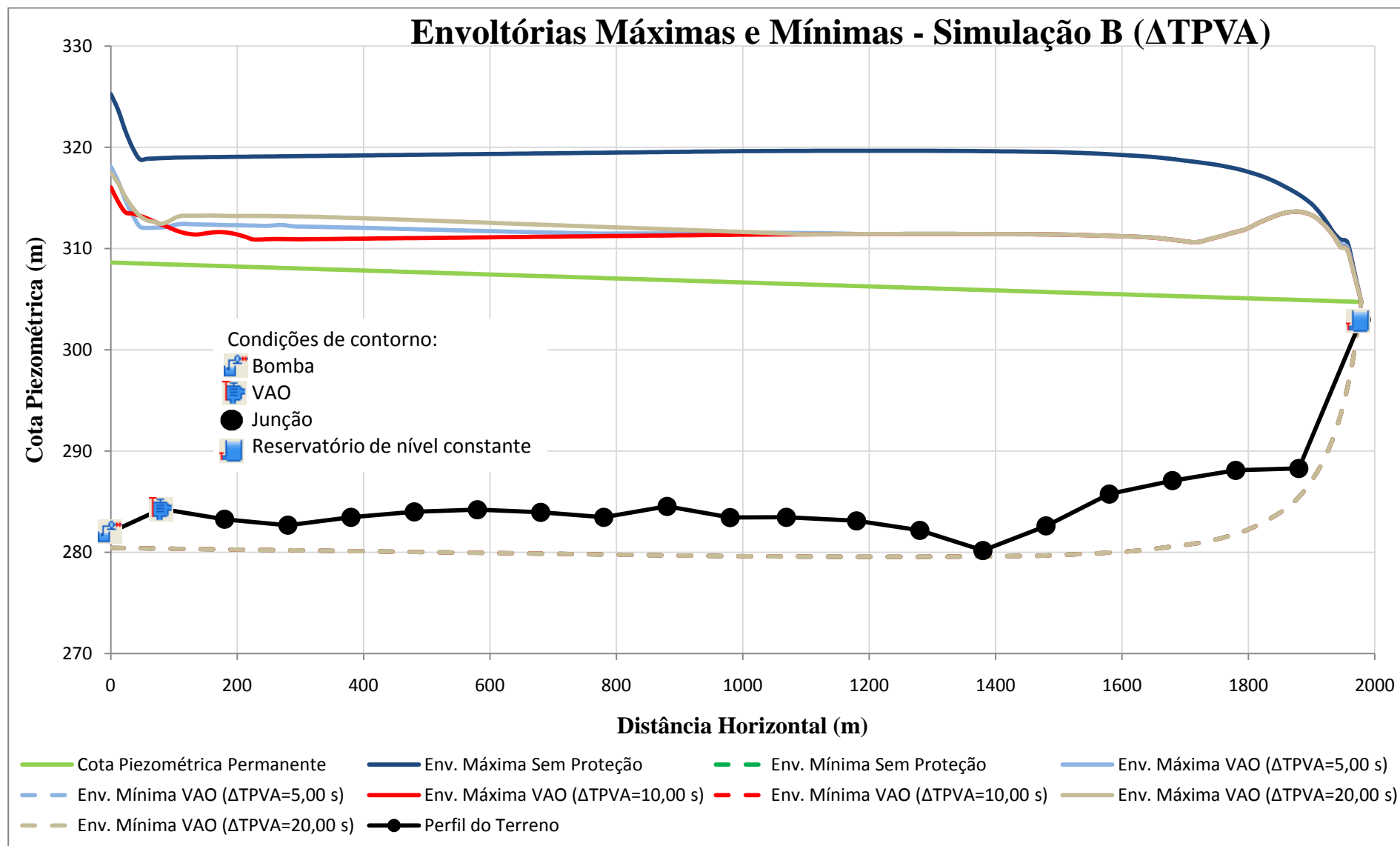


FIGURA 4.60 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”

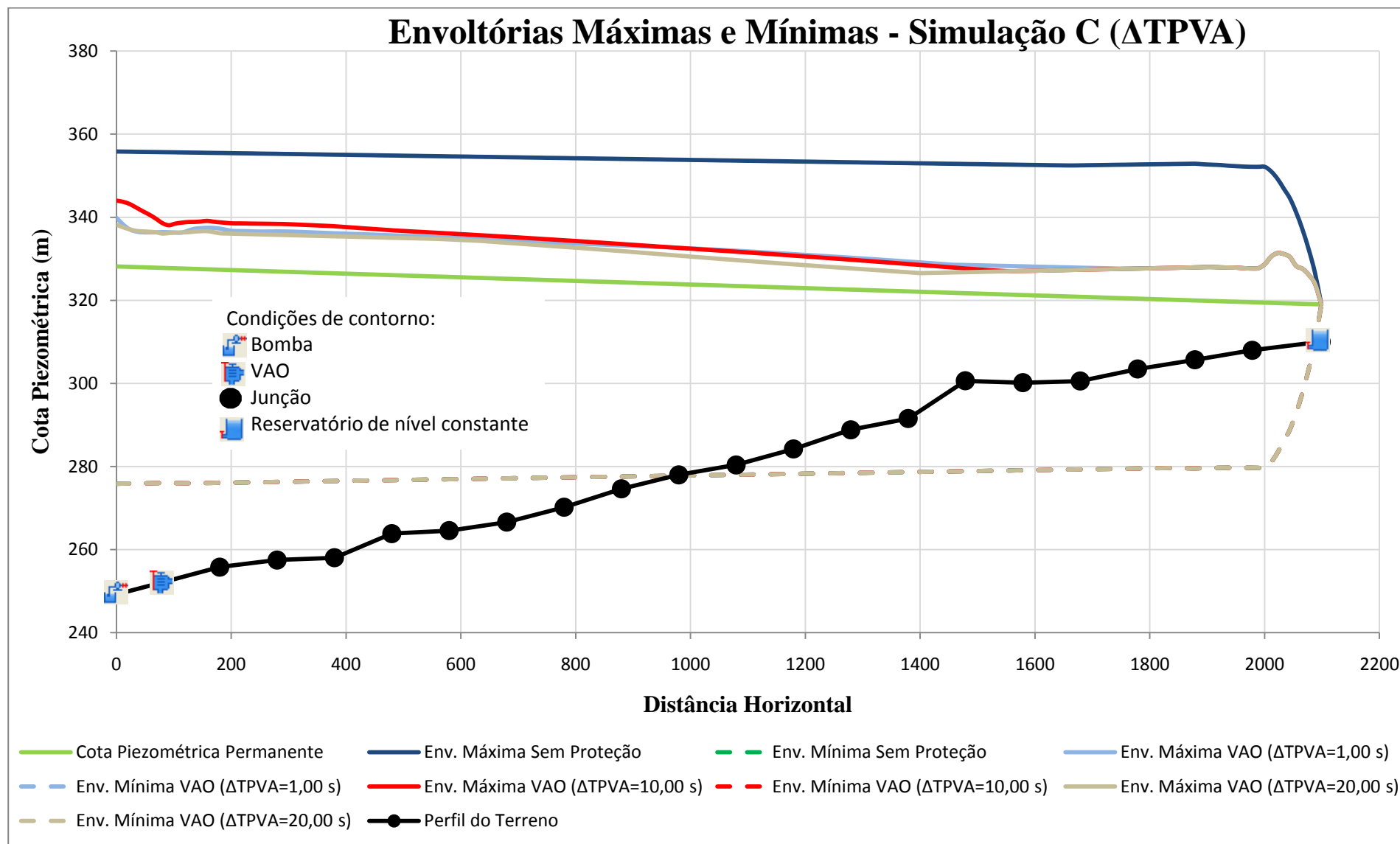


FIGURA 4.61 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”

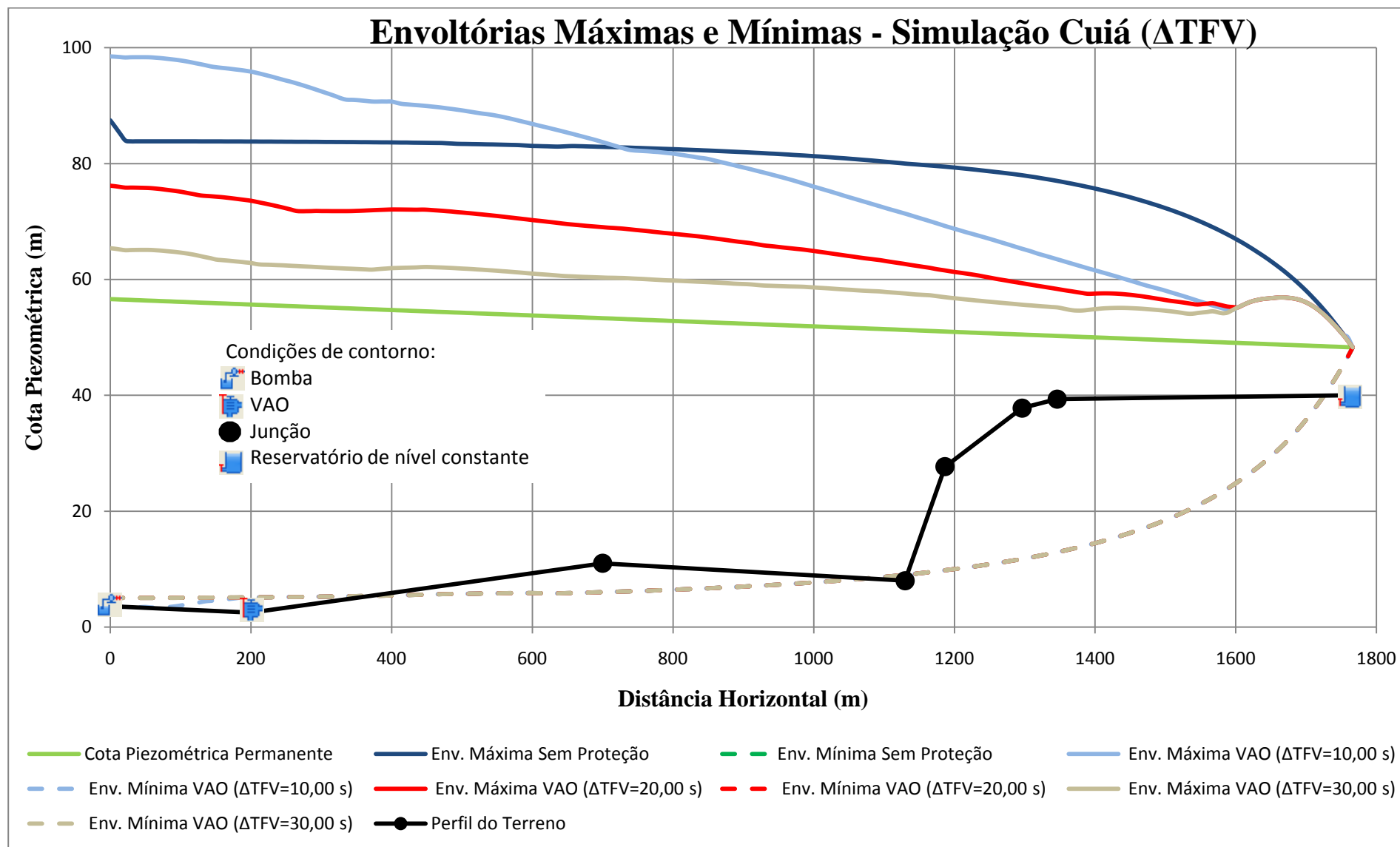


FIGURA 4.62 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”

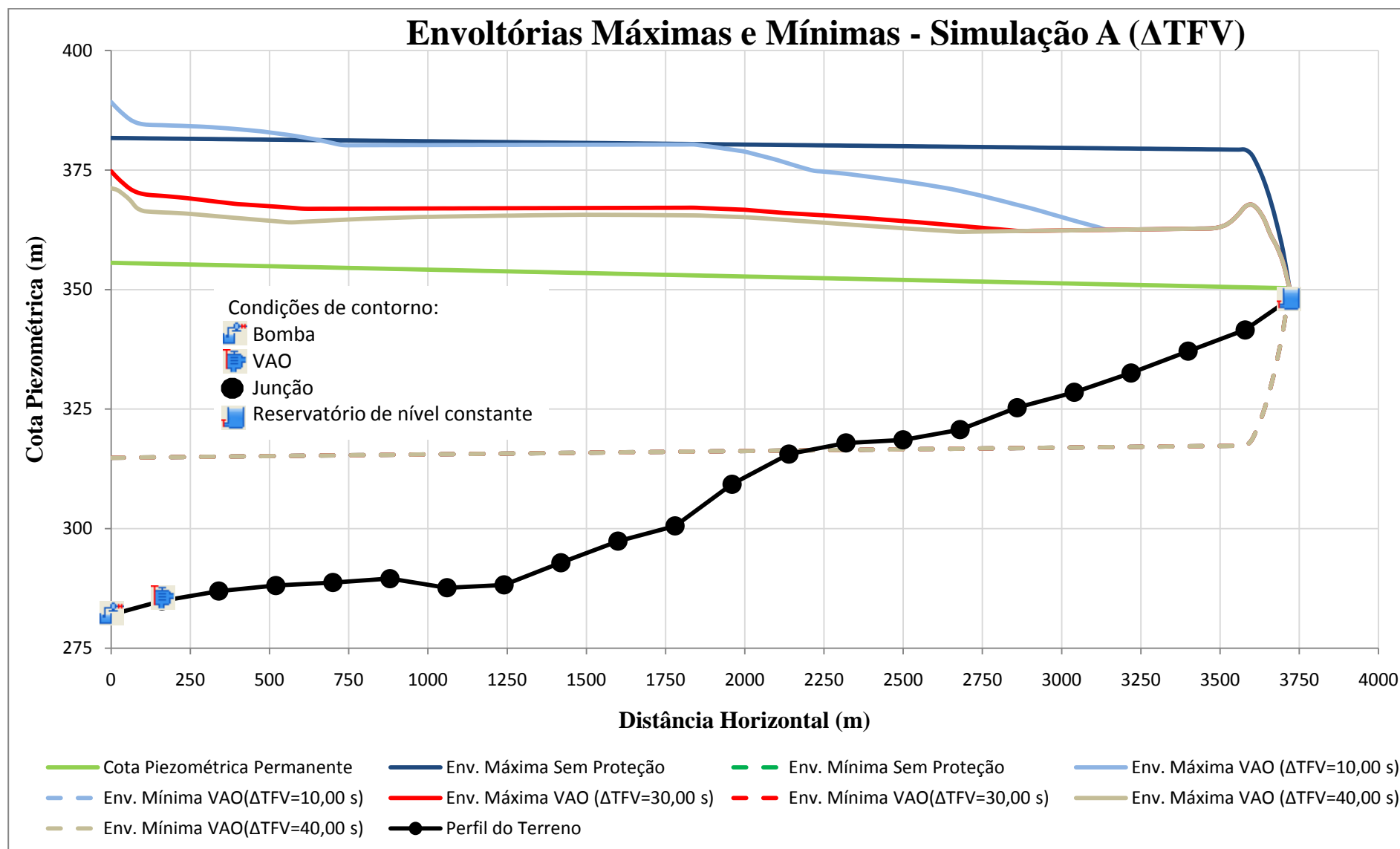


FIGURA 4.63 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”

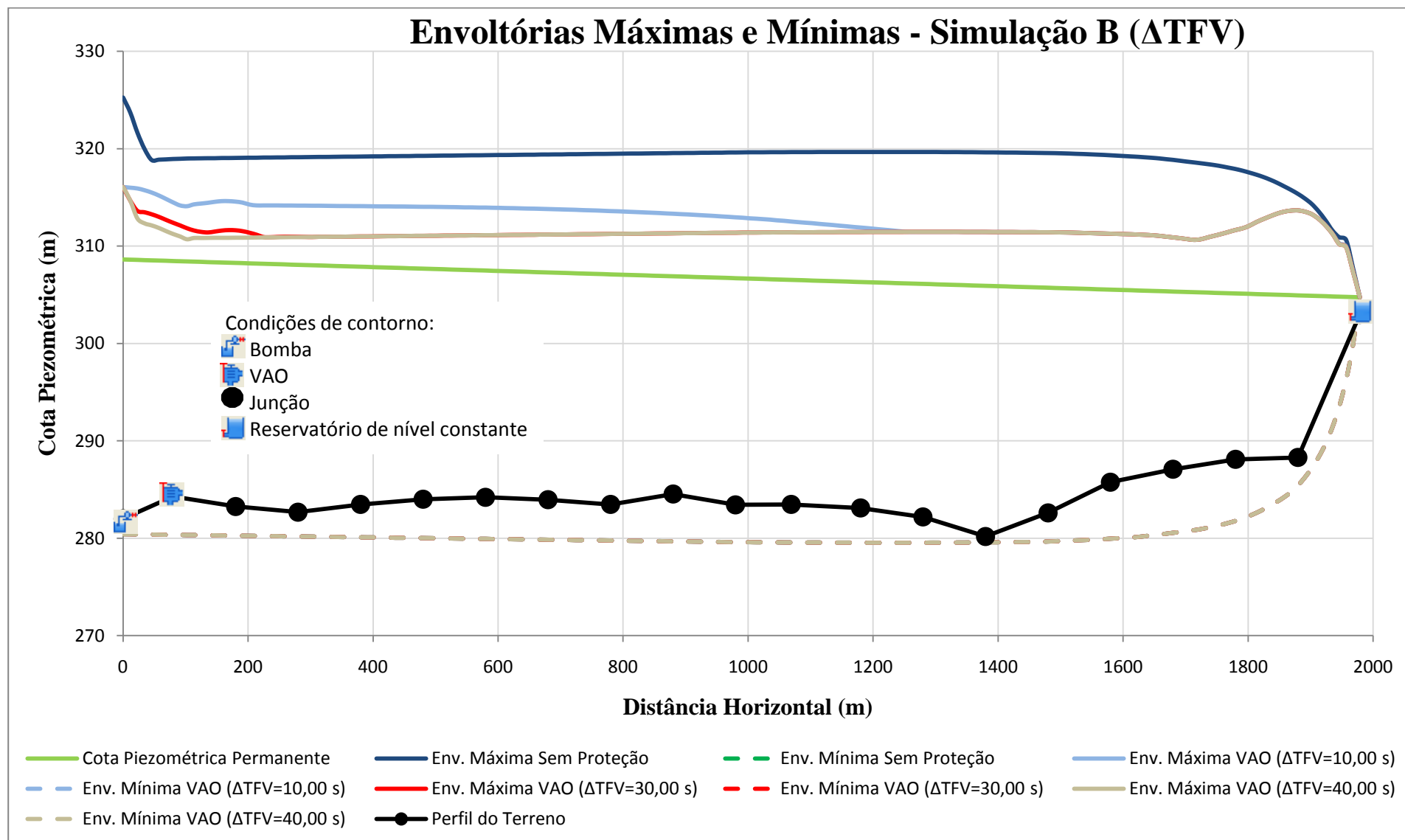


FIGURA 4.64 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”

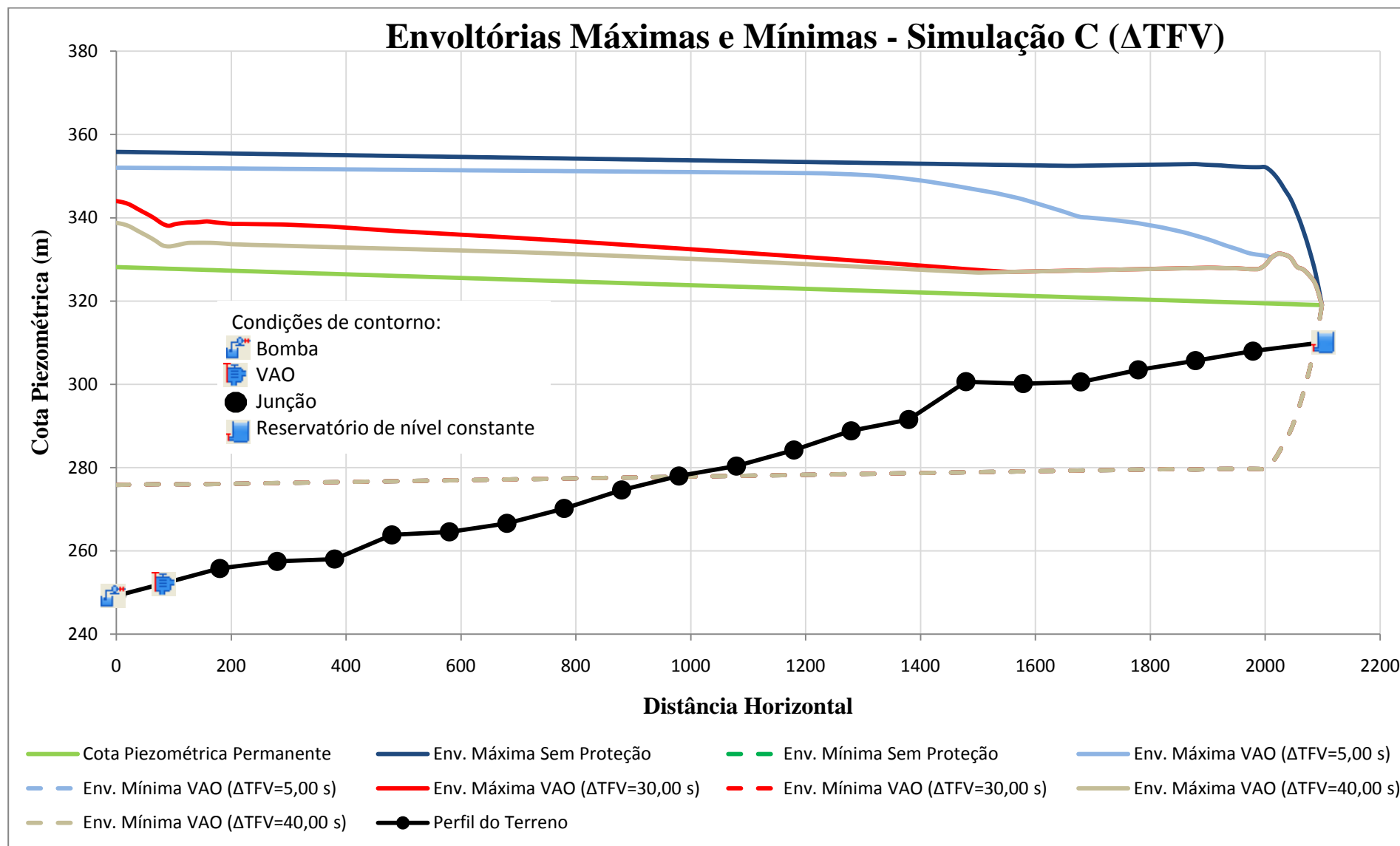


FIGURA 4.65 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “C”

4.8. COMPARAÇÕES ENTRE A VAO E A VÁLVULA DE ALÍVIO

As cinco simulações a seguir serão realizadas com os dados de entrada dos modelos da válvula antecipadora de onda e válvula de alívio conforme mostrado na tabela 23. Para comparar a válvula antecipadora de onda com a válvula de alívio, a pressão máxima de regulação na VAO será considerada igual à pressão de alívio para a válvula de alívio.

TABELA 23 - Dados das simulações

Simulação	DN (mm)	P _{máxR} (mca)	P _{minR} (mca)	TIAV (s)	ΔTAV (s)	$\Delta TPVA$ (s)	ΔTFV (s)
Cuiá	100	58,48	26,58	10,22	1,56	10,00	30,00
A	100	77,50	35,23	20,72	1,07	10,00	30,00
B	75	26,58	12,08	11,68	1,26	10,00	30,00
C	65	83,27	37,85	11,88	0,54	10,00	30,00
D	40	112,99	51,36	24,29	5,48	10,00	30,00

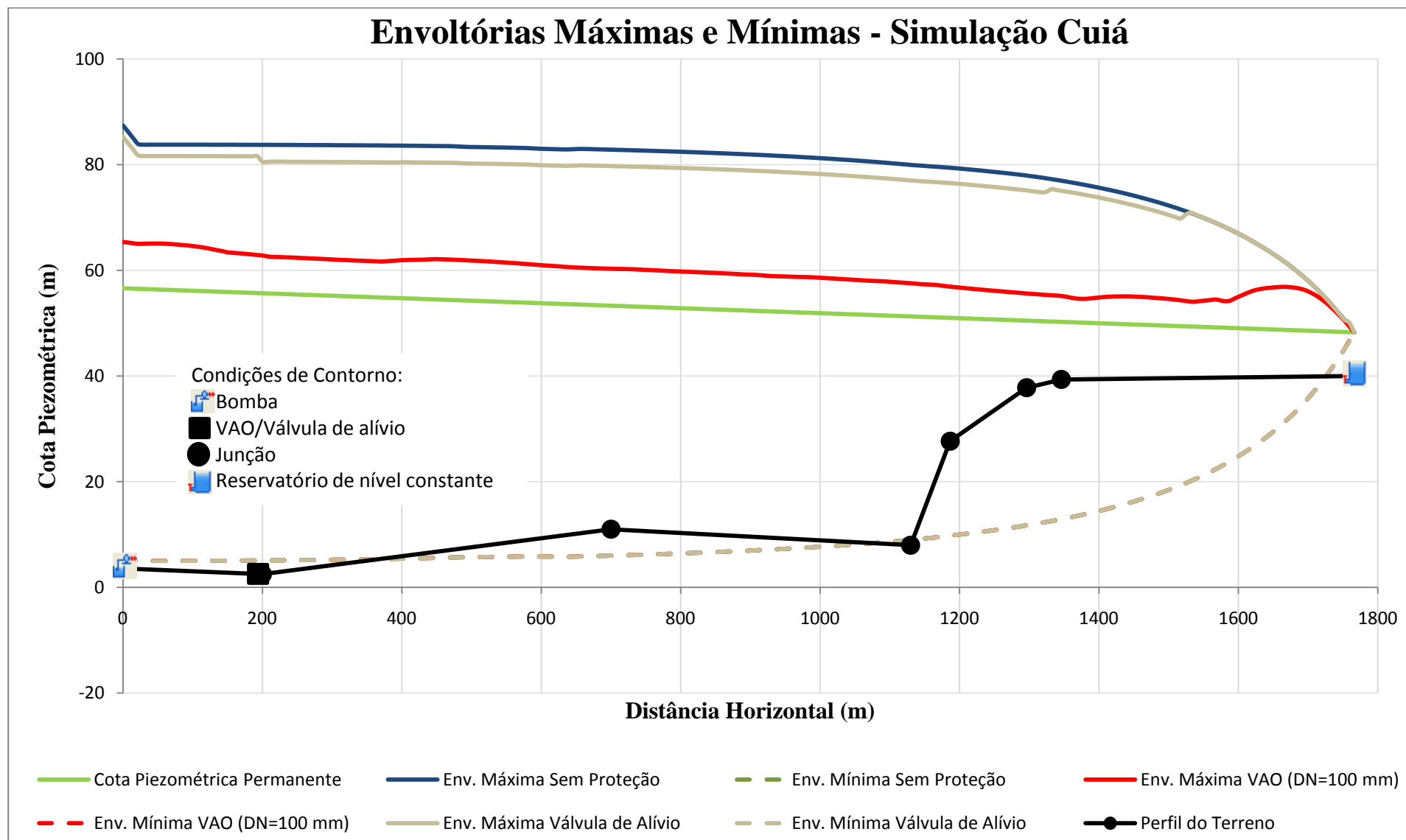


FIGURA 4.66 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “Cuiá”

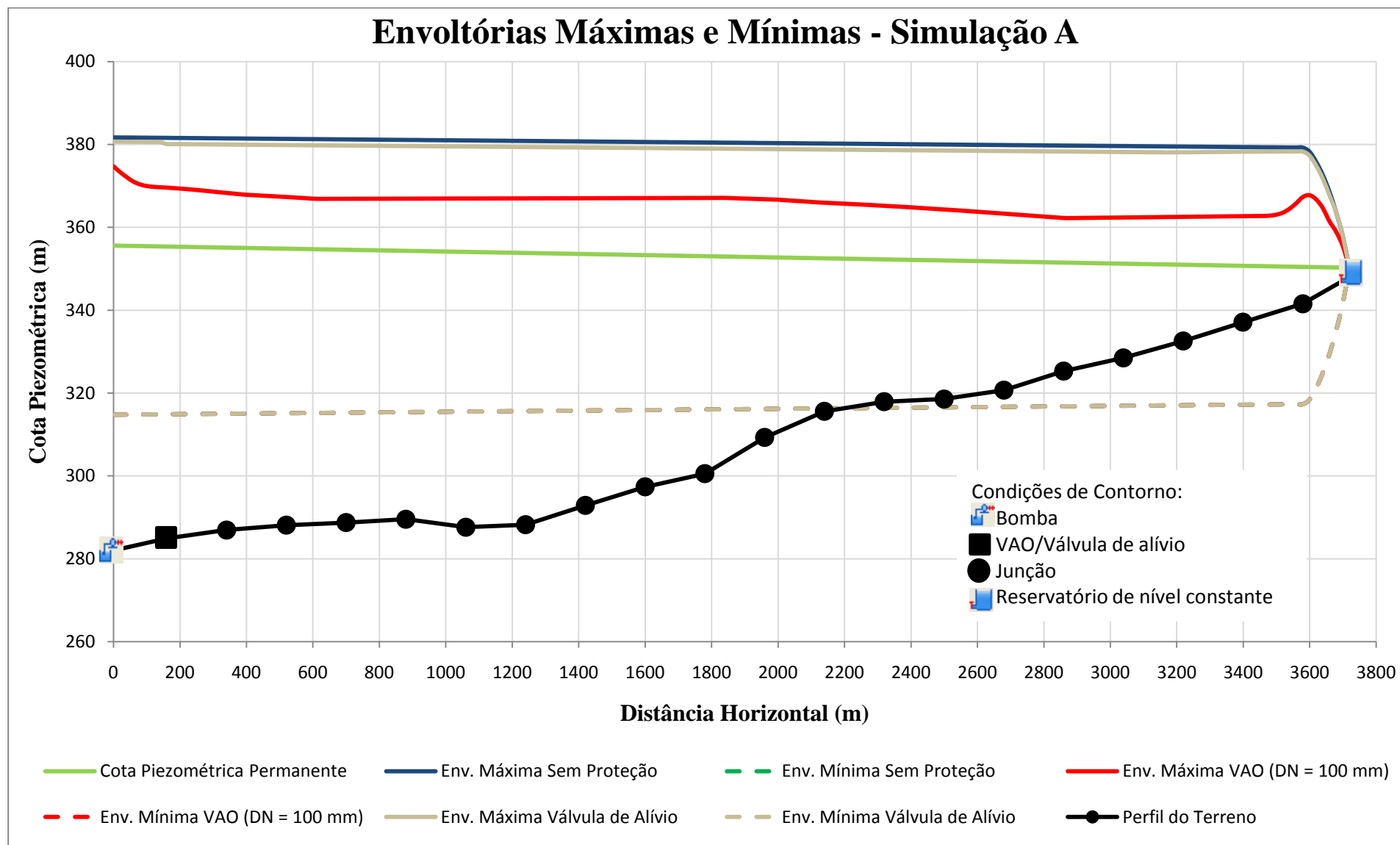


FIGURA 4.67 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “A”

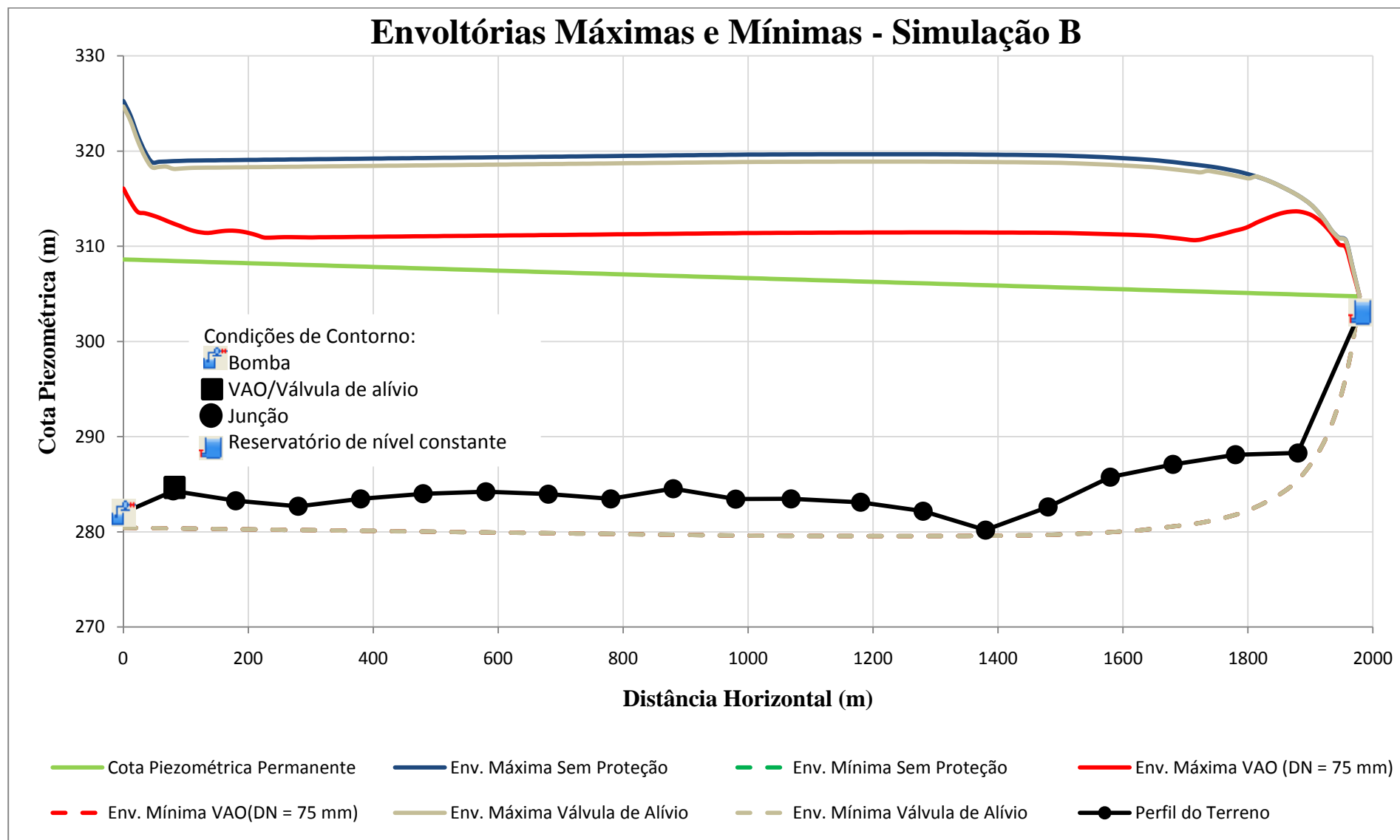


FIGURA 4.68 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “B”

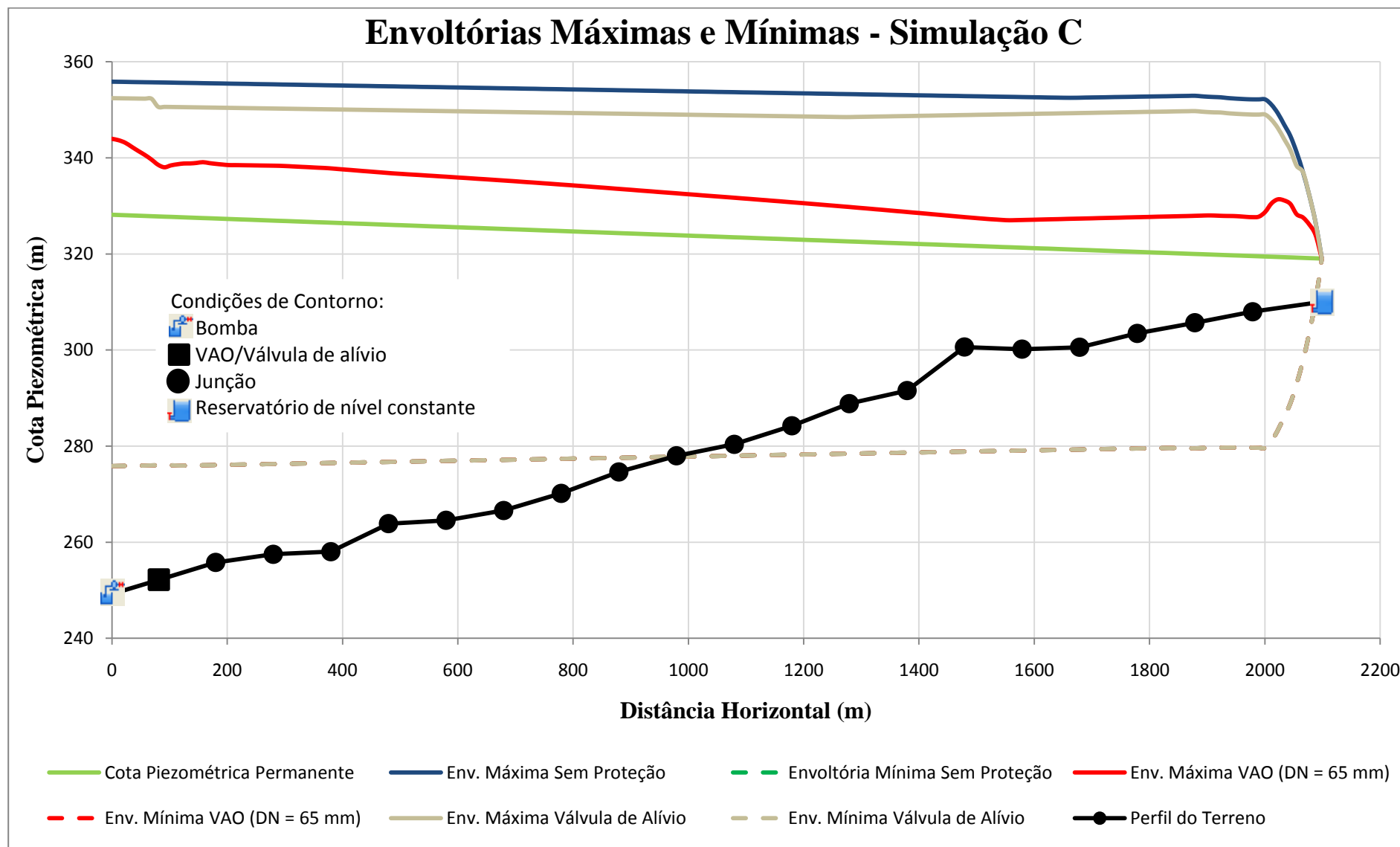


FIGURA 4.69 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação "C"

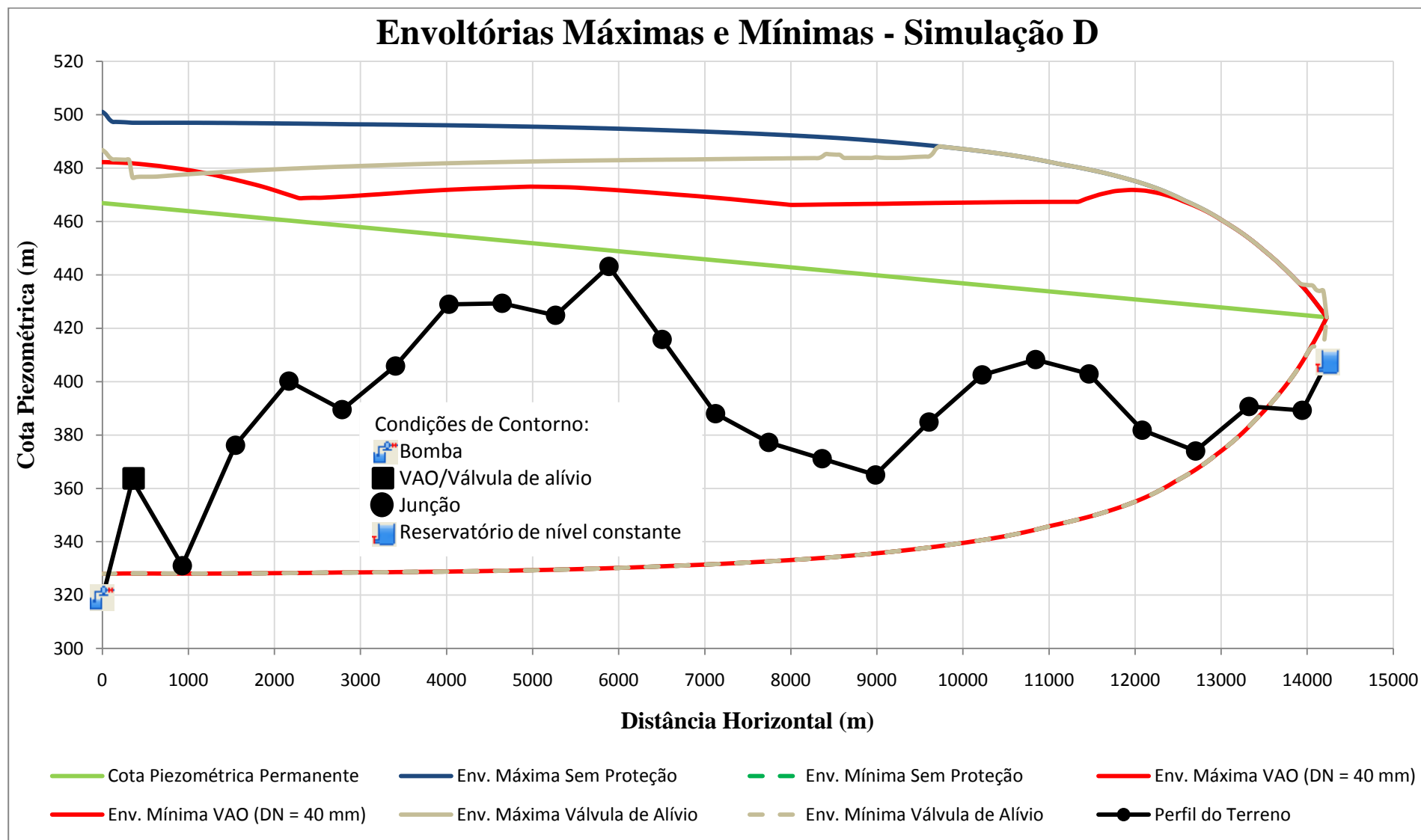


FIGURA 4.70 - Gráfico das envoltórias máximas e mínimas simulação “D”

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A válvula antecipadora de onda deve ser instalada próximo à bomba. Assim, no caso de dimensionamento correto, evita transiente provocado pela interrupção do bombeamento na bomba e em toda a tubulação.

Com tempo de simulação inferior ao tempo total da válvula, a apresentação dos resultados não será adequada. Ainda, para evitar formação de transiente, a soma dos intervalos dos tempos de abertura, de permanência da válvula aberta e de fechamento deve ser maior do que 30 segundos. Por isso, neste trabalho, convencionou-se um tempo de simulação de 100 segundos.

O diâmetro da válvula antecipadora de onda nas simulações apresentadas neste trabalho, deve ser escolhido de modo adequado, pois caso contrário, a válvula poderá estar subdimensionada, no caso da escolha de diâmetro muito inferior ao adequado, e superdimensionada no caso do diâmetro muito superior ao adequado.

Apesar das aproximações iniciais para o diâmetro da válvula apresentadas no anexo A, a análise do diâmetro ótimo por meio de simulações é necessária, pois em alguns casos, a aproximação inicial não é adequada.

A válvula antecipadora de onda deve iniciar a sua abertura logo após a passagem da onda de subpressão. Caso a válvula inicie a sua abertura antes da passagem da onda de subpressão, somam-se o efeito de alívio de pressão devido à abertura da válvula e o decaimento da pressão logo após a interrupção do bombeamento. Por isso, nesse caso, pode ocorrer a formação de onda de subpressão inferior à formada sem mecanismo de proteção, e em seguida a formação de onda de sobrepressão.

Neste trabalho, considere-se que o intervalo do tempo abertura deve ser igual à diferença entre o tempo onde a pressão é igual à pressão máxima de regulação após a passagem da onda de subpressão e o tempo do início da abertura da válvula, como um valor de entrada para o modelo proposto. Porém, o intervalo do tempo de abertura deve ser simulado para um valor acima e outro abaixo do valor inicial de entrada, pois foi verificado que um intervalo de tempo alto de abertura, em alguns casos, pode resultar na formação de transientes indesejáveis.

Ao analisar o intervalo do tempo de permanência da válvula completamente aberta, percebemos que esse parâmetro mostra-se pouco sensível às simulações realizadas, desde que o intervalo do tempo de fechamento da válvula esteja adequado.

Na análise do intervalo do tempo de fechamento da válvula observou-se que um fechamento repentino ocasiona a formação de onda de sobrepressão, isso ocorre devido à desaceleração repentina do escoamento, podendo ser evitada com um intervalo do tempo de fechamento próximo de 30 segundos.

Neste trabalho, pode-se observar que caso as envoltórias mínimas forem modificadas ao adicionar a válvula antecipadora de onda, deve-se verificar se os dados de entrada do modelo são adequados. A redução do efeito transitório é altamente dependente da escolha adequada dos parâmetros da válvula.

Devido à falta de um dimensionamento adequado da válvula antecipadora de onda, este trabalho tem a importância de reduzir os efeitos causados pelo dimensionamento inadequado das válvulas por meio da análise das variáveis que influenciam no comportamento da válvula.

No caso de um amortecimento efetivo da onda de sobrepressão, a proximidade da válvula antecipadora de onda em relação à bomba deve ser considerada um fator importante na instalação da válvula, de modo a proteger a bomba contra transientes indesejáveis. Por isso, recomenda-se a instalação da válvula antecipadora próximo ao conjunto motor-bomba.

Este trabalho considera as principais variáveis que influenciam no comportamento da válvula, e organiza de forma sistemática a influência de cada variável e as consequências que um dimensionamento inadequado pode acarretar no desempenho da válvula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, Marcos Paulo Rosa. **Golpe de Aríete: Modelagem computacional de chaminés de equilíbrio e tanques de alimentação unidirecional como dispositivos atenuantes do Golpe de Aríete em adutoras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil (Concentração em Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará, 2006.

BERMAD BRASIL IMP. E EXP.LTDA, **Válvulas de controle - saneamento básico**. Disponível em < www.bermad.com.br >. Acessado em 2009.

BERMAD BRASIL IMP. E EXP.LTDA, **Válvulas de Controle Hidráulicas de Diafragma**. Disponível em < www.bermad.com.br >. Acessado em 2009. BUREAU OF RECLAMATION BRASIL. **Especificações técnicas padronizadas, manual de irrigação**. Brasília DF, 2002.

CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th Ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CEDAE. **Companhia Estadual de Águas e Esgotos - Norma geral para projeto e construção de estações elevatórias de água**. 2006. Disponível em <www.cedae.com.br>. Acessado em 2009.

Chaudhry, M. H. **Applied hydraulic transients**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.

CLA-VAL. **Soluciones para el Manejo de Fluidos: Válvulas de Control**. Disponível em < www.cla-val.com >. Acessado em 2009.

CLA-VAL. **Válvula de alivio y anticipadora de golpe de ariete**. Disponível em < www.cla-val.com >. Acessado em 2009.

COSTA, da Teixeira. **Golpe de aríete: choque hidráulico (golpe de aríete)**. Área Departamental de Engenharia Civil Núcleo de Hidráulica e Ambiente - Escola Superior de tecnologia Universidade do Algarve (2001).

DICKENSON, T. Christopher. **Valves, Pipe and Pipeline Handbook**. 3rd Ed. Oxford: Elsevier Science, 1999.

DIPRIMA, Richard C.; BOYCE, William E. **Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems**. 7th Ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

EATHISA. **Válvula de control hidráulico pilotado**. Disponível em < www.eathisa.com/ >. Acessado em 2009

FLUCON. **Válvulas Hidráulicas de Control**. Disponível em <www.flucon.net>. Acessado em 2009.

HILDEBRAND, F.B. **Introduction to numerical analysis**. 2nd Ed. New York: Dover Publication, 1987.

INTERNATIONAL, Fisher Controls. **Control Valve Handbook**. 3rd Ed. São Paulo: Fisher Control International, 2001.

JÚNIOR, Fernando Peroba. **Golpe de Aríete: Modelagem Computacional de ventosas de duplo efeito como mecanismo de alívio do golpe de aríete**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil (Concentração em Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, 2007.

LIPTÁK, Béla G. **Instrument engineers' handbook: Process Control and Optimization**. 4th Ed. V.2. New York: Taylor & Francis, 1995.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 4. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

NETAFIM AUSTRALIA. **Surge Anticipation & Relief Valve with Dorot 66-300 Pilots**. Disponível em <www.netafim.com.au>. Acessado em 2009.

OCV CONTROL VALVES. **Surge Anticipation Valve Series 118/108SA**. Disponível em <www.controlvalves.com>. Acessado em 2009.

OCV CONTROL VALVES. **Installation, operation and maintenance instructions: Surge anticipation valve series 118/108SA**. Disponível em <www.controlvalves.com>. Acessado em 2009.

PAMAKIAN, John. **Water hammer Analysis**. New York: Dover, 1963.

PERRY, Greg M. **Aprenda em 21 dias Visual Basic 6**, Rio de Janeiro: Editora Campus, 1999. 5a edição.

PORTO, Rodrigo de Meio. **Hidráulica Básica**. São Paulo, EESC/USP, 18 Edição, 1998.

RODRIGUES, Marcus Vinícius Sousa. **Modelagem Computacional de ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos como mecanismo de alívio do golpe de aríete**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil (Concentração em Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, 2008.

SHARP, B.B.; SHARP, B.B. **Water Hammer: Practical Solutions**. 2003

SINGER VALVE. **Válvula de alívio antecipadora de Golpe de aríete.** Disponível em <<http://www.singervalue.com>>. Acessado em 2009.

SMITH, Peter; ZAPPE, R.W.; **Valve Selection Handbook: engineering fundamentals for selecting the right valve design for every industrial flow application.** 5th Ed. Oxford: Elsevier Science, 2004.

SOARES, Alexandre Kepler. **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório.** Tese – Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento – Universidade de São Paulo, 2007.

STREETER, Victor L.; WYLIE, E. Benjamim. **Mecânica dos Fluidos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TULLIS, j. Paul. **Hydraulic of Pipelines : Pumps, Valves, Cavitation, Transients.** Toronto: Wiley interscience, 1989.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. **Guia para elaboração de trabalhos acadêmicos (artigo, dissertação, projeto, trabalho de conclusão de curso e tese).** São Leopoldo, 2009.

URALITA. **Sistemas Industriales y Abastecimientos de Agua, válvulas de control.** Disponível em <www.uralita.com>. Acessado em 2009.

VALLOY LTDA. **Válvula antecipadora de onda.** Disponível em <www.valloy.com.br>. Acessado em 2009.

VALLOY LTDA. **Dimensionamento de válvulas auto-operadas tipo "y".** Disponível em <www.valloy.com.br>. Acessado em 2009.

VALLOY LTDA. **Válvula redutora de pressão.** Disponível em <www.valloy.com.br>. Acessado em 2009.

VASCONCELOS. Jose Goes. **Hidráulica transiente aplicada a saneamento.** Primeira versão. Brasília DF.

WYLIE, E. Benjamim; STREETER, Victor L. **Fluid Transients.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

ZILL, Dennis G.; CULLE, Michel R. **Equações Diferenciais.** 3ª Ed. V.1. São Paulo: Makron Books, 2001.

ZILL, Dennis G.; CULLE, Michel R. **Equações Diferenciais.** 3ª Ed. V.2. São Paulo: Makron Books, 2001.

ANEXO A – VÁLVULAS

As válvulas são utilizadas como reguladores de pressão e também para proteger a tubulação de transientes indesejáveis e ajuda a proteger contra fluxo reverso nas bombas e na remoção do excesso de ar nas tubulações.

Quando a válvula está fechando ou abrindo, ocorre uma mudança na vazão e em consequência ocorre uma mudança na pressão da tubulação.

Num intervalo de tempo, devido à mudança no fluxo, a pressão oscila aumentando e diminuindo até que o processo é desacelerado devido ao atrito interno. Esse fenômeno é conhecido como golpe de aríete.

1. CARACTERÍSTICA DE ABERTURA DE VÁLVULAS

A relação entre a fração de abertura da válvula (ou percentual de abertura) e fração da vazão que passa pela válvula (ou percentual em relação à vazão máxima) é uma característica do tipo de abertura da válvula. O gráfico da figura A.1 exemplifica alguns tipos de abertura de válvulas.

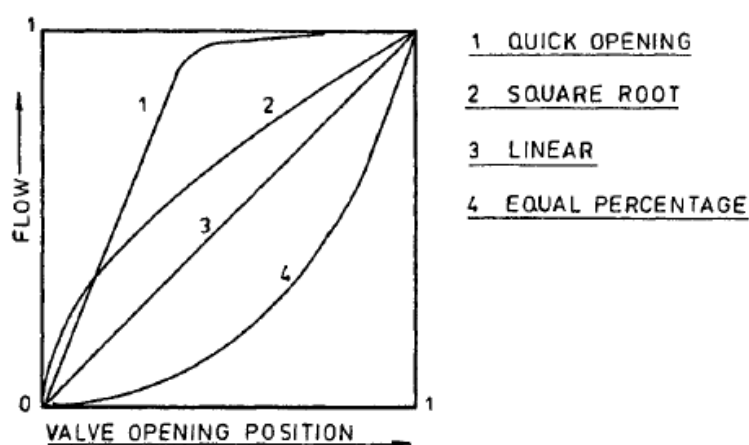


FIGURA A. 1 - Características de abertura da válvula

Fonte: Valve Selection Handbook: engineering fundamentals for selecting the right valve design for every industrial flow application. Página 37

2. VELOCIDADE NA VÁLVULA INSTALADA NA LINHA PRINCIPAL

Na válvula, quando ocorre uma mudança repentina na velocidade dV , a sua carga de pressão muda para $(a/g).dV$, onde “a” é velocidade da onda, “V” é a velocidade e “g” é a aceleração gravitacional.

Para uma válvula com abertura linear, considerando o referencial espacial na cota da válvula, a equação sugerida por B. B. Sharp é a seguinte:

$$V = B. h^{1/2} \quad (A. 1)$$

$$B = C_d (2g)^{1/2} \frac{A_v}{A_p} \quad (A. 2)$$

Onde:

C_d é o coeficiente de descarga;

A_v é área de abertura da válvula;

A_p é a área do conduto;

O parâmetro B é o modo de definir o comportamento da válvula com o tempo. Na figura A.2 o coeficiente de descarga, para alguns tipos de válvula, é relacionado com percentual de abertura da válvula.

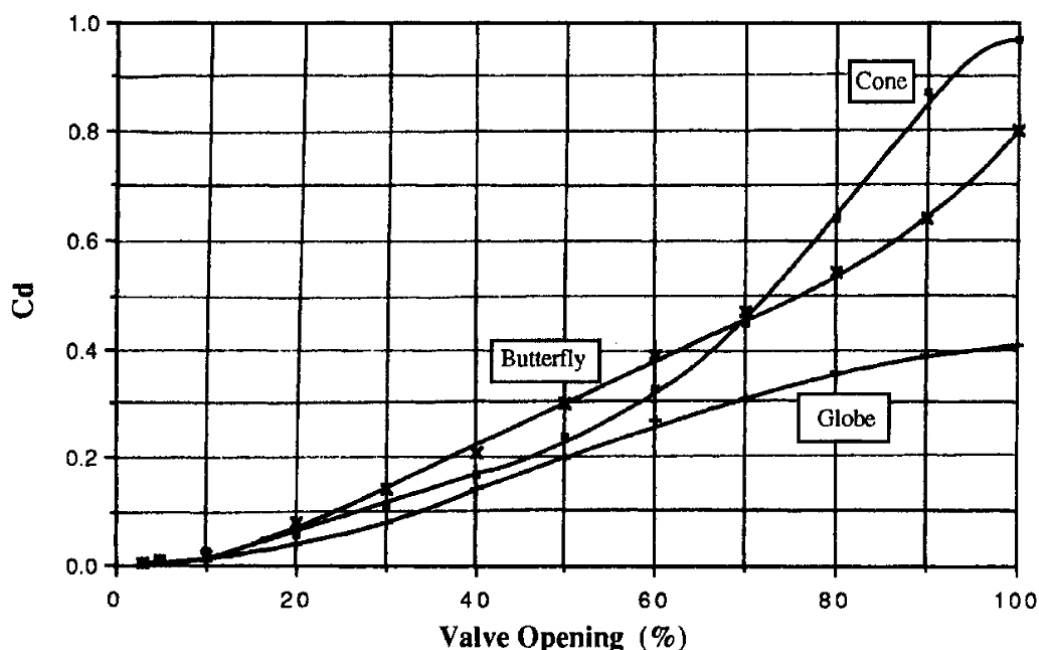


FIGURA A. 2 - Coeficientes de descarga em função do percentual de abertura
Fonte: Hidraulic of pipelines, página 91

3. COEFICIENTE KV

Nos manuais de fabricantes, o coeficiente Kv é utilizado para prever o diâmetro nominal de válvulas. Segundo Peter Smith (2004), a equação a seguir deve ser aplicada para uma única fase, considerando comportamento de líquidos newtonianos:

$$K_v = Q \left(\frac{\Delta P_0}{\Delta P} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (\text{B. 3})$$

$$K_v = Q \left(\frac{G}{\Delta P} \right)^{1/2} \quad (\text{B. 4})$$

Onde:

G = Densidade realtiva;

Q = Vazão em m³/h;

ΔP_0 = Diferencial de pressão referencial = 1bar;

ΔP = Diferencial de pressão da operação em bar;

ρ_0 = Massa específica do fluido de referência (água 1000 kg/m³);

ρ = Massa específica do fluido de operação.

4. GOLPE DE ARÍETE NA OPERAÇÃO DAS VÁLVULAS – ANÁLISE SIMPLIFICADA

Segundo Joukowsky, a variação de pressão devido ao fechamento instantâneo da válvula é representada pela seguinte equação:

$$\Delta P = \frac{aV\rho}{B} \quad (\text{B. 5})$$

De forma simplificada a celeridade pode ser expressa como segue:

$$a = \left[\frac{BK}{\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{B. 6})$$

Se uma pequena quantidade de gás estiver presente, devem ser consideradas no módulo de elasticidade do fluido as parcelas referentes às partes líquidas e gasosas, de acordo com as equações (B.7) e (B.8).

$$K = \frac{K_l}{1 + \left(\frac{V_g}{V_t}\right)\left(\frac{K_l}{K_g} - 1\right)} \quad (\text{B. 7})$$

$$\rho = \rho_g \frac{V_g}{V_t} + \rho_l \frac{V_l}{V_t} \quad (\text{B. 8})$$

Onde:

V = velocidade do fluido no instante do fechamento;

ΔP = Variação da pressão devido ao fechamento brusco;

a = velocidade de propagação da onda (celeridade);

K = módulo de elasticidade modificada do fluido;

K_g, K_l = módulo de elasticidade do gás e do líquido respectivamente;

V_g, V_l, V_t = Volume do gás, do líquido e total respectivamente;

ρ_g, ρ_l = massa específica do gás e do líquido respectivamente;

$B = 1$ para sistema SI.

5. CAVITAÇÃO EM VÁLVULAS

A cavitação para válvulas é descrita pelo índice de cavitação, que indica o nível de cavitação ou a tendência para a cavitação da válvula, sendo definido como segue:

$$C = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_d} \quad (\text{B. 9})$$

Onde:

C = índice de Cavitação;

P_v = Pressão de vapor relativa à pressão atmosférica;

P_d = Pressão na tubulação a 12 diâmetros à jusante da válvula

P_u = Pressão na tubulação a 3 diâmetros à montante da válvula

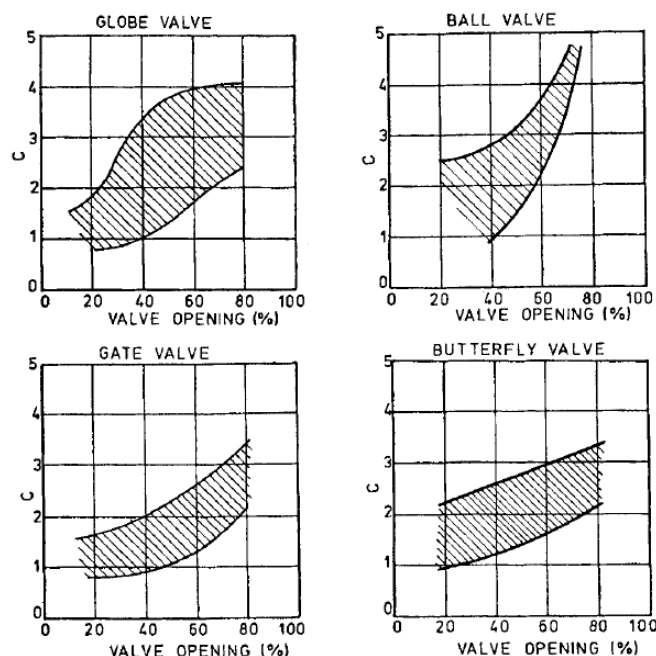


FIGURA A. 3 - Característica de cavitação para vários tipos de válvulas

Fonte: Valve Selection Handbook: engineering fundamentals for selecting the right valve design for every industrial flow application. Página 40.

6. ATENUAÇÃO DO RUÍDO EM VÁLVULAS

A maior parte do ruído é oriunda da turbulência gerada pela alta velocidade do jato. Uma das alternativas para a redução do ruído em válvulas é a instalação de silenciadores, tais como: o “perforated diffuser” no qual o gás flui por numerosos orifícios e o difusor que pode consistir por pratos perfurados.

O difusor atenua nas baixas e médias frequências dos ruídos das válvulas, mas também reduz altas frequências de ruídos de válvulas.

Segundo informações do fabricante NEI, o silenciador da figura A.4 foi projetado para abafar o ruído de válvulas pneumáticas e incorpora alarme visual para sinalizar a condição de contrapressão alta no sistema decorrente da contaminação do difusor. Disponível com conexões de 1/8" a 2" de diâmetro oferece valores de abafamento de 30 a 35 dbA e pode ser equipado com monitoramento eletrônico para controlar o funcionamento de máquinas e permitir a substituição do silenciador.



FIGURA A. 4 - Silenciador do fabricante NEI

Fonte: <http://www.nei.com.br/lancamentos/lancamento.aspx?i=6530>

7. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VÁLVULAS AUTO-OPERADAS

7.1. Abordagem conservadora para o dimensionamento da VAO

O objetivo para o dimensionamento de válvulas é o de determinar o diâmetro nominal adequado para cada situação. Para isso, é necessário o conhecimento da pressão máxima e mínima da tubulação e da vazão e dependendo do tipo de válvulas outros parâmetros.

A análise a seguir, é utilizada pelo fabricante Valloy na determinação do diâmetro da tubulação para válvulas auto-operadas do tipo Y, categoria na qual a válvula antecipadora de onda se enquadra. Para simplificar a análise, dividirei o dimensionamento das válvulas, em cinco passos.

- 1) Determinar a vazão da tubulação no estado permanente.
- 2) Determinar a pressão máxima e mínima da tubulação.
- 3) Calcular o valor de Kv e arredondar para o valor superior próximo.
- 4) Determinar o diâmetro nominal com base no valor de Kv.

- 5) Verificar se a velocidade máxima não excede o valor da velocidade recomendada pelo fabricante, e caso exceda, recalculer a velocidade para um diâmetro nominal acima e abaixo do valor determinado.

TABELA A. 1 - Faixa de vazão recomendada para vários tipos de operação

DN (Pol)	DN (mm)	Kv	Válvula On- Off	Serviço Contínuo		Serviço intermitente	Serviço Esporádico
			Mínimo (m ³ /h) V = 0,5 m/s	Mínimo (m ³ /h) V = 2,0 m/s	Máximo (m ³ /h) V = 5,0 m/s	Máximo (m ³ /h) V = 8,0 m/s	Máximo (m ³ /h) V = 15,0 m/s
1/2"	12	5,4	0,21	0,81	2,05	3,30	6,10
3/4"	20	7,2	0,51	2,05	5,10	8,15	15,30
1"	25	13,0	0,90	3,60	8,60	14,00	17,60
1.1/2"	40	33,0	2,10	8,20	20,50	32,80	61,20
2"	50	50,0	3,55	14,20	35,30	56,50	106,20
2.1/2"	65	68,0	6,00	23,70	59,80	95,80	179,30
3"	75	120,0	8,00	32,00	79,60	127,10	238,30
4"	100	205,0	14,20	56,70	141,50	226,10	424,10
5"	125	430,0	23,00*	91,95*	229,25*	367,40*	689,05*
6"	150	580,0	31,80	127,20	317,90	508,70	954,00
8"	200	950,0	56,50	226,00	565,00	904,00	1696,00
10"	250	1280,0	88,40	353,40	883,00	1413,00	2650,00
12"	300	1950,0	127,20	508,70	1272,00	2035,00	3816,00
14"	350	2400,0	173,50	693,40	1730,00	2770,00	5193,00
16"	400	3415,0	226,00	904,00	2260,00	3618,00	6782,00
18"	450	3650,0	286,00	1144,00	2860,0	4576,00	8580,00
20"	500	4100,0	353,50	1414,00	3532,00	5652,00	10600,00

Fonte: Dimensionamento de válvulas auto-operada, Valloy fabricante.

*valores interpolados

Exemplo do dimensionamento da VAO para a simulação “Cuiá”

- 1) Determinar a vazão da tubulação no estado permanente.

$$\text{Vazão permanente} = 0,101 \text{ m}^3/\text{s} = 363,60 \text{ m}^3/\text{h}$$

- 2) Determinar a pressão máxima e mínima da tubulação.

Pressão máxima=83,83 mca = 8.22 bar

Pressão mínima = -26,42 mca = -2.59 bar

- 3) Calcular o valor de Kv e arredondar para o valor superior próximo.

$$K_v = Q \left(\frac{G}{\Delta P} \right)^{1/2} = 363.60 \left(\frac{1}{8.22 + 2.59} \right)^{1/2} = 110.6$$

Na tabela A.1, Kv = 120

- 4) Determinar o diâmetro nominal com base no valor de Kv.

Para Kv = 120; Dn = 75 mm

- 5) Verificar se a velocidade máxima não excede o valor da velocidade recomendada pelo fabricante, e caso exceda, recalculer a velocidade para um diâmetro nominal acima e abaixo do valor determinado.

$$V_{\text{máx}} = \frac{Q}{A} = \frac{0.101}{\frac{\pi \cdot (0.075)^2}{4}} = 22.86 \text{ m/s}$$

O fabricante Valloy recomenda velocidade máxima de operação inferior a 15 m/s, logo o diâmetro superior é igual a 100 mm.

$$V_{\text{máx}} = \frac{Q}{A} = \frac{0.101}{\frac{\pi \cdot (0.100)^2}{4}} = 12.86 \text{ m/s}$$

Logo o diâmetro nominal escolhido para o cálculo do transiente é DN = 100 mm

7.2. Abordagem alternativa para o dimensionamento da VAO

O objetivo para o dimensionamento de válvulas é o de determinar o diâmetro nominal adequado para cada situação, e para isso é necessário o conhecimento da pressão máxima e mínima da tubulação e da vazão, e dependendo do tipo de válvulas outros parâmetros.

Na determinação do diâmetro da tubulação, para válvulas auto-operadas do tipo Y, categoria na qual a válvula antecipadora de onda se enquadra. A análise a seguir, é utilizada

como uma alternativa ao exposto pelo fabricante VALLOY. Para simplificar a análise, dividirei em cinco passos o dimensionamento das válvulas.

- 1) Determinar a vazão máxima para fluxo permanente.
- 2) Determinar a pressão máxima e mínima da tubulação.
- 3) Calcular o valor de Kv e arredondar para o valor superior próximo.
- 4) Determinar o diâmetro nominal com base no valor de Kv.
- 5) Verificar se a velocidade máxima não excede o valor da velocidade recomendada pelo fabricante, e caso exceda, recalculer a velocidade para um diâmetro nominal acima e abaixo do valor determinado.

Verificar o valor da vazão máxima no estado transiente, sem mecanismo de proteção, no local que será instalada a VAO. Depois calcular o valor da velocidade da seguinte forma:

$$V_{\text{máx}} = \frac{Q_{\text{Máx nó}}}{A} \quad (\text{B. 10})$$

Onde:

A = área da válvula antecipadora de onda completamente aberta

$Q_{\text{máx nó}}$ = Vazão máxima determinada no segundo nó para o cálculo sem proteção, logo após a contagem do tempo inicial de abertura da válvula.

Exemplo do dimensionamento da válvula antecipadora de onda para a simulação “Cuiá”

- 1) Determinar a vazão da tubulação no estado permanente.
Vazão permanente = $0,101 \text{ m}^3/\text{s} = 363.60 \text{ m}^3/\text{h}$
- 2) Determinar a pressão máxima e mínima da tubulação.
Pressão máxima = $83,83 \text{ mca} = 8.22 \text{ bar}$
Pressão mínima = $-26,42 \text{ mca} = -2.59 \text{ bar}$
- 3) Calcular o valor de Kv e arredondar para o valor superior próximo.

$$K_V = Q \left(\frac{G}{\Delta P} \right)^{1/2} = 363.60 \left(\frac{1}{8.22 + 2.59} \right)^{1/2} = 110.6$$

Na tabela A.1; $K_V = 120$

- 4) Determinar o diâmetro nominal com base no valor de Kv.

Para Kv = 120; DN = 75 mm

- 5) Verificar se a velocidade máxima não excede o valor da velocidade recomendada pelo fabricante, caso exceda, recalcular a velocidade para um diâmetro nominal acima e abaixo do valor determinado.

$$V_{\text{máx}} = \frac{Q_{\text{Máx nó}}}{A} = \frac{0.0391}{\frac{\pi \cdot (0.075)^2}{4}} = 8,85 \text{ m/s}$$

O fabricante VALLOY recomenda velocidade máxima de operação inferior a 15 m/s. Desse modo, o diâmetro nominal escolhido para o cálculo do transiente é DN = 75 mm.

8. VÁLVULA DO TIPO GLOBO

As válvulas do tipo Globo, em geral, são empregadas em operações que requerem operações frequentes de abertura e fechamento e o controle de vazão. As principais características da válvula Globo são:

- ✓ Disponibilidade de uma vasta gama de características;
- ✓ Permite o controle parcial do fluxo;
- ✓ Fácil acesso aos componentes internos;
- ✓ Perda de carga elevada;
- ✓ Não admite fluxos nos dois sentidos;
- ✓ Aplicável em ampla faixa de pressão e temperatura.




FIGURA A. 5 - Válvula do tipo globo

Fonte: Congeval fabricante

9. VÁLVULA ANTECIPADORA DE ONDA

9.1. Modelos dos fabricantes de válvulas antecipadora de onda



Modelo 735 - Bermad

Características:

- ✓ **Corpo largo angular ou em “Y”:** Concebido de forma hidrodinâmica, para uma alta capacidade de vazão e uma baixa perda de carga.
- ✓ **Atuador de dupla câmara:** proporciona uma resposta imediata e segura com um controle preciso, bem como uma atuação suave da válvula sem causar golpe de aríete.
- ✓ **Limitador manual de vazão com auto-alinhamento:** Sela o elastômero contra o metal assegurando uma hermeticidade completa.
- ✓ **Assento completamente desmontável:** Sem guias na haste criam obstáculos à vazão.
- ✓ **Tampão V-Port opcional:** permite um controle suave e preciso em condições extremas de vazão variável e/ou altas pressões diferenciais.
- ✓ **Controle de qualidade industrial:** Segundo as normas internacionais ISO 9001 em controle de qualidade de materiais e comportamento da válvula.

FIGURA A. 6 - Modelo de VAO da Bermad

Fonte: Válvulas de Control Sistemas Industriales y Abastecimiento de Agua; BERMAD

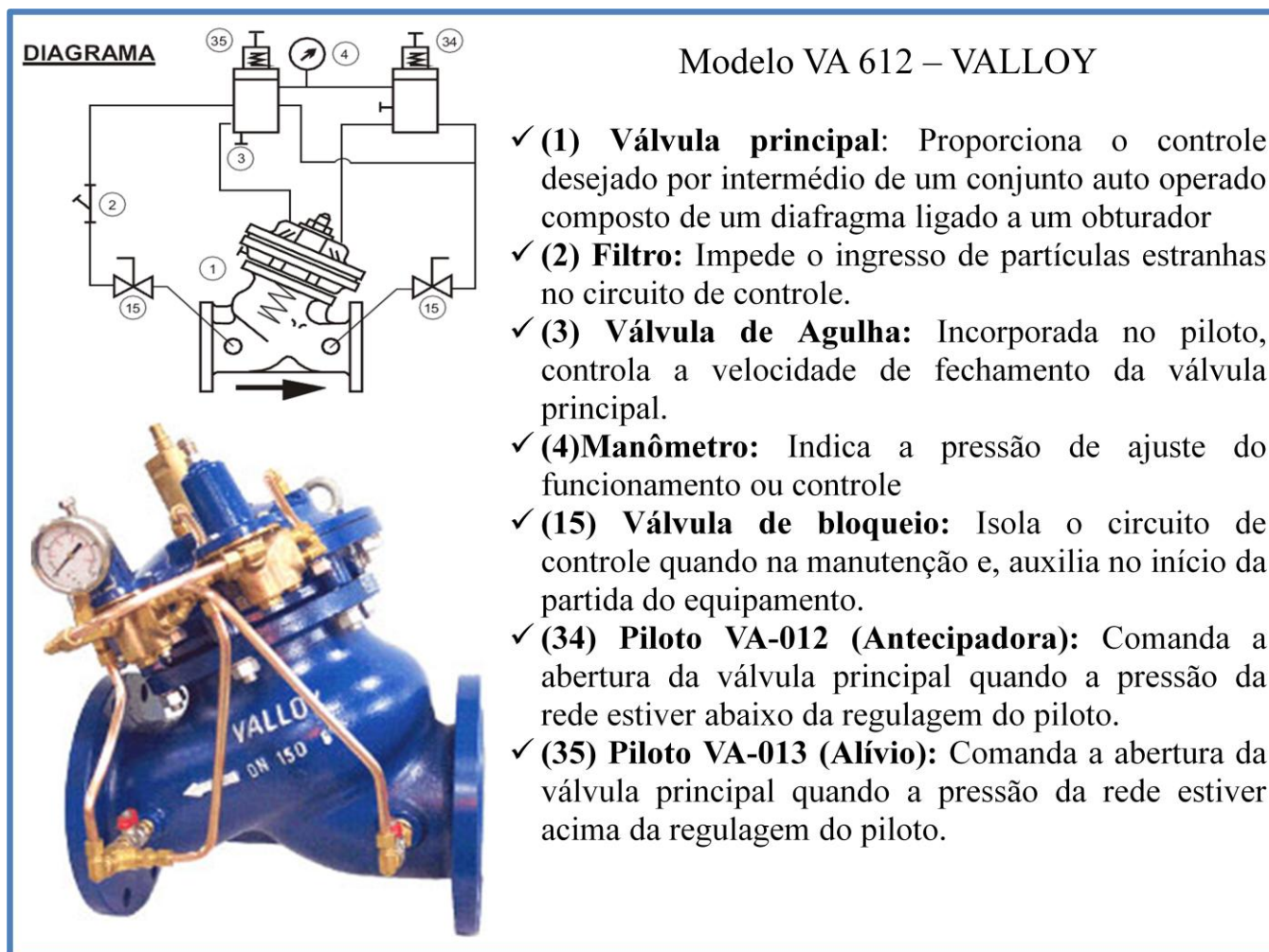


FIGURA A. 7 - Modelo de VAO da VALLOY

Fonte (Diagrama): Válvula Antecipadora de Onda; VALLOY

Fonte (Figura): <http://www.valloy.com.br/Y-VA612.asp>

9.2. Instalação da válvula antecipadora de onda

A Válvula antecipadora de onda deve ser instalada na derivação da linha principal próximo à bomba. Desse modo, a VAO protege a bomba e a tubulação contra transiente provocados pela parada repentina da bomba. As figuras A.8 e A.9 ilustram o local de instalação da VAO que estão identificadas por um círculo.

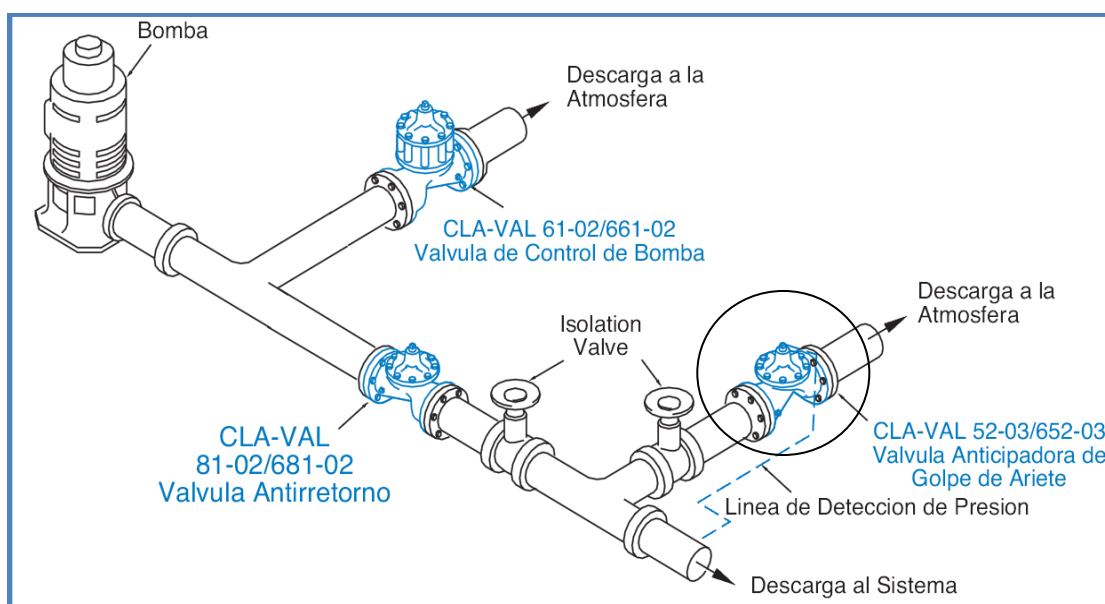


FIGURA A. 8 - Representação esquemática da localização da VAO

Fonte: Válvula de Alivio y Anticipadora de Golpe de Ariete; CLA-VAO

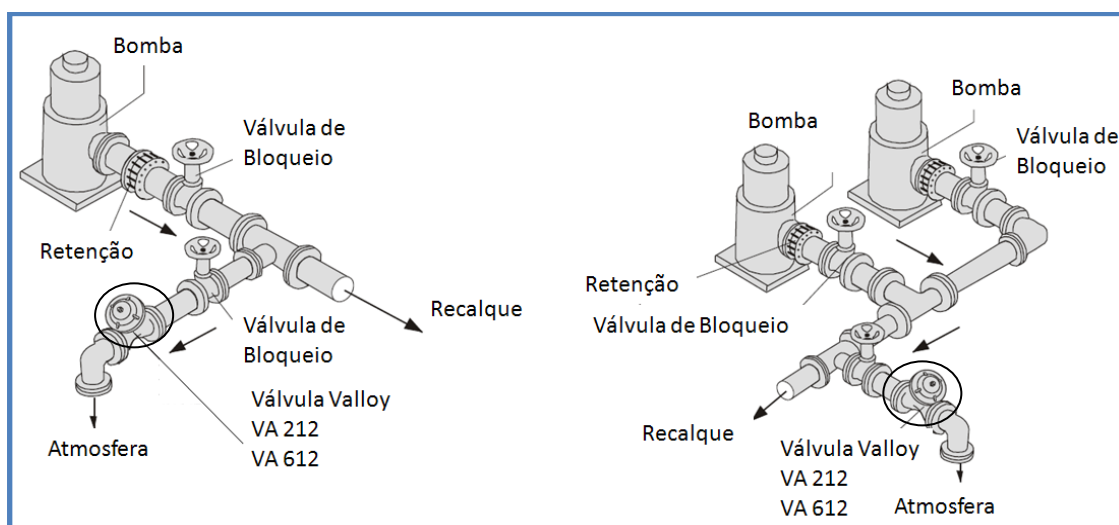


FIGURA A. 9 - Representação esquemática da localização da VAO

Fonte: Válvula antecipadora de onda; Valloy

9.3. Instruções para início da operação

Os dados a seguir foram retirados do fabricante VALLOY, no manual Válvula Redutora de Pressão.

1) Ajuste da função Alívio

Para o ajuste da função alívio, os passos a seguir são realizados. Desde que o sistema esteja nas condições normais de operação:

Fechar a válvula de bloqueio de jusante (15). Fazer com que a válvula principal esteja em contato com a pressão da rede. Em seguida abrir a válvula de bloqueio em $\frac{1}{4}$ de volta, aguardando alguns minutos a pressurização das câmaras de controle.

Abrir a válvula de bloqueio de jusante (15). Caso a válvula não abra, gire o parafuso de regulagem do piloto (35) no sentido horário pausadamente.

Quando a válvula principal estiver totalmente fechada, gire o parafuso de regulagem do piloto (35) lentamente no sentido anti-horário até que a válvula principal inicie a sua abertura.

2) Ajuste da função antecipadora

Proceder ao desligamento da bomba, após o ajuste da função alívio. Verificar se a condição de abertura na baixa pressão está adequada. Quando a onda de sobrepressão atingir o valor da pressão máxima de regulagem “Piloto de Alívio” a válvula principal deverá se manter aberta. Caso a regulagem das funções alívio e antecipadora não estiverem corretos, proceder da seguinte forma:

Se a válvula principal não fechar, atuar no fecho mecânico no sentido horário, limitando a abertura da válvula principal e adequando a regulagem a vazão do sistema.

3) Ajuste do tempo de fechamento

Se houver necessidade de diminuir o tempo de fechamento da válvula (no caso da válvula com tempo de fechamento ajustado de fábrica), deve-se atuar no parafuso de regulagem (3) da figura A.10 no sentido anti-horário, de forma lenta, e a cada $\frac{1}{4}$ de volta proceder a uma operação do conjunto para verificar se o tempo de fechamento da válvula principal (1) está satisfatório.

4) Observações Importantes

A tabela A.2 resume algumas ocorrências, a sua causa provável e a ação corretiva adequada para cada situação.

TABELA A. 2 - Principais problemas na operação da VAO

Ocorrência	Causa Provável	Ação Corretiva
A válvula Principal (1) não fecha	Filtro obstruído (2)	Proceder à limpeza do filtro (2)
A válvula não opera satisfatoriamente	Diafragma da válvula principal (1) danificado	Substituir
Vazamento pela respiro dos pilotos (34) e (35)	Diafragma do piloto danificado	Substituir
Vazamento pela sede da válvula principal (1)	1) Sede obstruída 2) Vedação danificada	1) Desobstruir 2) Substituir
Vazamento pelas partes móveis (hastes)	Anéis O'ring danificados	Substituir

Fonte: Válvula Redutora de Pressão; VALLOY

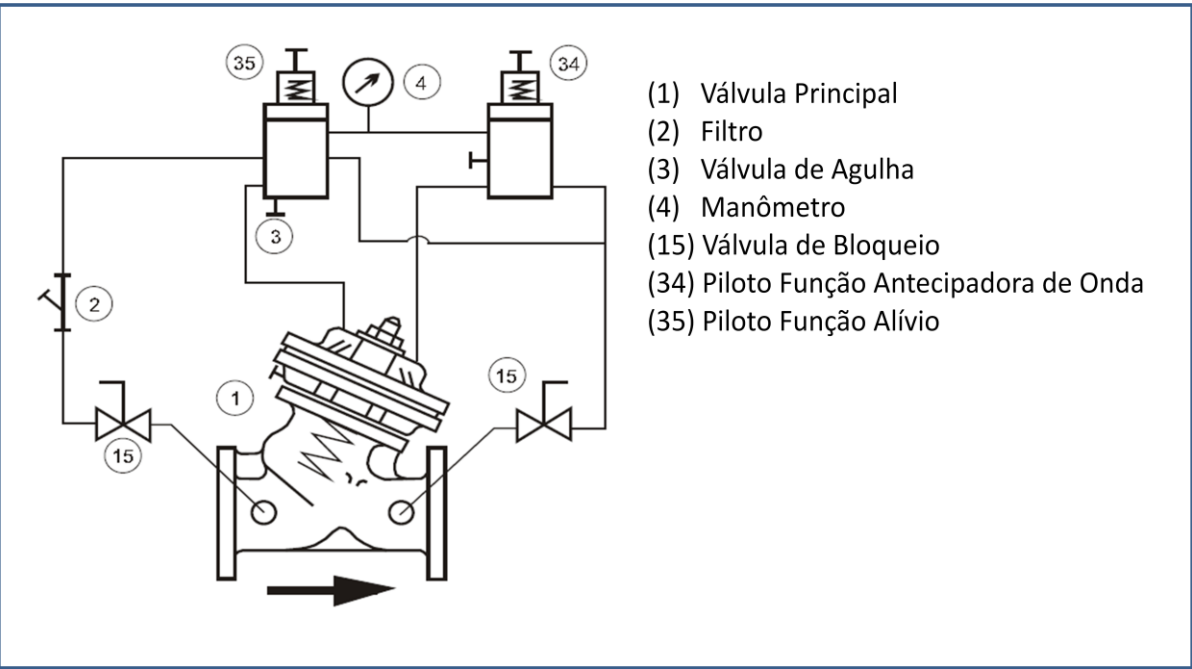
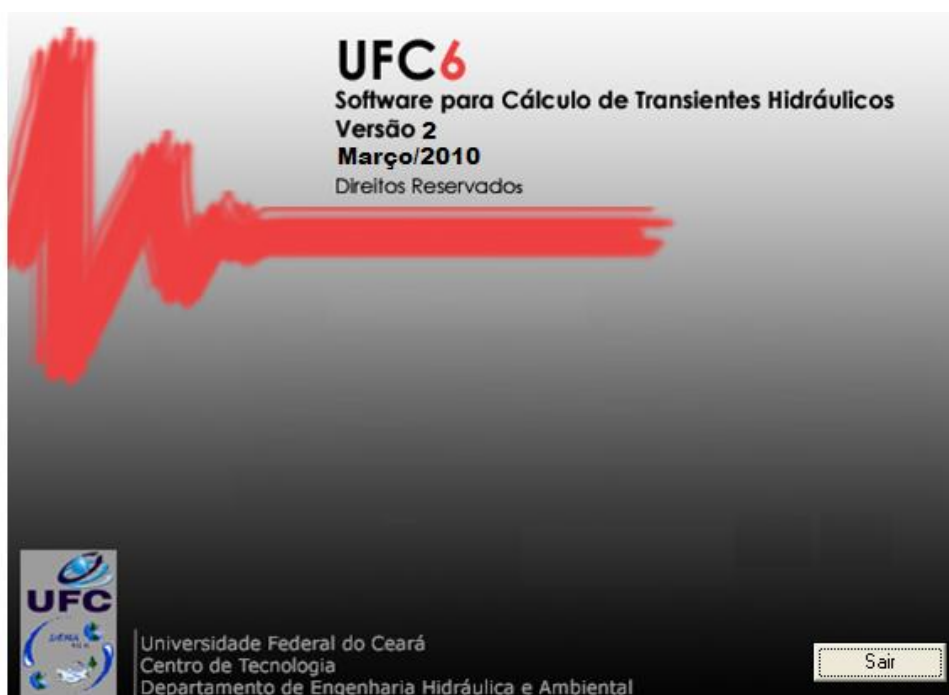


FIGURA A. 10 - Componentes básicos da VAO

Fonte: Válvula antecipadora de onda; VALLOY

ANEXO B – MANUAL DO PROGRAMA UFC6



UFC6

Manual de Utilização (Windows XP Professional Versão 2002 SP3)

1. INTRODUÇÃO

O programa UFC6, que é desenvolvido em Visual Basic, está na sua Versão 2.0, é parte integrante da Dissertação de Mestrado intitulada por Modelagem Computacional de Dispositivos de Atenuação do Golpe de Aríete em Adutoras. O programa foi desenvolvido com o objetivo de determinar o comportamento do transitório hidráulico em tubulações de recalque de água utilizando-se para isso o Método das Características, e o uso das equações características para a modelagem das condições de contorno de equipamentos normalmente encontrados nos sistemas hidráulicos.

Procurou-se desenvolver um programa de fácil utilização e que possibilite ao usuário visualizar o comportamento das ondas de sobrepressão e subpressão decorrentes do fenômeno transitório, além de verificar a influência de diversos dispositivos de atenuação dos golpes de aríete.

2. INSTALAÇÃO

Para a instalação do programa UFC6 é necessário seguir os seguintes passos:

- 1) Instale o AUTOCAD 2002 ou superior
- 2) Execute o instalador  do sistema UFC

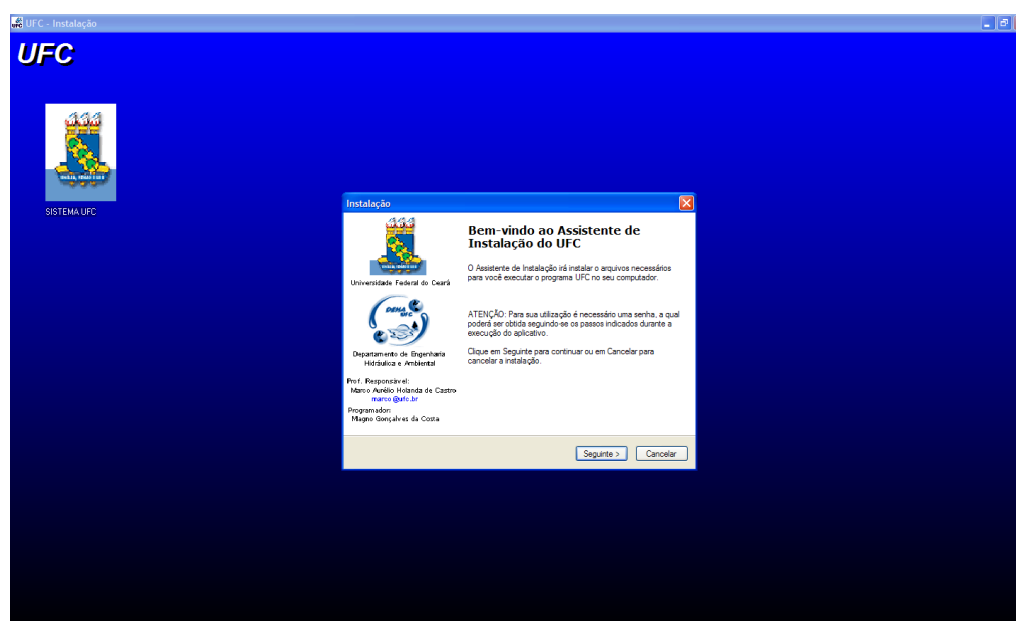


FIGURA B. 1 - Assistente de instalação I

- 3) Clique em **seguinte** para continuar a instalação

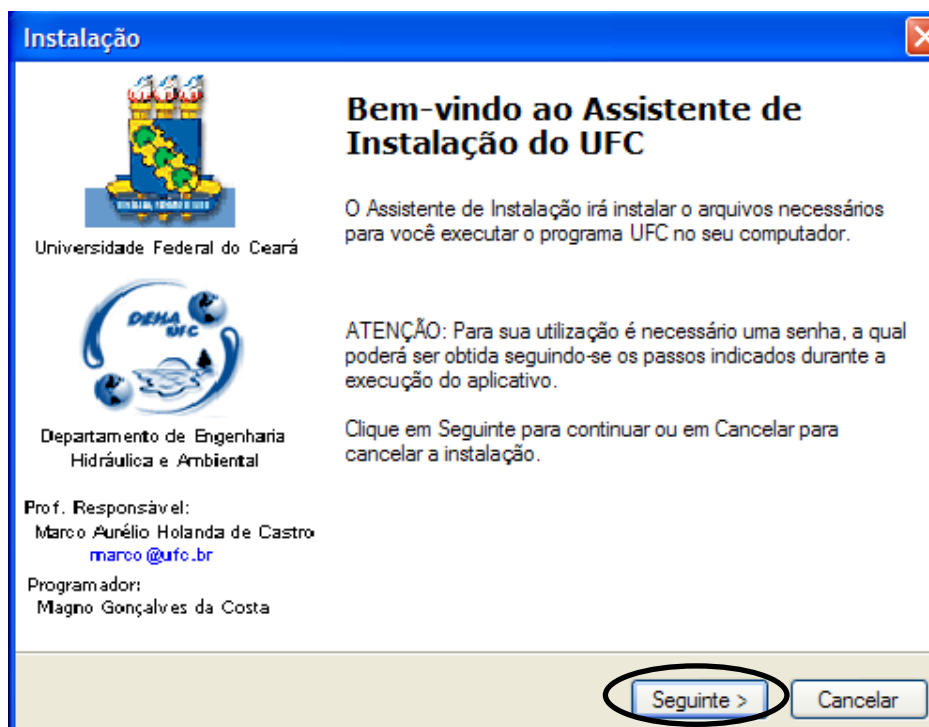


FIGURA B. 2 - Assistente de instalação II

- 4) Clique em **instalar** para continuar a instalação

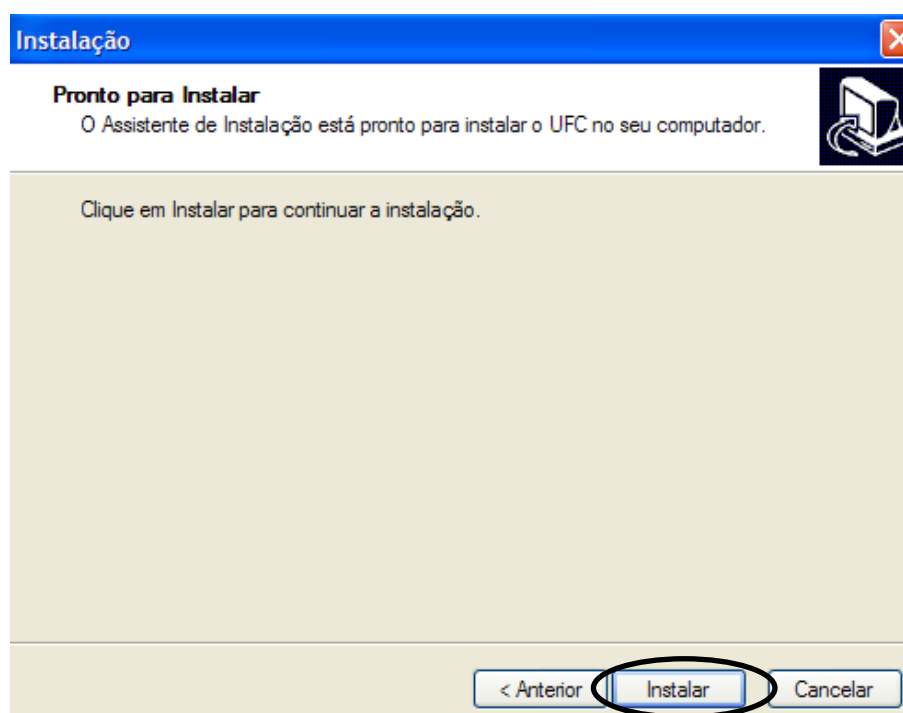


FIGURA B. 3 - Assistente de instalação III

- 5) **Aguarde** a instalação do programa

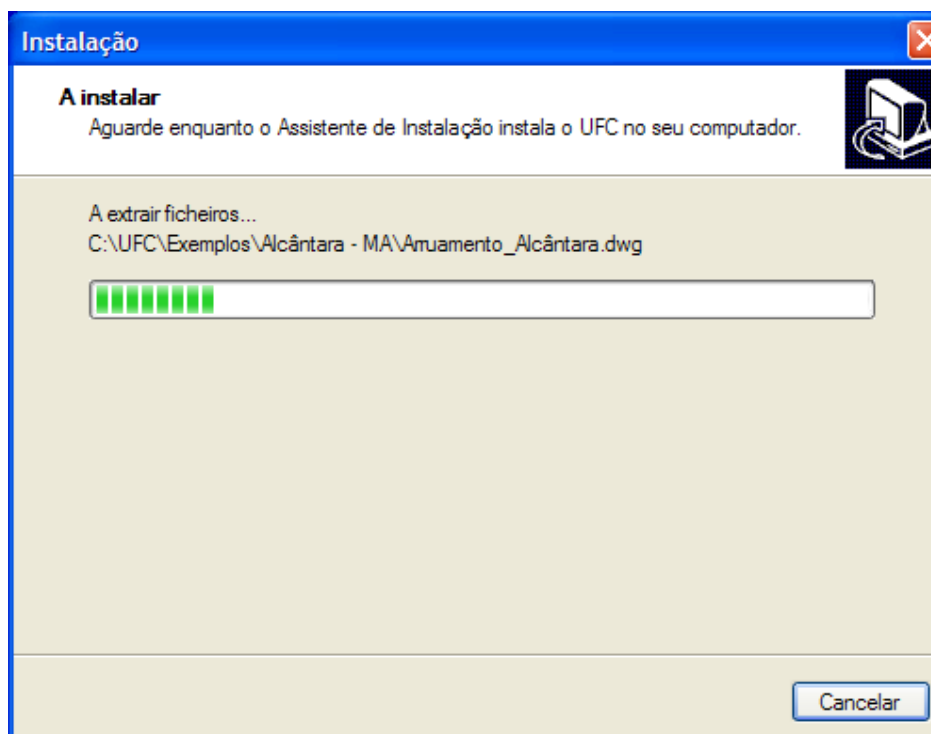


FIGURA B. 4 - Assistente de instalação IV

- 6) Em seguida clique em **concluir** para finalizar a instalação



FIGURA B. 5 - Assistente de instalação V

3. CONFIGURAÇÕES REGIONAIS

Pronto, o programa está instalado no diretório “C:\UFC\UFC6”. Para iniciar o programa vá ao diretório e clique no seguinte ícone:



FIGURA B. 6 - Ícone do aplicativo UFC6

Caso apareça a seguinte mensagem: “*Para execução correta do UFC6, modifique para (.) a configuração do símbolo decimal nas opções regionais do painel de controle do seu computador.*”.

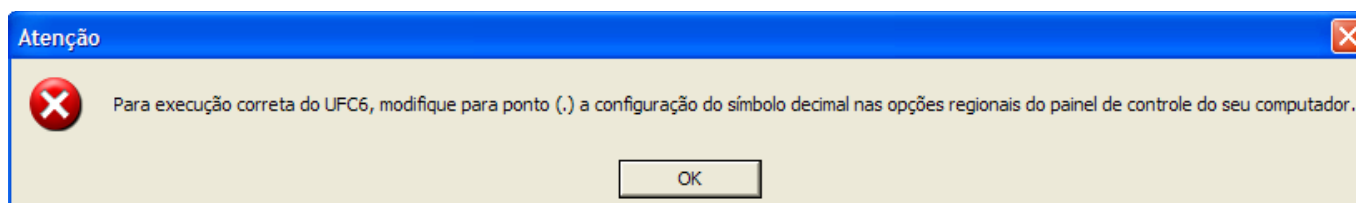


FIGURA B. 7 - Configurações regionais

Faça o seguinte: Vá a *iniciar > Configurações > Painel de controles > Opções regionais e de idioma*. Em *padrões e formatos*, clique no botão **Personalizar**.

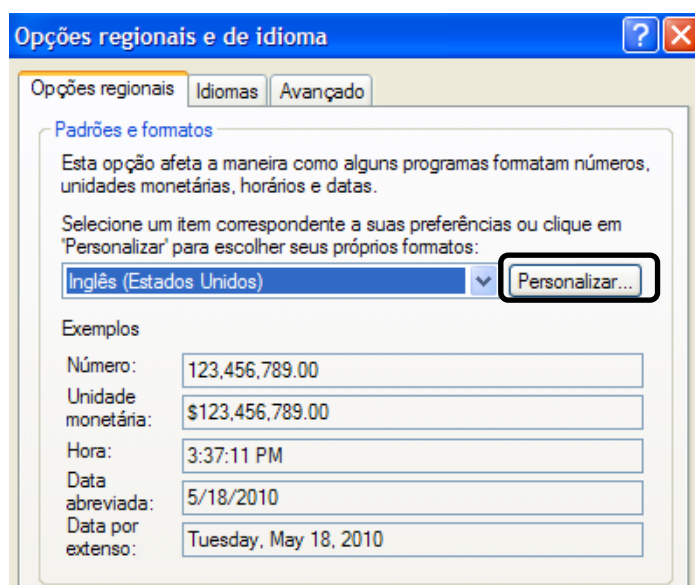


FIGURA B. 8 - Opções regionais e de idioma

Em *personalizar opções regionais*, modifique a propriedade **Símbolo decimal** para ponto (.).

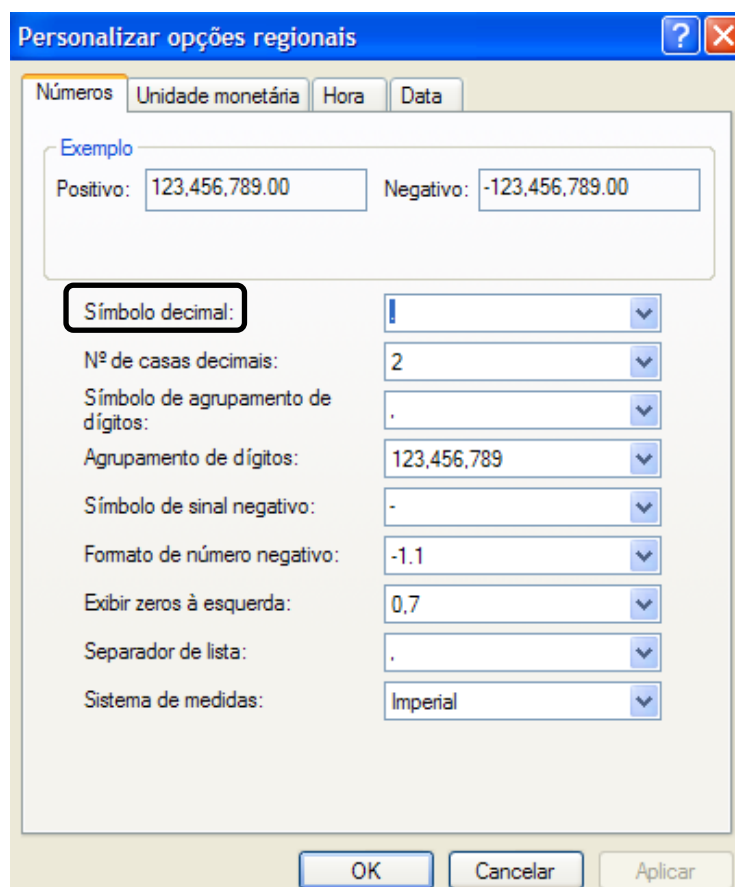


FIGURA B. 9 - Personalizar opções regionais

4. SISTEMA DE PROTEÇÃO UFC

Os programas do sistema UFC possuem senha de proteção. Por isso, ao iniciar o programa pela primeira vez, aparecerá a seguinte caixa de diálogo:

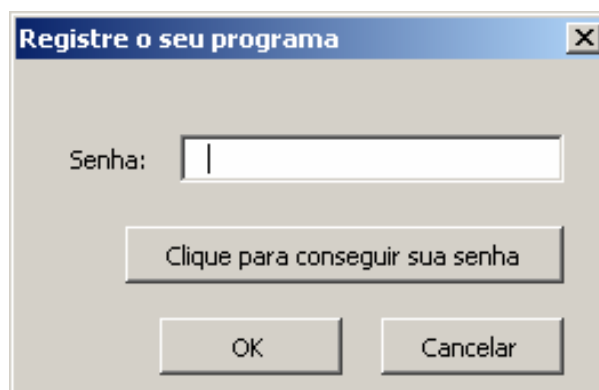


FIGURA B. 10 - Registro sistema UFC (Obter a senha)

Caso o usuário não possuir a senha, clique em: “Clique para conseguir a senha”. Então, irá aparecer a caixa de diálogo a seguir:

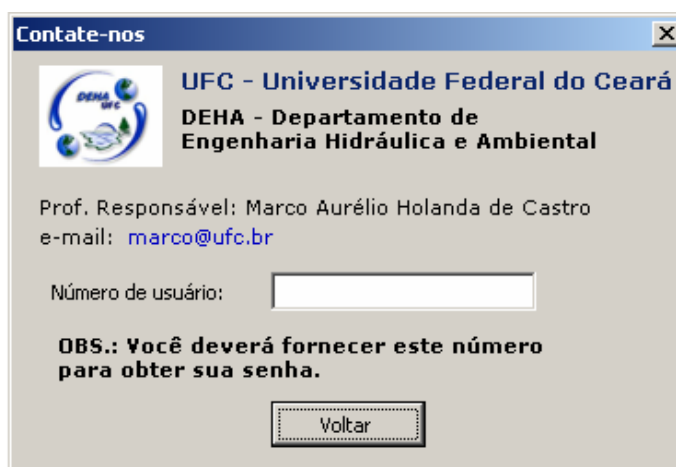


FIGURA B. 11 – Registro do sistema UFC (Número do usuário)

Para obter a senha, informe para o E-mail: marco@ufc.br o número do usuário que irá aparecer. Onde o professor Marco Aurélio irá gerar a senha e irá mandar por e-mail. Cole a senha na caixa de diálogo e o programa UFC poderá ser utilizado.

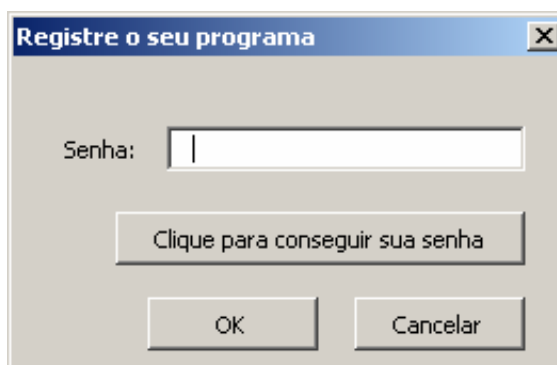


FIGURA B. 12 - Registro sistema UFC (Senha)

5. NOMENCLATURA DO PROGRAMA UFC6

No programa UFC6, o primeiro nó deve ser uma bomba e o último um reservatório a jusante. O transiente é gerado pela interrupção do bombeamento. Para um melhor esclarecimento segue uma breve descrição da notação utilizada pelo programa UFC6.

Na figura B.13 pode-se identificar de A até E a nomenclatura adotada no gráfico da tela do programa.

- A) Carga Máxima de Resistência: É o valor máximo de carga piezométrica que o material pode suportar. Representada pela linha vermelha.
- B) Envoltória Máxima: São os valores máximos da Carga piezométrica para cada secção do tubo. Representada pela linha azul.
- C) Linha Piezométrica Permanente: São os valores da Carga piezométrica permanente para cada secção do tubo. Representada pela linha verde clara
- D) Perfil do Terreno: São os valores da cota do terreno para cada nó. Representada pela linha preta.
- E) Envoltória Mínima: São os valores Mínimos da Carga piezométrica para cada secção do tubo. Representada pela linha verde escura.

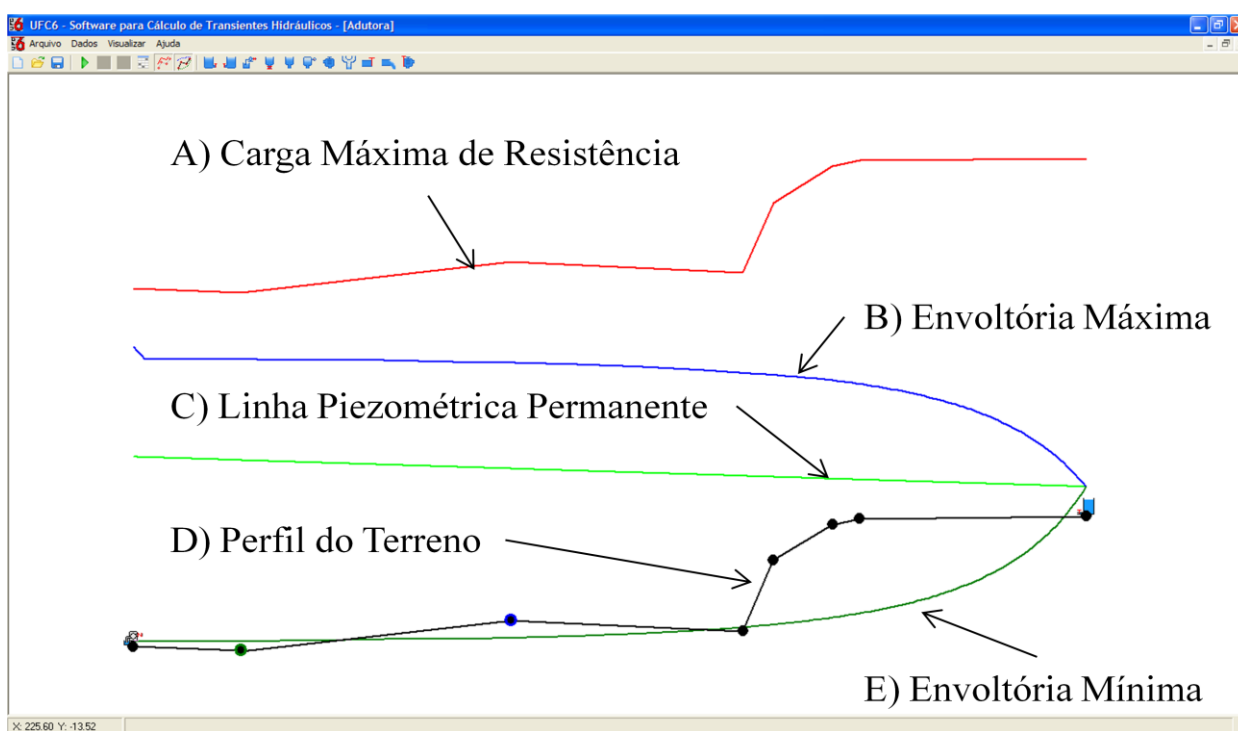


FIGURA B. 13 - Envoltórias máximas e mínimas

- Nó: representa a junção de dois tubos, no programa UFC6 o primeiro nó é uma bomba e o último um reservatório. Caso houver a necessidade de instalação de mecanismos atenuadores do golpe de aríete, deve ser instalado no nó adequado.

————— Tubo: Cada tubo tem suas características particulares.

●————● Sequência nó-tubo-nó.

● Representa a maior diferença em módulo entre a carga piezométrica mínima do nó e a carga piezométrica permanente referente ao mesmo nó.

● Representa a maior diferença em módulo entre a carga piezométrica máxima do nó e a carga piezométrica permanente referente ao mesmo nó

Carga piezométrica da secção = Carga de pressão da secção + cota da secção

Carga piezométrica da secção = $P/\gamma + \text{cota da secção}$

Onde:

P = pressão da secção

γ = peso específico do fluido

Cota da secção = Distância vertical entre a referência espacial e a secção do tubo.

Nos gráficos das envoltórias máximas e mínimas considera-se a cota piezométrica em função da distância horizontal entre os nós. A distância horizontal é calculada para cada nó com base no comprimento de cada tubo e a cota de cada nó (Figura B.14).

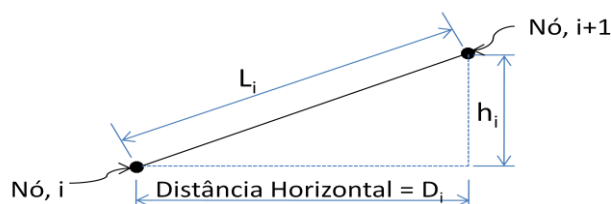


FIGURA B. 14 - comprimento e distância horizontal

$$D_i = \sqrt{L_i^2 - h_i^2} \quad (\text{B. 1})$$

Onde:

h_i = É a diferença da cota entre os nós

L_i = É o comprimento do tubo i

6. INOVAÇÕES DA ÚLTIMA VERSÃO

As melhorias nessa última versão do programa UFC6 foram às seguintes: Mudança no cálculo das envoltórias máximas e mínimas, adição da condição de contorno da válvula antecipadora de onda, a possibilidade de abrir um projeto com apenas dois cliques e em qualquer diretório, adição da linha de carga máxima que a tubulação pode suportar e a visualização do perfil anterior.

Na versão anterior, o cálculo das envoltórias máximas e mínimas era realizado da seguinte forma: Primeiro, determinava-se o valor da cota piezométrica para cada nó, e em seguida ligavam-se cada nó. Na versão atual, determina-se a cota piezométrica de cada seção, e em seguida ligam-se cada seção. Desse modo, a precisão é melhorada e dependente do número de divisões de cada tubo.

A adição da condição de contorno para a válvula antecipadora de onda, sendo um mecanismo de alívio para o golpe de aríete, contribuindo para enriquecer o programa UFC6 no cálculo do transitório hidráulico para condições mais realistas de projeto.

Nessa versão, o usuário poderá abrir qualquer projeto do programa UFC6 com apenas dois cliques e ainda trabalhar com vários projetos ao mesmo tempo em qualquer diretório.

Cada tubulação tem uma carga máxima na qual esta pode suportar. Caso a carga piezométrica assumir um valor superior à carga máxima que a tubulação pode suportar, o material pode romper. Por isso, nessa versão, a adição da carga máxima é de fundamental importância na análise de projetos em hidráulica transiente.

Os mecanismos atenuadores do golpe de aríete são de fundamental importância na análise do transiente hidráulico, e para visualizar a melhoria efetivada por eles deve-se analisar a sua influência nas envoltórias máximas e mínimas. Nessa versão, é possível à visualização na mesma tela, as envoltórias máximas e mínimas anterior e as envoltórias para o caso com mecanismo de proteção.

7. INICIANDO O PROGRAMA

Para iniciar o programa, vá para o diretório: “C:\UFC\UFC6\Arquivos de Dados de Entrada”, e escolha um arquivo no formato (*.pth), e abra com um duplo clique. O usuário também pode abrir o programa indo ao diretório “C:\UFC\UFC6” e em seguida clicar no seguinte ícone:

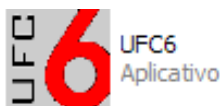


FIGURA B. 15 - Ícone do aplicativo UFC6

Clicando neste ícone, irá abrir a tela inicial do programa.

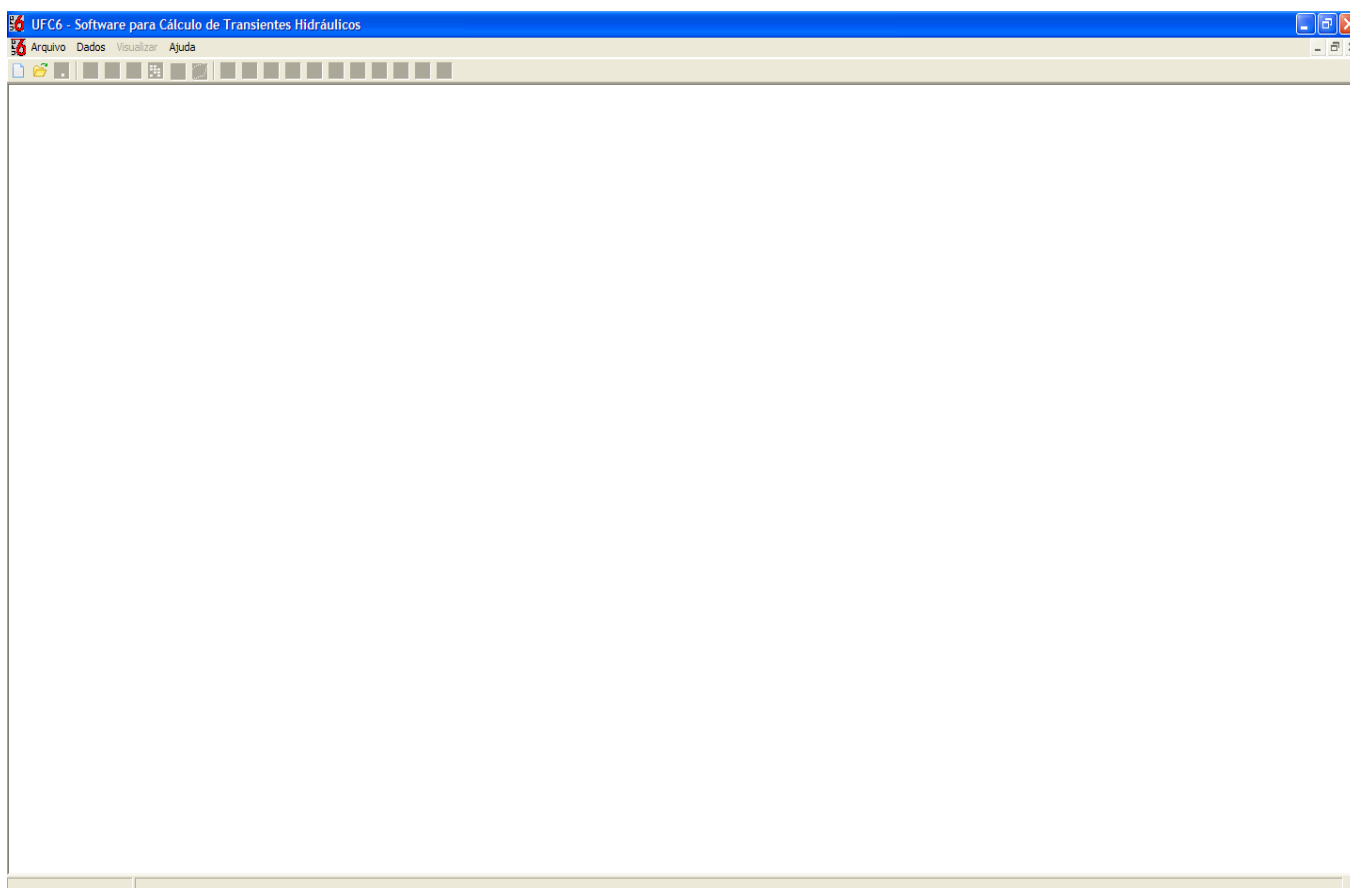


FIGURA B. 16 – Projeto em branco

Prosseguindo, o usuário poderá abrir um arquivo no formato (*.pth) fazendo o seguinte: vá ao menu *arquivo*>*Abrir Projeto* (figura B.17).

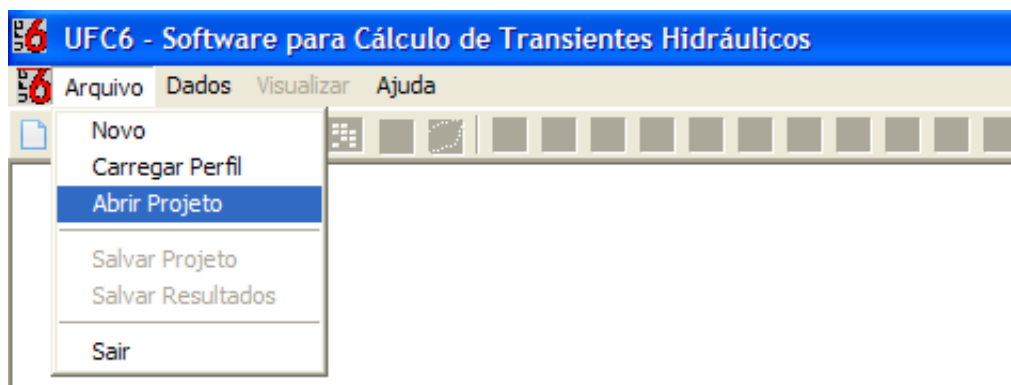


FIGURA B. 17 - Menu Arquivo

E em seguida, vá ao diretório: “C:\UFC\UFC6\Arquivos de Dados de Entrada”, e escolha um arquivo para iniciar o programa, e pressione abrir (figura B.18).

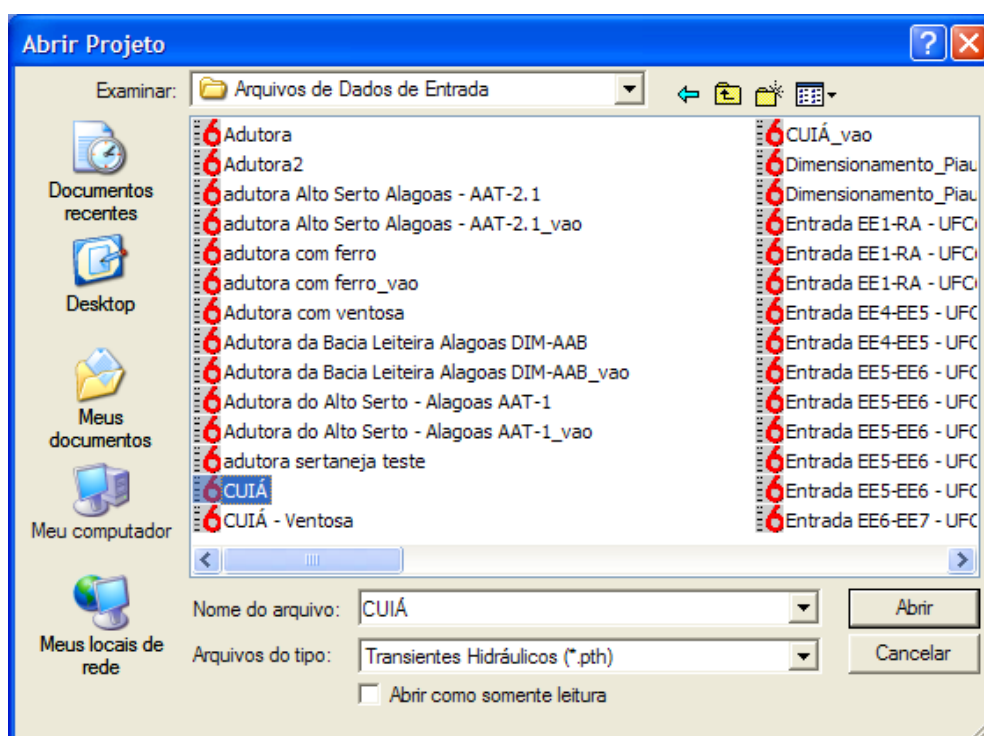


FIGURA B. 18 – Abrir projeto

Ao escolher a adutora, o usuário irá visualizar o projeto dimensionado de acordo com a cota de suas condições de contorno (figura B.19).

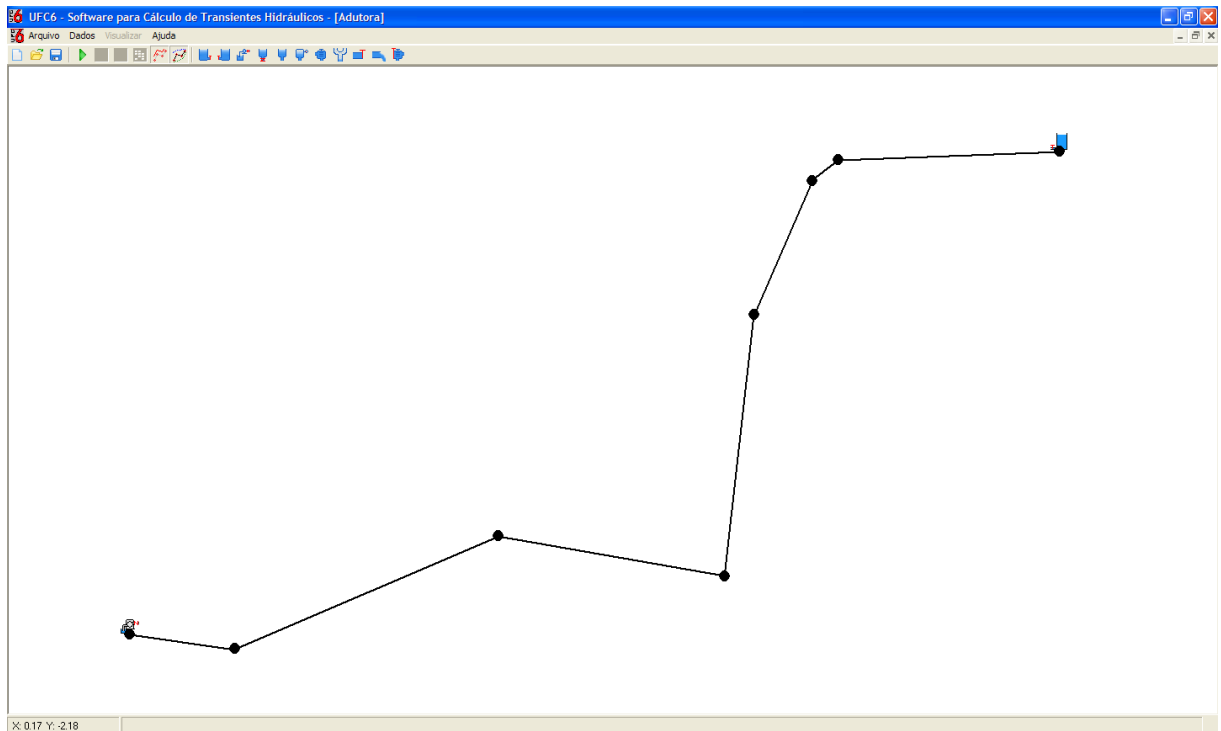


FIGURA B. 19 - Perfil da adutora

No programa UFC6, a barra ferramentas e o menu e tem o seguinte formato:



FIGURA B. 20 - Barra de ferramentas e Menu

A tabela a seguir, ilustra os ícones da barra de ferramentas.

TABELA B. 1 - Barra de Ferramentas

Ícone	Nome	Descrição
	Novo projeto	Inicia um projeto em branco
	Abrir projeto	Abre um novo projeto
	Salvar projeto	Salva o projeto atual

	Executar	Executa os cálculos do projeto atual
	Visualizar envoltórias	Visualiza as envoltórias
	Visualizar planilha de dados	Visualiza os dados de saída
	Visualizar carga máxima de resistência	Caso pressionado visualiza a carga máxima de resistência
	Visualizar perfil anterior	Caso pressionado visualiza o perfil calculado anteriormente
	Reservatório a montante	Condição de contorno a montante (primeiro nó)
	Reservatório a jusante	Condição de contorno a Jusante (último nó)
	Bomba	Condição de contorno a montante (primeiro nó)
	One-way	Mecanismo de proteção contra o golpe de aríete
	Chaminé de Equilíbrio	Mecanismo de proteção contra o golpe de aríete
	Reservatório Hidropneumático	Mecanismo de proteção contra o golpe de aríete
	Válvula de Alívio	Mecanismo de proteção contra o golpe de aríete
	Ventosa	Mecanismo de proteção contra o golpe de aríete
	Válvula a Jusante	Condição de contorno a Jusante (último nó)
	Saída Livre	Condição de contorno a Jusante (último nó)
	Válvula Antecipadora de Onda	Mecanismo de proteção contra o golpe de aríete

Para iniciar o cálculo do transiente hidráulico, pode-se proceder à entrada de dados de duas formas diferentes: Utilizando-se um arquivo de entrada de dados nos formatos de texto (*.txt) ou *Transientes Hidráulicos* (*.pth), ou ainda, digitando-se um a um os dados de entrada necessários para se efetuar o cálculo do golpe de aríete. As seções 8 e 9 ilustram as duas formas de entrada de dados.

8. ENTRADA MANUAL DE DADOS

Através do menu *Arquivo>Carregar Perfil* (figura B.21), o usuário pode acessar o formulário *Carregar Perfil*, devendo entrar com os dados necessários para o traçado do perfil da adutora. Tais dados são: Número de trechos, cotas de montante (m), cotas de jusante (m), comprimentos (m), diâmetros nominais (mm).

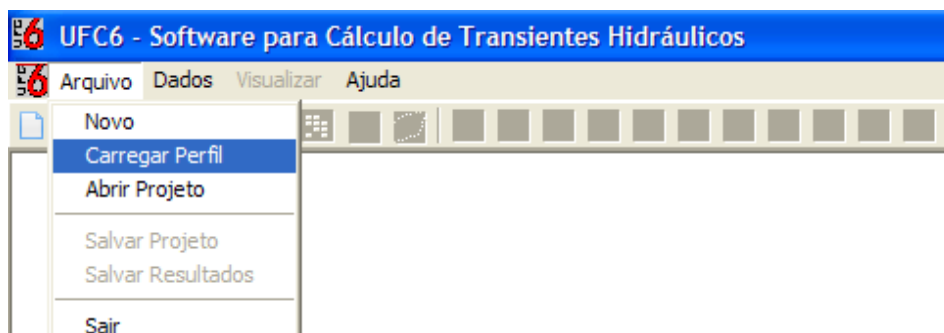


FIGURA B. 21 - Menu Arquivo> Carregar perfil

O usuário tanto poderá digitar os dados diretamente na tabela, como também importá-los de um arquivo de texto (*.txt), clicando no botão *Importar* (figura B.22).

Trecho	Cota Mont.(m)	Cota Jus.(m)	Comp.(m)	Diâm.(mm)
1	3.61	2.50	200.00	300
2	2.50	11.00	500.00	300
3	11.00	8.00	430.00	300
4	8.00	27.69	60.00	300
5	27.69	37.80	110.00	300
6	37.80	39.35	50.00	300
7	39.35	40.00	420.00	300

FIGURA B. 22 - Formulário Carregar Perfil

ATENÇÃO: O usuário também poderá salvar em arquivo de texto (*.txt) os dados digitados diretamente na tabela, clicando no botão *Salvar* (Figura B.22). Para tal, deve-se certificar que a configuração do símbolo decimal (ver seção 3 desse manual) nas opções regionais do painel de controle do computador em uso seja a opção “.” (ponto). O usuário deve adicionar o diâmetro nominal de acordo com o material escolhido através do arquivo de materiais (ver seção 18 deste manual).

O arquivo gerado poderá ser importado pelo formulário para a entrada automática de dados, e tem o seguinte formato:

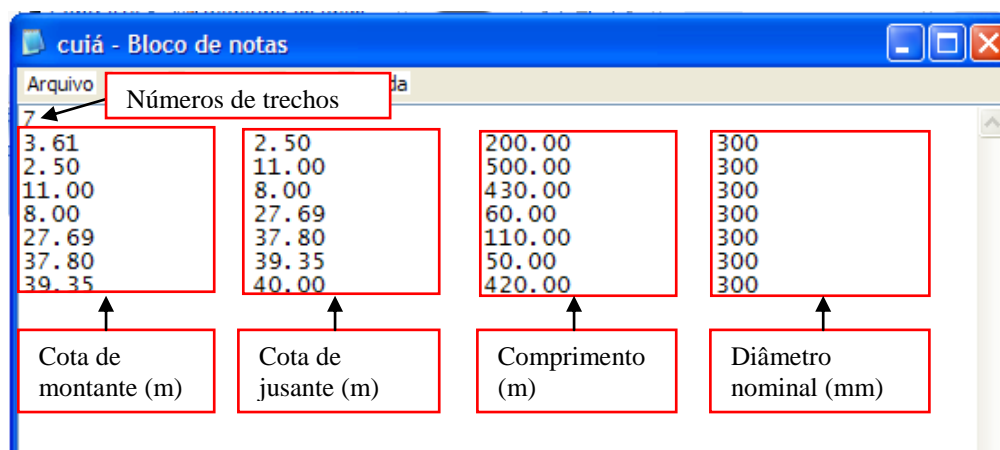


FIGURA B. 23 - Entrada manual de dados (Arquivo de Texto)

O usuário poderá escolher para todos os trechos o tipo de material e o tipo de ancoragem conforme indicado nas figuras B.24 e B.25 respectivamente. A rugosidade será igual à zero, e a partir do conhecimento do material o programa utiliza a rugosidade padrão para o material em questão, que é obviamente diferente de zero.

Caso o usuário escolher a opção “outro material” ver a seção 18.2 para maiores esclarecimentos.

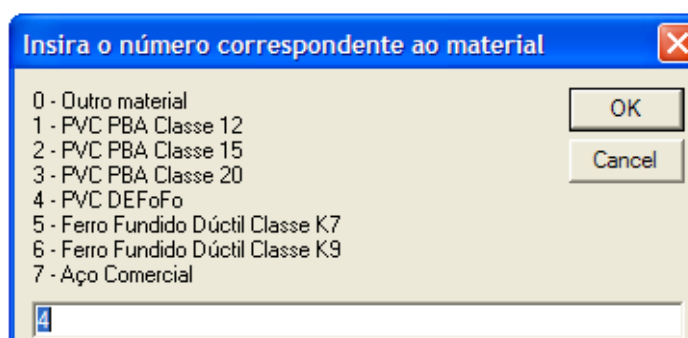


FIGURA B. 24 - Opção material

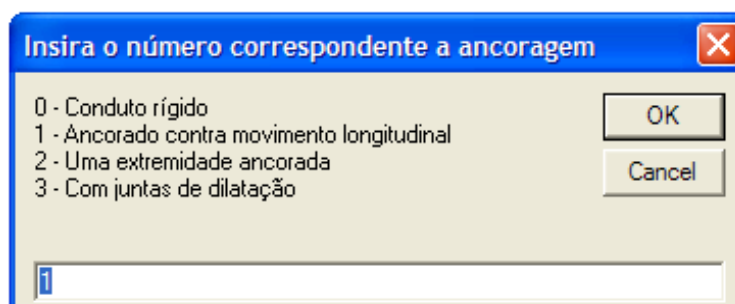


FIGURA B. 25 - Opção ancoragem

Clicando em *OK* no formulário *Carregar Perfil*, é traçado o perfil da adutora de acordo com a figura B.26.

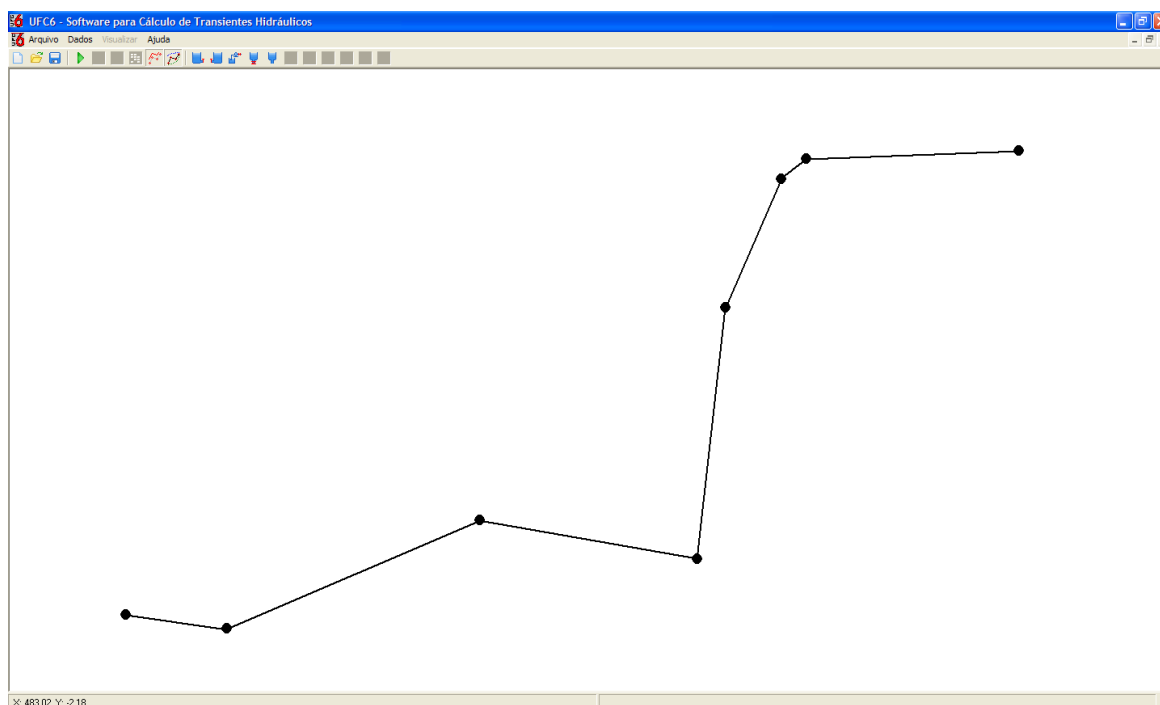


FIGURA B. 26 - Perfil carregado

Após seguir todos esses passos, o formulário aberto será o mostrado na figura acima. Em seguida, o usuário poderá modificar os dados de nós e trechos, clicando com o *botão direito do mouse* ou ainda inserir as condições de contorno desejadas.

Para esse exemplo, o material escolhido é o PVC DEFoFo (identificação 4) e o tipo de ancoragem é o ancorado contra um movimento longitudinal (identificação 1). O primeiro nó deve ter uma bomba e o último um reservatório a jusante.

Para inserir a bomba, basta clicar com o *botão direito do mouse* no primeiro nó e em seguida escolher a opção: Res. Mont. Bomba e Val. de Retenção.

FIGURA B. 27 - Dados do Nó (Bomba)

Em seguida, devem-se inserir os dados da bomba clicando no *botão especificação* >> (ver figura B.27), e então adicionar os dados e pressionar *OK*.

FIGURA B. 28 - Dados para a Bomba

Por último, clique com o *botão direito do mouse* no último nó e adicione a condição de contorno “Reservatório de Jusante”.

FIGURA B. 29 - Dados do nó (Reservatório de Jusante)

Finalizada a entrada de dados, o usuário pode dar início o processo de cálculo propriamente dito. Para isso, basta clicar no *botão Executar* ►, localizado na barra de ferramentas (figura B.30).



FIGURA B. 30 - Barra de ferramentas (botão executar)

Aperte *OK* para o cálculo, e então espere carregar até que o *botão Resultados >>* esteja disponível.

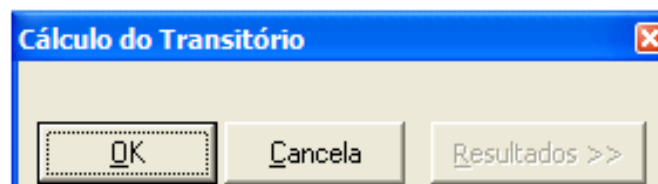


FIGURA B. 31 - Formulário cálculo do transitório (Botão OK)

O formulário *Cálculo do Transitório* está 100% carregado. E o usuário poderá verificar os resultados da simulação clicando no botão *Resultados >>*.

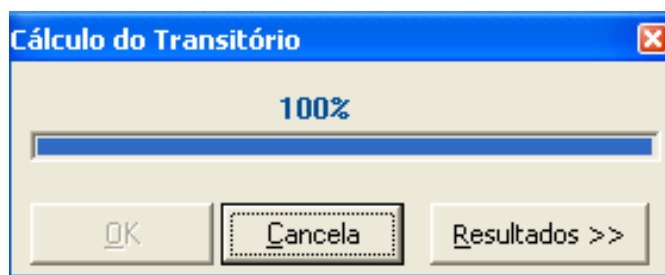


FIGURA B. 32 - Formulário Cálculo do Transitório (botão Resultados)

A figura B.33 é a tela que mostra as envoltórias máximas e mínimas, o perfil do terreno e a carga máxima de resistência.

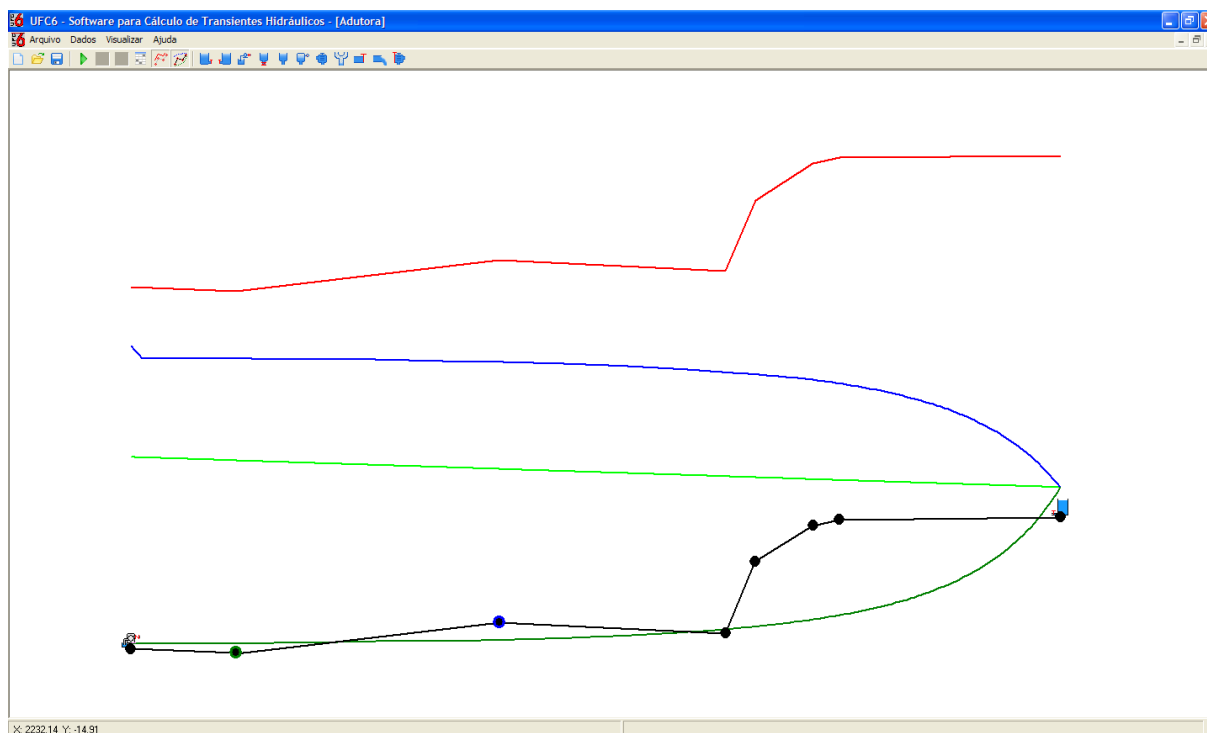


FIGURA B. 33 - Perfil Calculado

9. ENTRADA AUTOMÁTICA DE DADOS

O usuário pode optar também pela entrada de dados automática. Para isso, deverá utilizar arquivos de formato *Transientes Hidráulicos* (*.pth). Para a entrada automática, vá ao diretório “C:\UFC\UFC6\Arquivos de Dados de Entrada” e escolha o projeto clicando nele. Ou se preferir vá ao diretório “C:\UFC\UFC6” e clique no seguinte ícone:

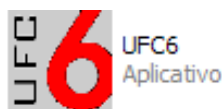


FIGURA B. 34 - Ícone do aplicativo UFC6

E em seguida, vá ao menu *Arquivo>Abrir Projeto* conforme mostrado na figura B.35.

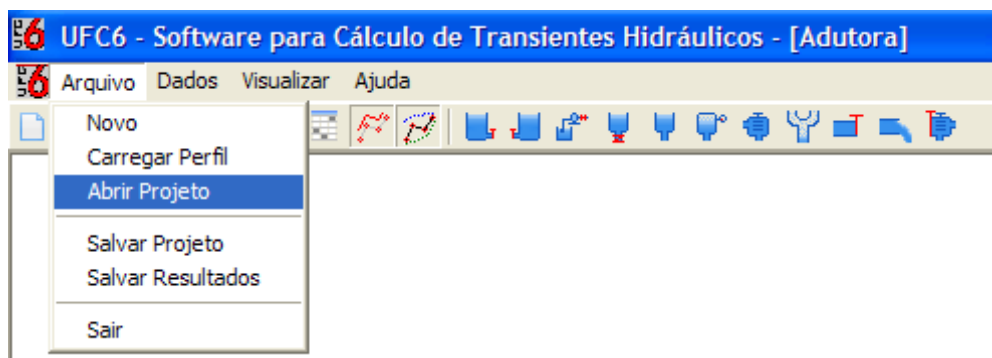


FIGURA B. 35 - Menu Arquivo>Abrir Projeto

Escolha o projeto no diretório “C:\UFC\UFC6\Arquivos de Dados de Entrada” e pressione o *botão Abrir*.

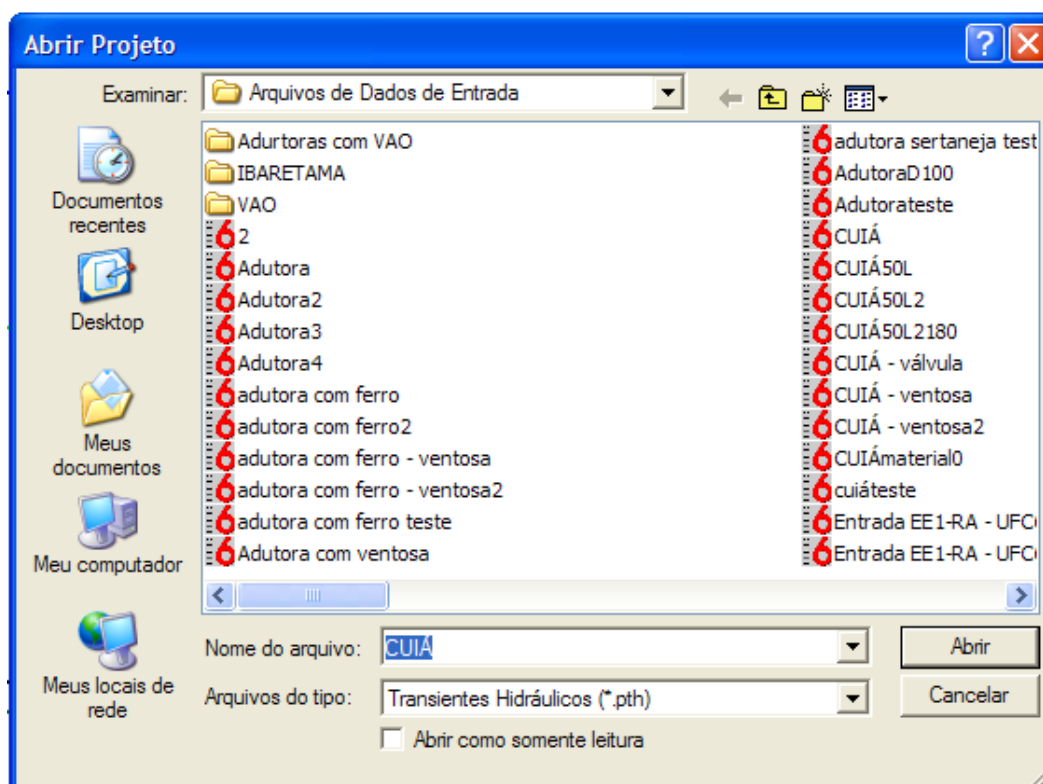
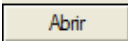


FIGURA B. 36 - Abrir Projeto

Ao pressionar o *botão abrir*  irá aparecer a seguinte tela:

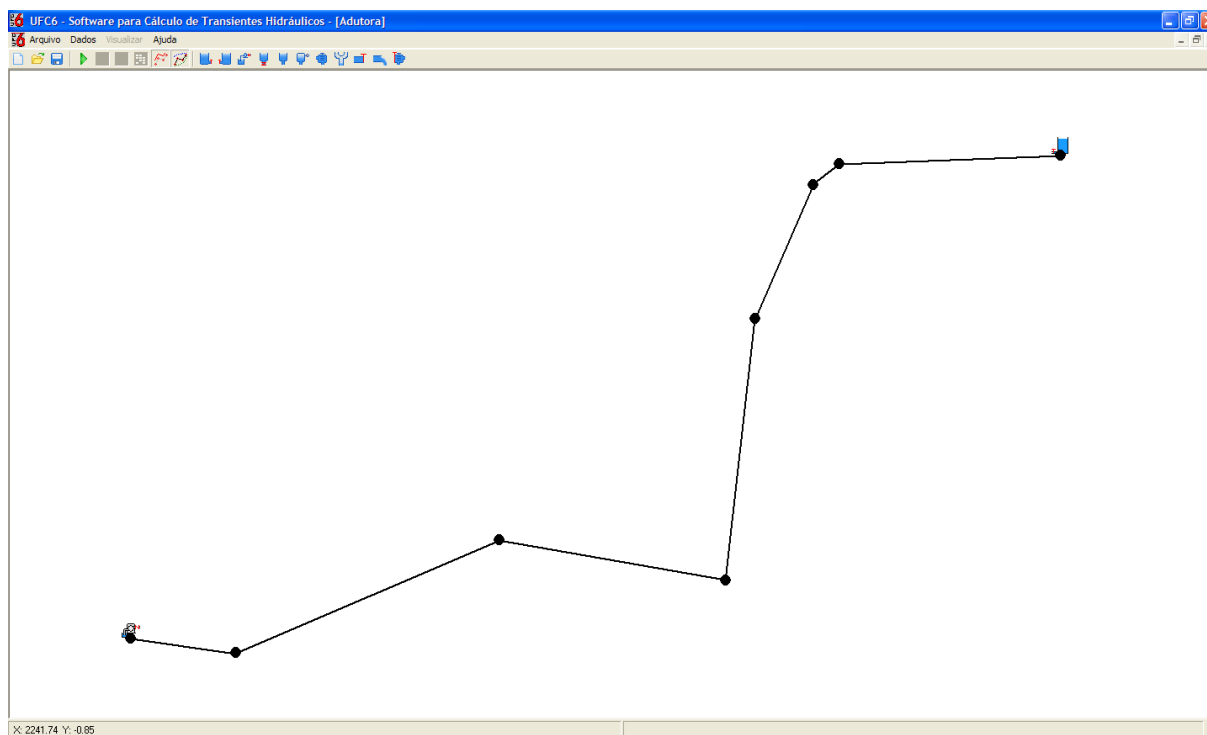



FIGURA B. 37 - Perfil carregado

Finalizada a entrada de dados, o usuário pode dar início ao processo de cálculo propriamente dito. Para isso, basta clicar no botão Executar , localizado na barra de ferramentas.

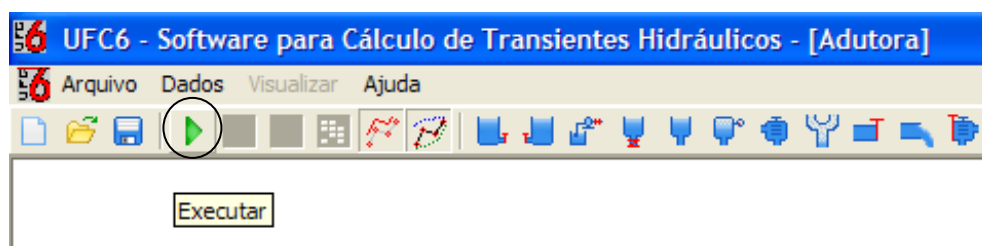


FIGURA B. 38 – Barra de ferramenta (executar cálculo)

Aperte *OK* para o cálculo, e então espere carregar até que o botão *Resultados >>* esteja disponível.

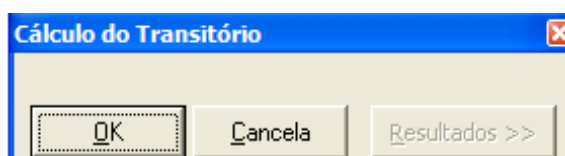


FIGURA B. 39 - Formulário Cálculo do Transitório (Botão OK)

O formulário *Cálculo do Transitório* está 100% carregado. E o usuário poderá verificar os resultados da simulação clicando no botão *Resultados >>*.

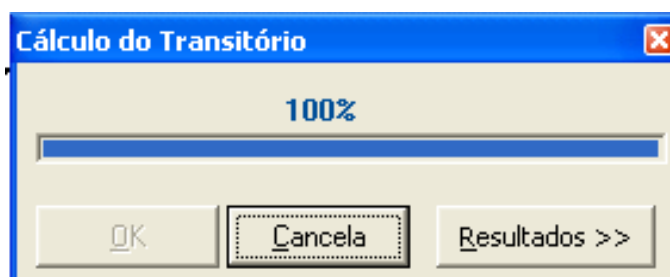


FIGURA B. 40 - Formulário cálculo do transitório (Botão Resultados)

A figura B.41 é a tela que mostra as envoltórias máximas e mínimas, o perfil do terreno e a carga máxima de resistência.

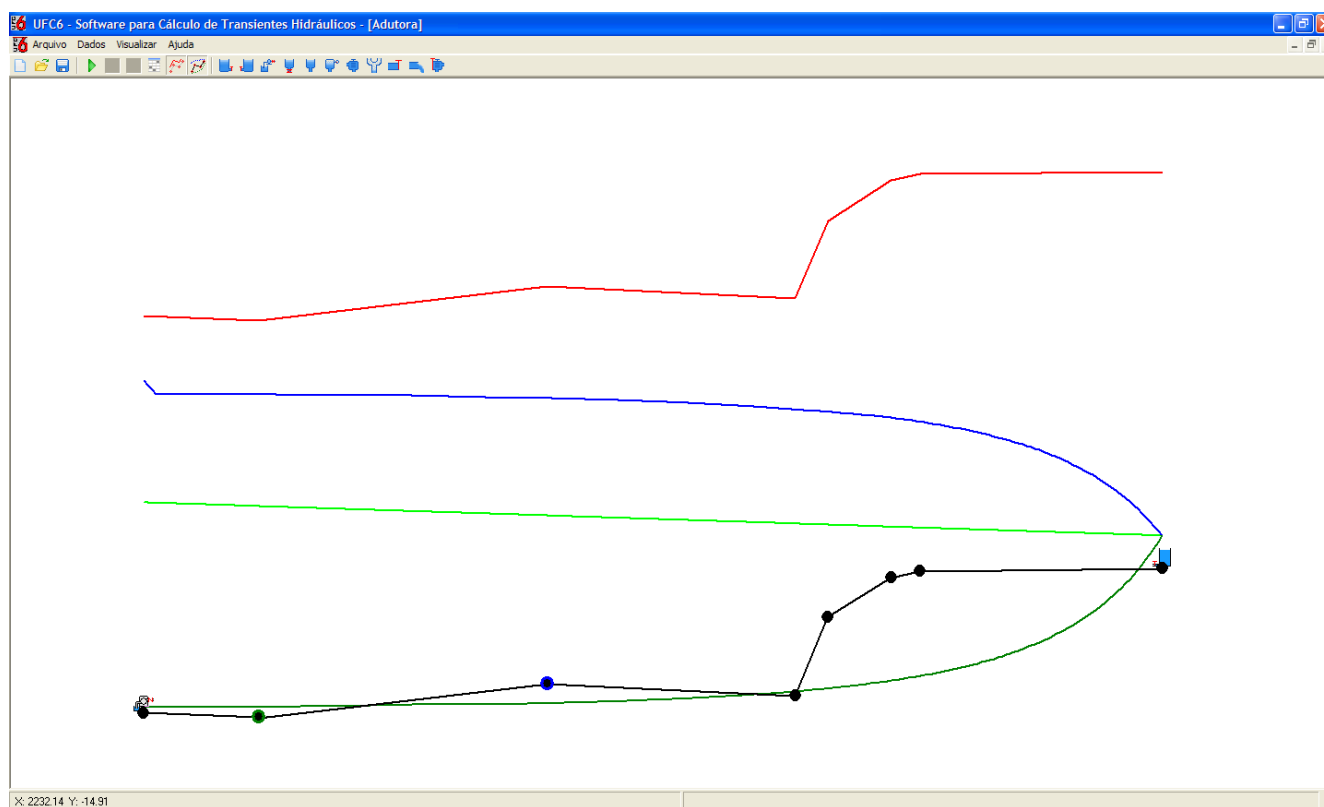


FIGURA B. 41 - Perfil calculado

10. ALTERANDO DADOS DE ENTRADA

Caso o usuário desejar alterar os dados das simulações este pode modificar os dados dos trechos, dos nós e dados gerais da simulação.

10.1. ALTERANDO DADOS DOS TRECHOS

Para ir ao trecho desejado deve-se mover o *cursor do mouse* perto do trecho até que este esteja selecionado (cor verde), e então, deve-se clicar com o *botão direito do mouse*. O usuário poderá adicionar as características desse trecho através do formulário *Dados do Trecho* (figura B.42).

FIGURA B. 42 - Formulário Dados do Trecho

Para o tipo de material, por meio de caixas de texto com listas *dropdown*, o usuário poderá selecionar:

TABELA B. 2 - Tipos de Material

Tipos de Material da Tubulação	Material: PVC DEFoFo
PVC PBA Classe 12	
PVC PBA Classe 15	
PVC PBA Classe 20	
PVC DEFoFo	

Ferro Fundido Dúctil Classe K7

Ferro Fundido Dúctil Classe K9

Aço Comercial

Para todos os materiais, os valores de módulo de elasticidade (GPa), de rugosidade (mm) e do coeficiente de Poisson são pré-determinados (ver seções 17 e 18).

TABELA B. 3 - Tipos de Ancoragem

<i>Tipo de Ancoragem da Tubulação</i>	Condições de Assentamento: <input type="text" value="Ancorado contra mov. longitudinal"/>
Conduto rígido	
Ancorado contra movimento longitudinal*	
Uma extremidade ancorada	
Com juntas de dilatação	


*Valor padrão

E o usuário poderá selecionar o diâmetro nominal em mm, para cada tipo de material. Existe ainda a opção de o usuário entrar com valor da rugosidade (mm), clicando em especificar rugosidade (Darcy-Weisbach), e ainda modificar o comprimento do trecho da tubulação.

10.2. ALTERANDO DADOS DOS NÓS

O usuário poderá adicionar as características desse nó através do formulário *Dados do Nó*. Para tal, existem duas formas de adicionar contornos aos nós:

- 1) Ao mover o *cursor do mouse* para perto de um nó até este ser selecionado (cor verde) e clicando com o *botão direito*;
- 2) Clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone referente ao contorno desejado na barra de ferramentas, e em seguida, clicar com o *botão esquerdo do mouse* no nó.

O usuário deverá selecionar o contorno desejado através da lista *dropdown* da caixa de texto, e especificar os dados referentes ao contorno clicando no *botão*  (figura B.43).

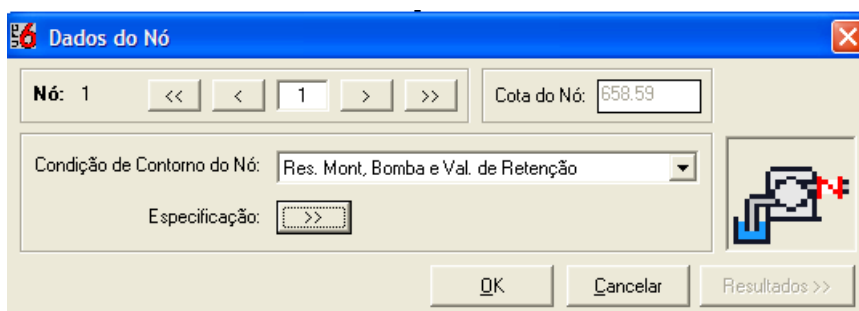


FIGURA B. 43 - Formulário Dados do Nó

Caso o usuário escolher a bomba como condição de contorno, esta deve ser adicionada ao primeiro nó, e os dados devem ser adicionados para cada projeto.

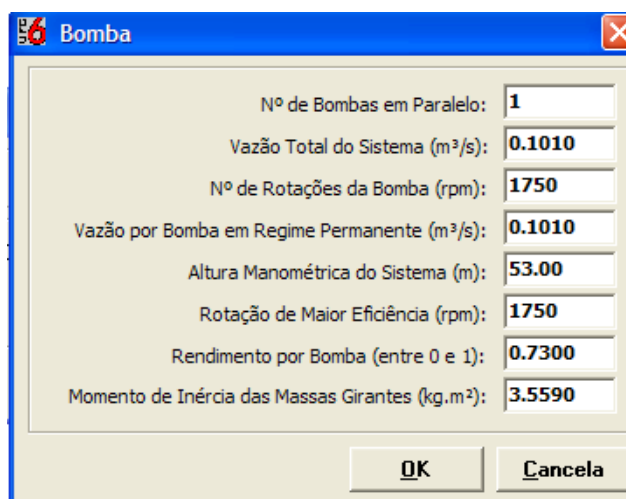


FIGURA B. 44 - Formulário Bomba

A tabela B.4 ilustra as considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 4 - Dados da Bomba

<i>Dados da Bomba</i>	<i>Considerações</i>
Número de Bombas em Paralelo	-
Vazão total do sistema (m³/s)	Soma da vazão de todas as bombas;
Número de rotações da bomba (rpm)	-

Vazão da bomba em regime permanente (m^3/s)	Vazão de cada bomba em paralelo antes do corte de energia (estado permanente);
Altura manométrica do sistema (m)	Altura geométrica de recalque mais a perda de carga total do sistema;
Rotação de maior eficiência (rpm)	Rotação de maior rendimento;
Rendimento por bomba	Valor entre 0 e 1;
Momento de inércia das massas girantes (kg.m^2)	Soma do momento de inércia da bomba com o do motor, multiplicado pelo número de bombas em paralelo.

10.3. ALTERANDO DADOS GERAIS

O usuário poderá modificar as características do projeto, através do menu *Dados > dados gerais*. Através das abas Parâmetros do projeto (figura B.45) e Dados do Projeto (figura B.46) o usuário poderá modificar os dados gerais.

Parâmetros do Projeto

Dados do Projeto | **Parâmetros do Projeto**

Tempo de duração da simulação (s): 60

Nº Divisões do menor trecho: 7

Módulo de Elasticidade Volumétrica do Fluido (Gpa): 2.19

Densidade do Fluido (kg/m^3): 1000.00

Viscosidade Cinemática do Fluido (m^2/s): 0.000001

OK Cancela

FIGURA B. 45 - Formulário Parâmetros do Projeto (Parâmetros do Projeto)

Parâmetros do Projeto

Dados do Projeto | Parâmetros do Projeto

Nome do Projeto:

Descrição do Projeto:


OK Cancela

FIGURA B. 46 - Formulário Parâmetros do Projeto (Dados do Projeto)

11. DISPOSITIVOS DE ATENUAÇÃO DO GOLPE DE ARÍETE

Caso necessário, o usuário pode indicar se há dispositivo de alívio do golpe aríete, através da barra de ferramentas. Os dispositivos disponibilizados pelo programa são:

11.1. TANQUE DE ALIMENTAÇÃO UNIDIRECIONAL (TAU) OU ONE-WAY

Para adicionar essa condição de contorno, o usuário deverá clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone  localizado na barra de ferramentas, e em seguida escolher o nó adequado, e clicar novamente com o *botão esquerdo*. Caso o usuário desejar adicionar a condição de contorno ao clicar no nó, deve-se clicar no nó com o *botão direito do mouse* e para este caso escolher a opção “Oneway” (figura B.47).

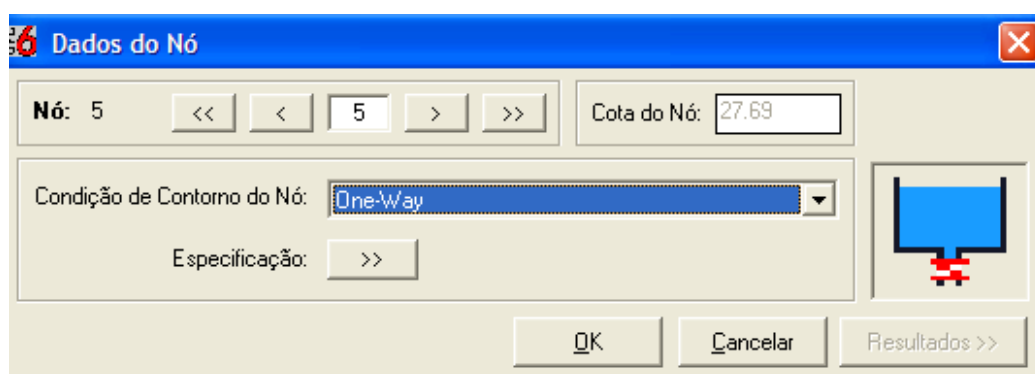



FIGURA B. 47 - Dados do Nó (One-Way)

Após adicionada a condição de contorno, o usuário deve clicar no *botão especificação*  (figura B.47) para inserir os dados de entrada (figura B.48).

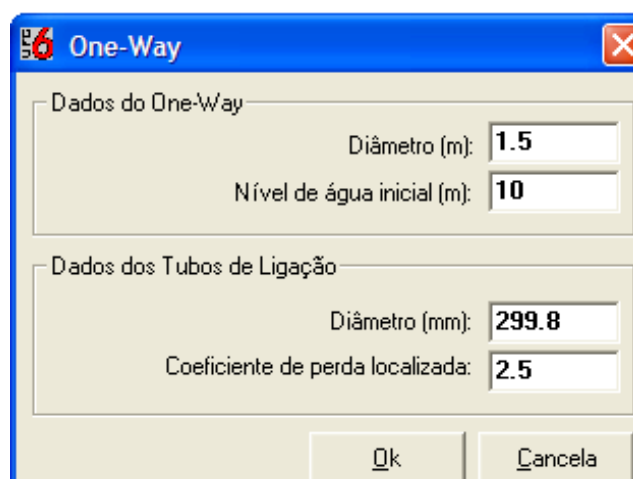



FIGURA B. 48 - Formulário One-Way

A tabela B.5 ilustra algumas considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 5 - Dados do TAU

<i>Dados do TAU</i>	<i>Considerações</i>
Diâmetro do TAU (m)	O programa considera um TAU de base cilíndrica;
Nível de água inicial (m)	Altura relativa à base do TAU;
Diâmetro dos tubos de ligação (mm)	Usualmente, para garantir o pleno funcionamento do dispositivo, os projetistas dimensionam dois tubos de ligação de diâmetros iguais. O usuário do UFC6 precisa apenas inserir o diâmetro de um dos tubos que o programa calculará o diâmetro equivalente dos dois tubos.
Coeficiente de perda de carga localizada	-

Após inserir os dados de entrada, o usuário deverá pressionar o botão executar  localizado na barra de ferramentas, em seguida, no formulário cálculo do transitório, o usuário deve pressionar o botão *OK*, esperar carregar 100% e pressionar o botão *Resultados*.

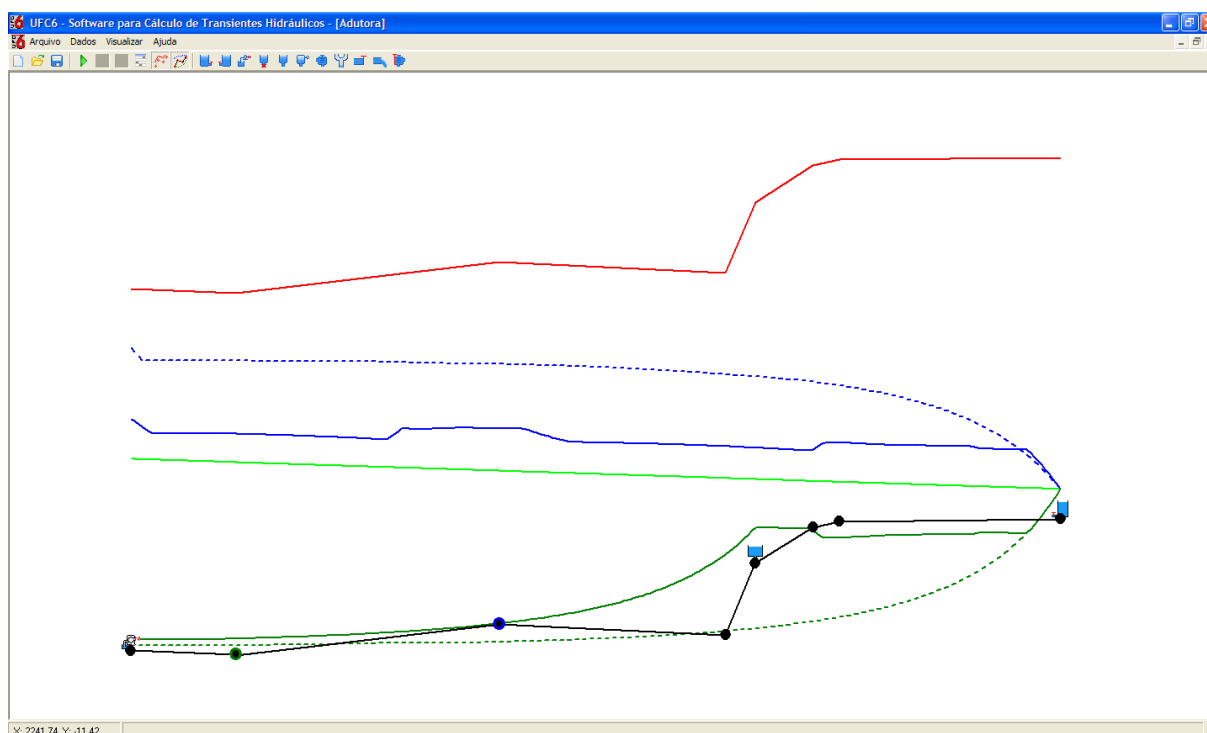


FIGURA B. 49 - Perfil calculado (One-Way)

O usuário tem a opção de visualizar os resultados dessa condição de contorno. Para isto, basta clicar com o *botão direito do mouse* nesse nó, e em seguida pressionar o *botão Resultados*.

FIGURA B. 50 - Formulário Dados do Nó (One-Way, Botão Resultados)

O gráfico a seguir, mostra a variação do nível de água em relação ao tempo de simulação. Para esta condição de contorno, o usuário pode escolher três opções de gráfico indicado por “Opções de gráfico” (figura B.51).

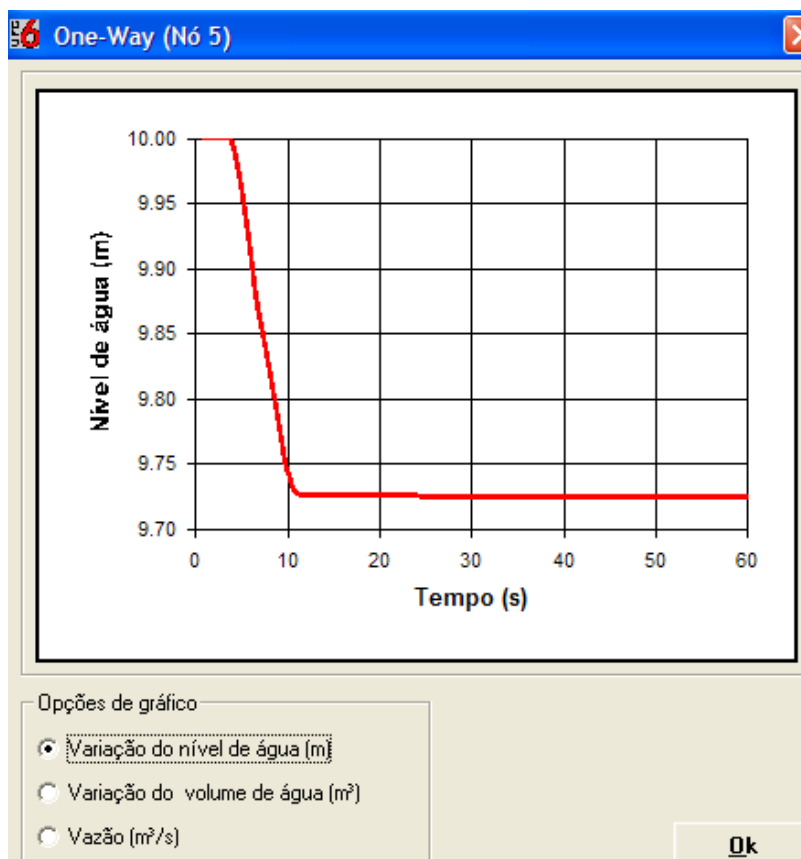



FIGURA B. 51 - Gráfico One-Way (variação do nível de água)

11.2. RESERVATÓRIO HIDROPNEUMÁTICO

Para adicionar essa condição de contorno, o usuário deverá clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone  localizado na barra de ferramentas, e em seguida escolher o nó adequado e clicar novamente com o *botão esquerdo*. Caso o usuário desejar adicionar a condição de contorno ao clicar no nó, deve-se clicar no nó com o *botão direito do mouse*, e para este caso escolher a opção “Res. Hidropneumático” (figura B.52).

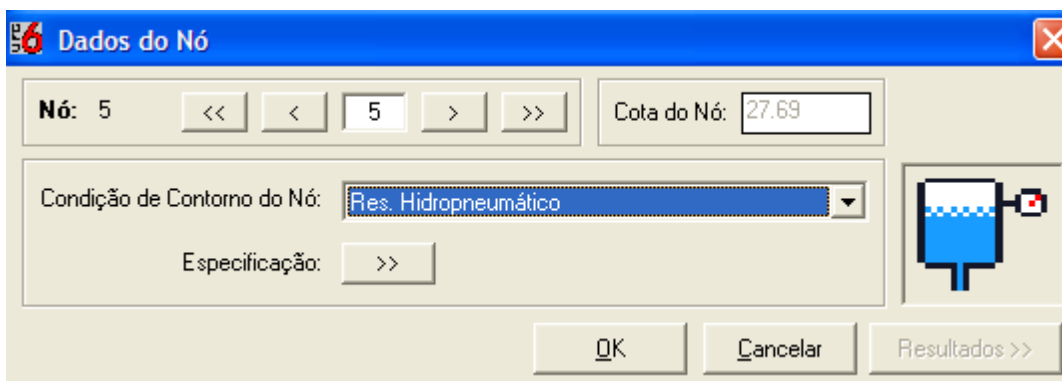


FIGURA B. 52 - Dados do Nó (Reservatório Hidropneumático)

Após adicionada a condição de contorno, o usuário deve clicar no *botão especificação*



(figura B.52), e inserir os dados de entrada (figura B.53).

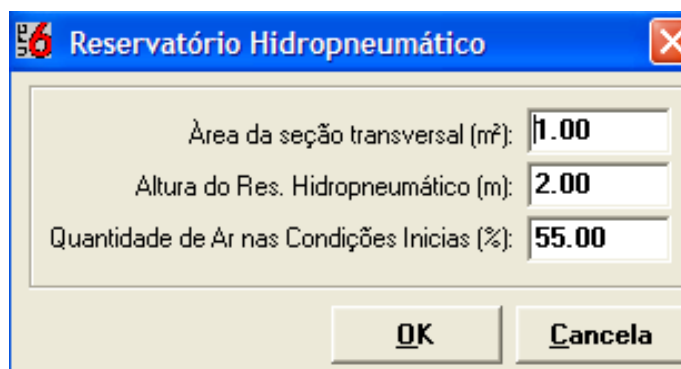



FIGURA B. 53 - Formulário Reservatório Hidropneumático

A tabela B.6 ilustra algumas considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 6 - Dados do Reservatório Hidropneumático

<i>Dados do Res. Hidropneumático</i>	<i>Considerações</i>
Área da base (m ²)	O programa considera um reservatório de base cilíndrica;
Altura (m)	Distância da base até a parte superior;
Quantidade de ar nas condições iniciais (%)	Porcentagem de volume de ar do reservatório hidropneumático nas condições iniciais (regime permanente).

Após inserir os dados de entrada, o usuário deverá pressionar o botão executar  localizado na barra de ferramentas, em seguida, no formulário *cálculo do transitório* o usuário deve pressionar o botão *OK*, esperar carregar 100% e pressionar o *botão Resultados*.

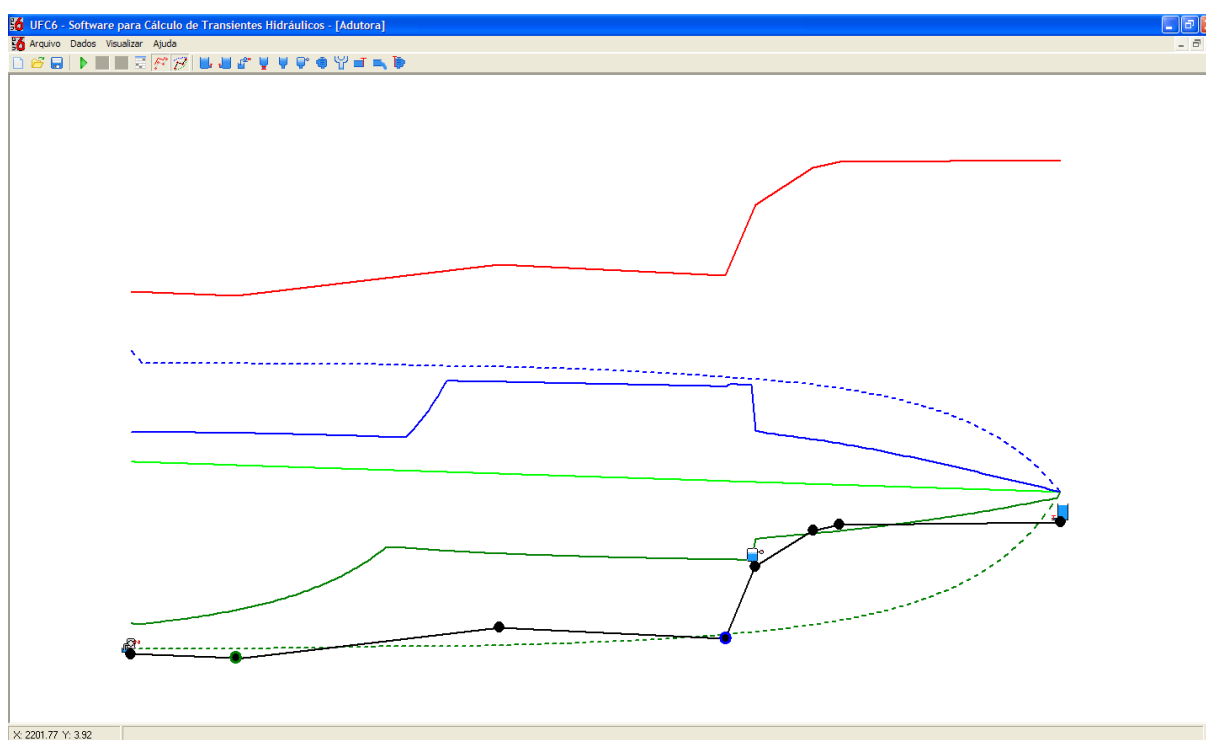


FIGURA B. 54 - Perfil calculado (Reservatório Hidropneumático)

O usuário tem a opção de visualizar os resultados dessa condição de contorno. Para isto, basta clicar com o *botão direito do mouse* nesse nó, e em seguida pressionar o botão *Resultados* (figura B.55).

FIGURA B. 55 - Formulário Dados do Nó (Reservatório Hidropneumático, Botão Resultados)

Nesse caso é gerado o gráfico a seguir:

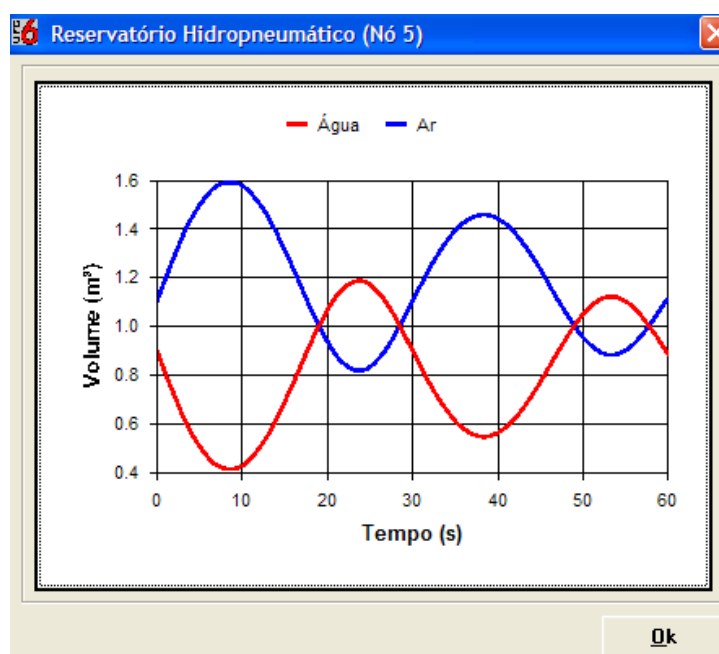


FIGURA B. 56 - Gráfico Reservatório Hidropneumático (volume de ar e água)

11.3. VÁLVULA DE ALÍVIO


Para adicionar essa condição de contorno, o usuário deverá clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone  localizado na barra de ferramentas, e em seguida escolher o nó adequado e clicar novamente com o *botão esquerdo*. Caso o usuário desejar adicionar a condição de contorno ao clicar no nó, deve-se clicar no nó com o *botão direito do mouse*, e para este caso, escolher a opção “Válvula de Alívio” (figura B.57).

FIGURA B. 57 - Dados do Nó (Válvula de Alívio)

Após adicionada a condição de contorno, o usuário deve clicar no botão especificação


>> (figura B.57), e em seguida inserir os dados de entrada (figura B.58).

FIGURA B. 58 - Formulário Válvula de Alívio

A tabela B.7 ilustra algumas considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 7 - Dados da Válvula de Alívio

<i>Dados da Válvula de Alívio</i>	<i>Considerações</i>
Coeficiente de descarga	Variação entre 0,5 e 0,6.
Área do orifício (cm ²)	-
Pressão de regulação da Válvula (mca)	Acima dessa pressão a válvula está aberta, abaixo dessa pressão a válvula está fechada.

Após inserir os dados de entrada, o usuário deverá pressionar o botão executar  localizado na barra de ferramentas, em seguida, no formulário cálculo do transitório o usuário deve pressionar o botão *OK*, esperar carregar 100% e pressionar o botão *Resultados*.

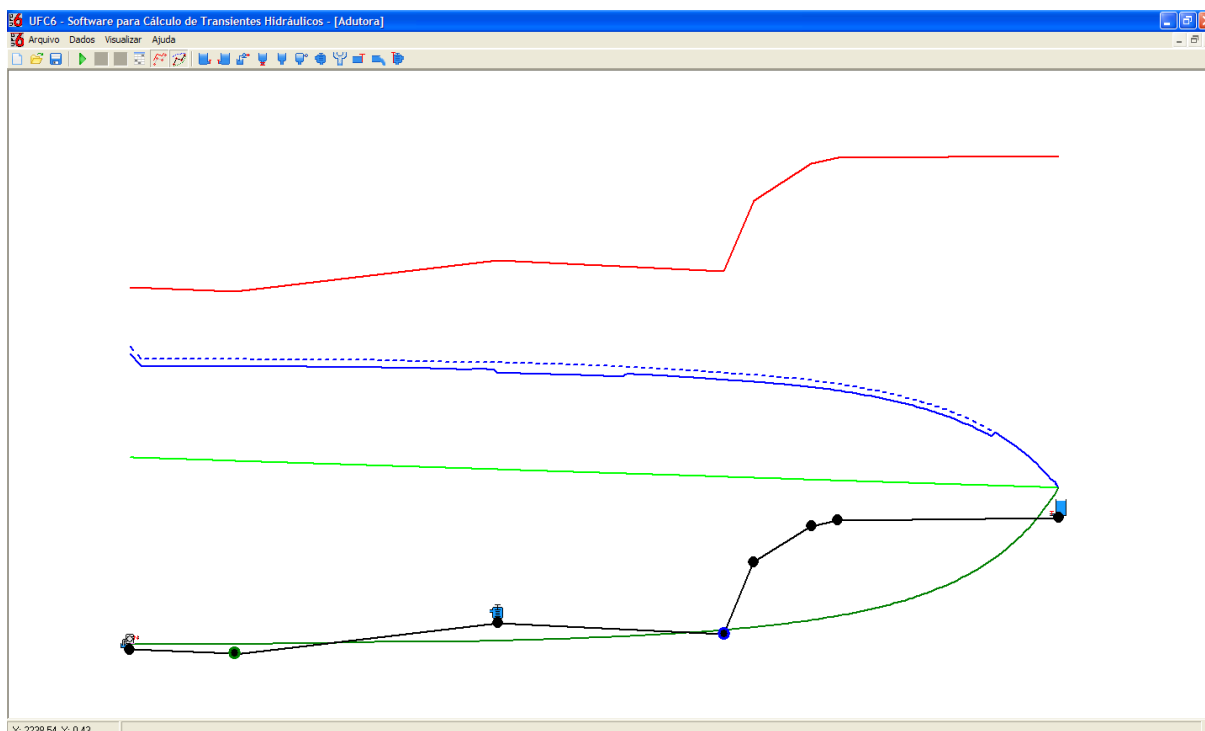


FIGURA B. 59 - Perfil calculado (Válvula de Alívio)

O usuário tem a opção de visualizar os resultados dessa condição de contorno. Para isto, basta clicar com o *botão direito do mouse* nesse nó, e em seguida pressionar o botão *Resultados* (figura B.60).

FIGURA B. 60 - Formulário Dados do Nó (Válvula de Alívio, Botão Resultados)

Nessa caso é gerado o gráfico a seguir:

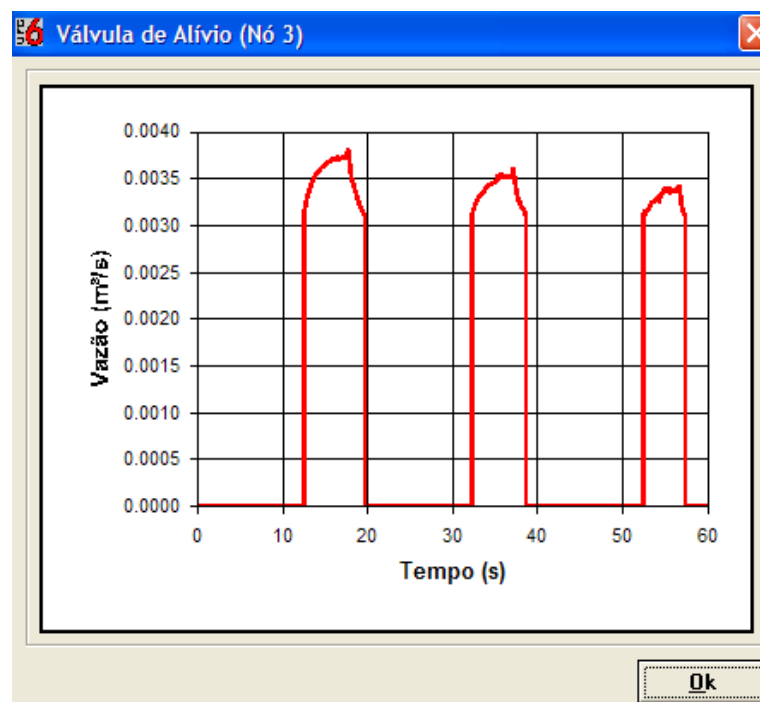



FIGURA B. 61 - Gráfico Válvula de Alívio (Vazão)

11.4. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Para adicionar essa condição de contorno, o usuário deverá clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone  localizado na barra de ferramentas, e em seguida escolher o nó adequado e clicar novamente com o *botão esquerdo*. Caso o usuário desejar adicionar a condição de contorno ao clicar no nó, deve-se clicar no nó com o *botão direito do mouse*, e para este caso, escolher a opção “Chaminé de Equilíbrio” (figura B.62).

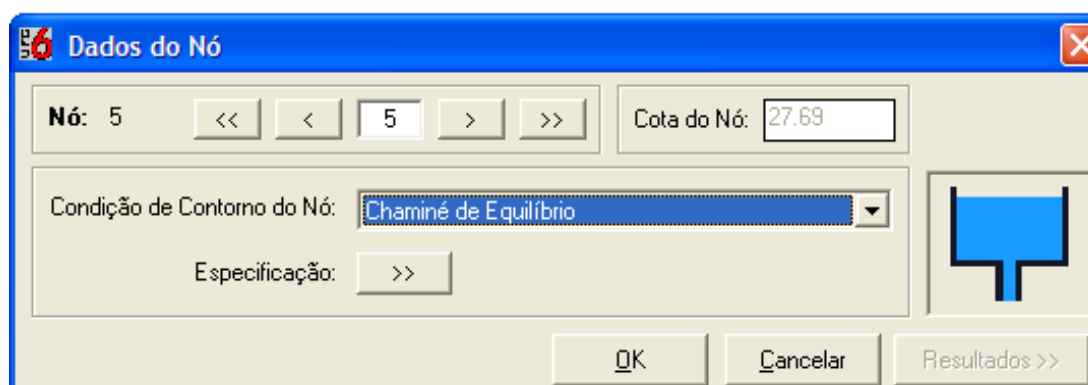


FIGURA B. 62 - Dados do Nó (Chaminé de Equilíbrio)


Após adicionada a condição de contorno, o usuário deve clicar no botão especificação >> (figura B.62) , e em seguida inserir os dados de entrada (figura B.63).

FIGURA B. 63 - Formulário Chaminé de Equilíbrio

A tabela B.8 ilustra algumas considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 8 - Dados da Chaminé de Equilíbrio

<i>Dados da Chaminé de Equilíbrio</i>	<i>Considerações</i>
Diâmetro da Chaminé de equilíbrio (m)	O programa considera um diâmetro de base cilíndrica;
Nível de água inicial (m)	Altura relativa à base da chaminé;
Diâmetro dos tubos de ligação (mm)	-
Coeficiente de perda de carga localizada	-

Após inserir os dados de entrada, o usuário deverá pressionar o botão executar  localizado na barra de ferramentas, em seguida, no formulário cálculo do transitório o usuário deve pressionar o botão *OK*, esperar carregar 100% e então pressionar o botão *Resultados*.

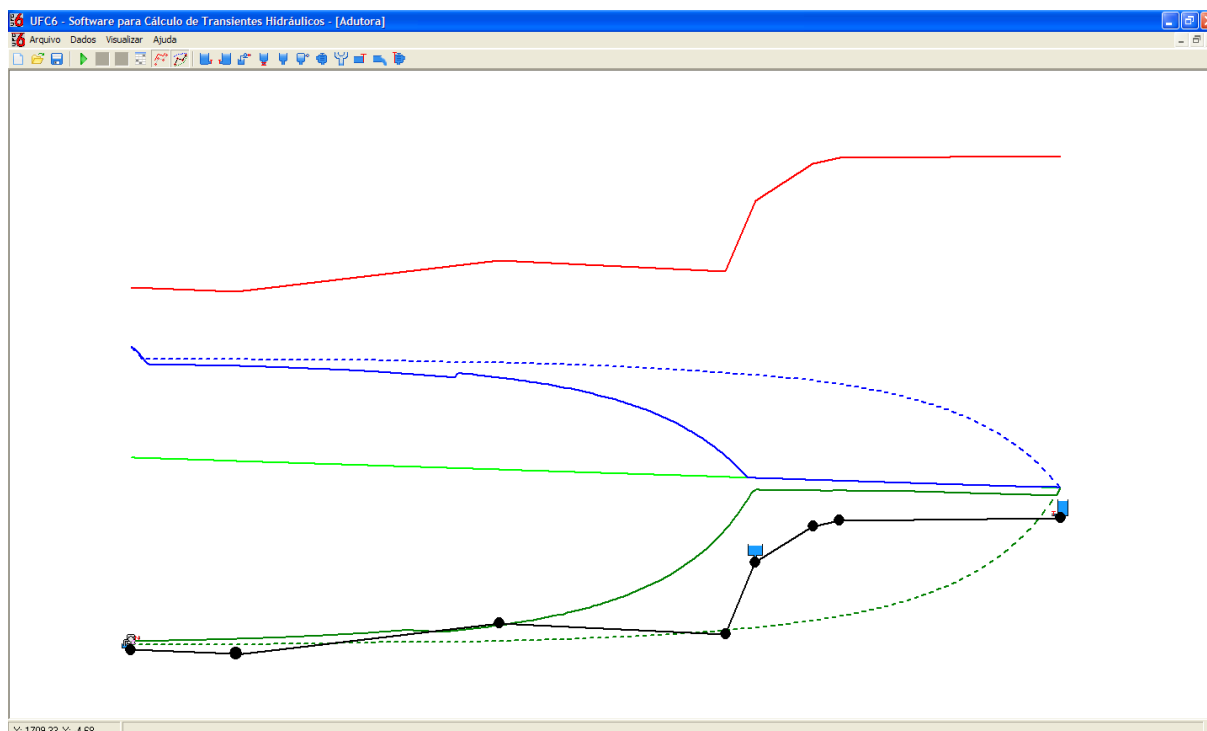


FIGURA B. 64 - Perfil calculado (Chaminé de Equilíbrio)

O usuário tem a opção de visualizar os resultados dessa condição de contorno. Para isto, basta clicar com o *botão direito do mouse* nesse nó, e em seguida pressionar o botão *Resultados* (figura B.65).

FIGURA B. 65 - Formulário Dados do Nó (Chaminé de Equilíbrio, Botão Resultados)

Para esse caso é gerado o gráfico a seguir, e o usuário tem três opções de gráficos.

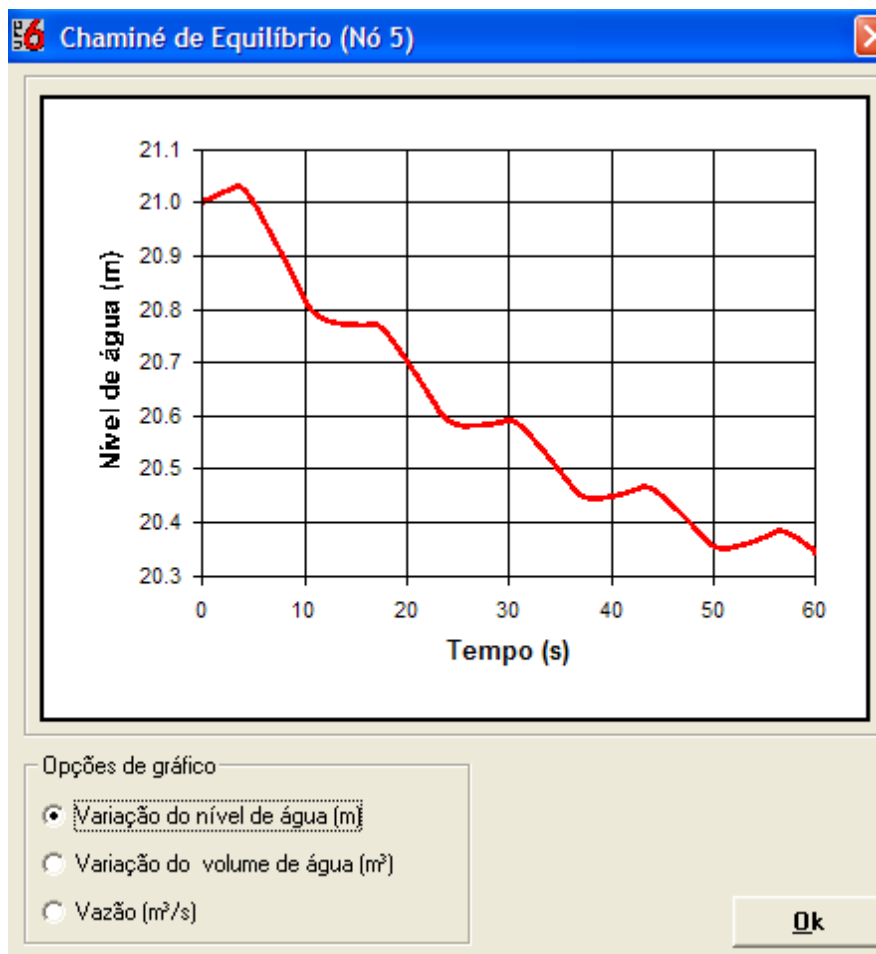


FIGURA B. 66 - Gráfico da Chaminé de Equilíbrio (Variação do nível de água)

11.5. VENTOSA


Para adicionar essa condição de contorno, o usuário deverá clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone  localizado na barra de ferramentas, e em seguida escolher o nó adequado, e clicar novamente com o *botão esquerdo*. Caso o usuário desejar adicionar a condição de contorno ao clicar no nó, deve-se clicar no nó com o botão direito do mouse e para este caso escolher a opção “Ventosa” (figura B.67).

FIGURA B. 67 - Dados do Nó (Ventosa)

Após adicionada a condição de contorno, o usuário deve clicar no *botão especificação*

>>


(figura B.67) e então inserir os dados de entrada (figura B.68).

FIGURA B. 68 - Formulário Ventosa

A tabela B.9 ilustra algumas considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 9 - Dados da Ventosa

<i>Dados da Ventosa</i>	<i>Considerações</i>
Altura barométrica (m)	-
Coefficiente de descarga da entrada	-
Coefficiente de descarga da saída	-
Área do orifício (cm ²)	-
Tempo de abertura (s)	Visível para o tipo de ventosa VADE [real]
Tempo de fechamento (s)	Visível para o tipo de ventosa VADE [real]
Temperatura interna	-
Temperatura externa	-

Após inserir os dados de entrada, o usuário deverá pressionar o botão executar  localizado na barra de ferramentas, em seguida, no formulário *cálculo do transitório*, o usuário deve pressionar o botão *OK*, esperar carregar 100%, e então pressionar o botão *Resultados*.

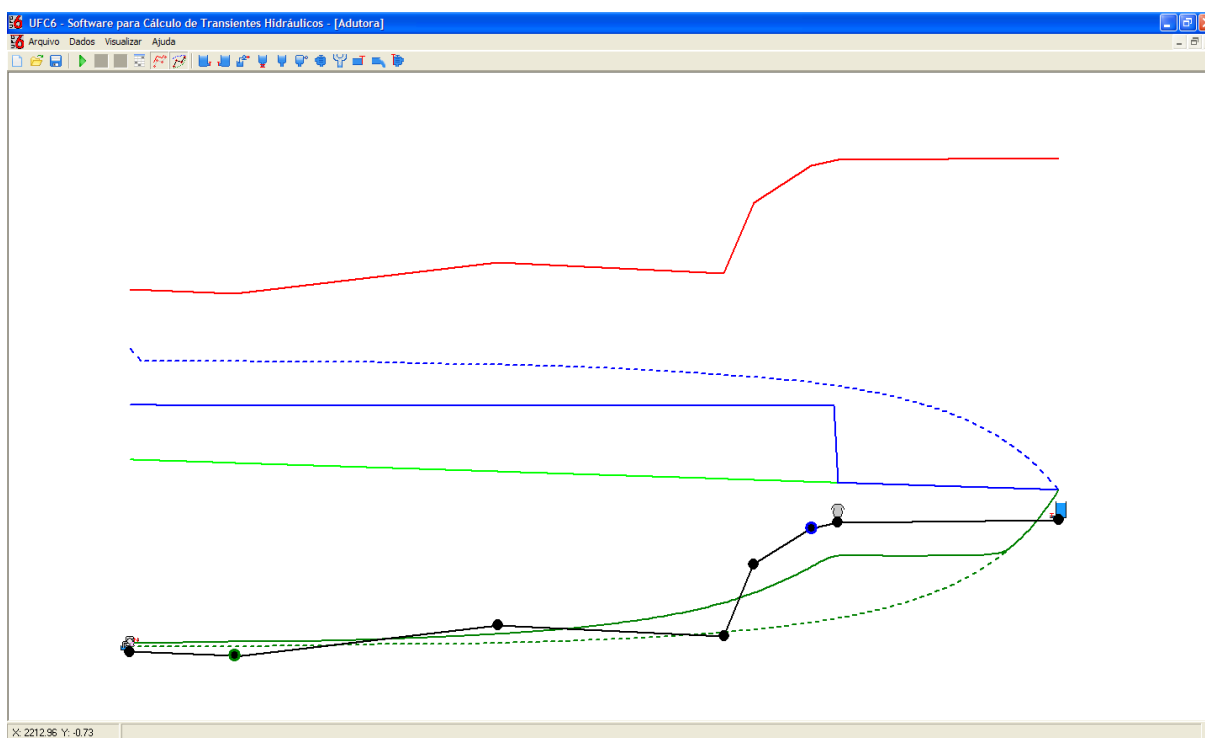



FIGURA B. 69 - Perfil calculado (Ventosa)

11.6. VÁLVULA ANTECIPADORA DE ONDA

Para adicionar essa condição de contorno, o usuário deverá clicar com o *botão esquerdo do mouse* no ícone  localizado na barra de ferramentas, e em seguida escolher o nó adequado, e clicar novamente com o *botão esquerdo*. Caso o usuário desejar adicionar a condição de contorno ao clicar no nó, deve-se clicar no nó com o *botão direito do mouse* e para este caso escolher a opção “Válvula Ant. de Onda” (figura B.70).

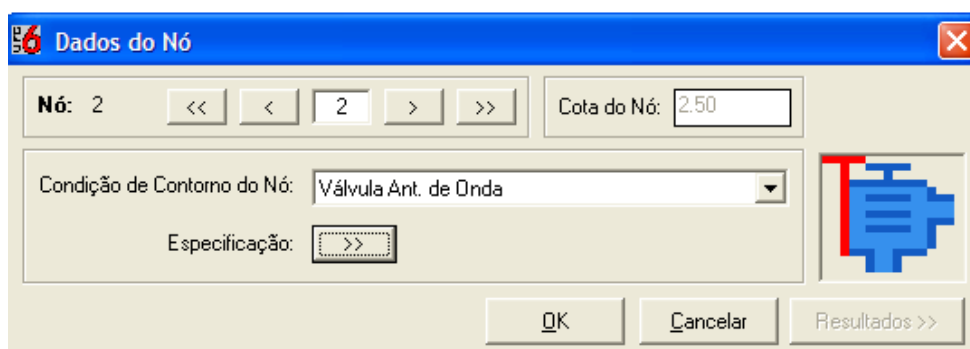



FIGURA B. 70 - Dados do Nó (Válvula Antecipadora de Onda)

Após adicionada a condição de contorno, o usuário deve clicar no *botão especificação*  (figura B.70), e então inserir os dados de entrada (figura B.71).

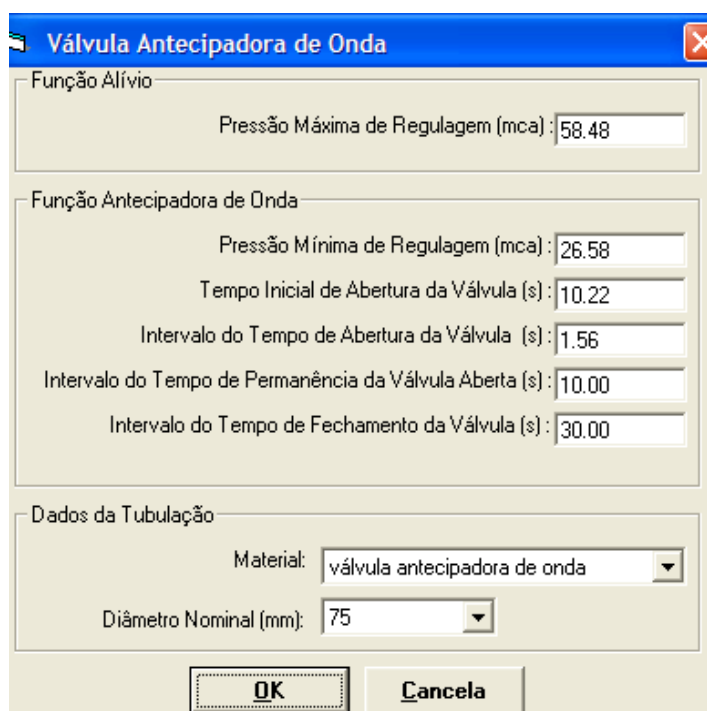



FIGURA B. 71 - Formulário Válvula Antecipadora de Onda

A tabela B.10 ilustra algumas considerações para os dados de entrada dessa condição de contorno.

TABELA B. 10 - dados da VAO

<i>Dados da Válvula antecipadora de onda</i>	<i>Considerações</i>
Pressão máxima de regulação	Regula a abertura quando a pressão exceder o valor da pressão máxima de regulação, e serve como parâmetro para o cálculo do tempo de abertura da válvula.
Pressão mínima de regulação	Regula o início da abertura da válvula
Tempo Inicial de abertura da válvula	A válvula inicia a sua abertura
Intervalo do Tempo de abertura da válvula	Período de tempo de abertura da válvula
Intervalo do Tempo de permanência da válvula aberta	Período de tempo da condição da válvula completamente aberta
Intervalo do Tempo de fechamento da válvula	Período de tempo de fechamento da válvula
Diâmetro nominal	Diâmetro comercial da válvula

Após inserir os dados de entrada, o usuário deverá pressionar o botão executar  localizada na barra de ferramentas, em seguida no formulário *cálculo do transitório* o usuário deve pressionar o botão *OK*, esperar carregar 100% e pressionar o botão *Resultados*.

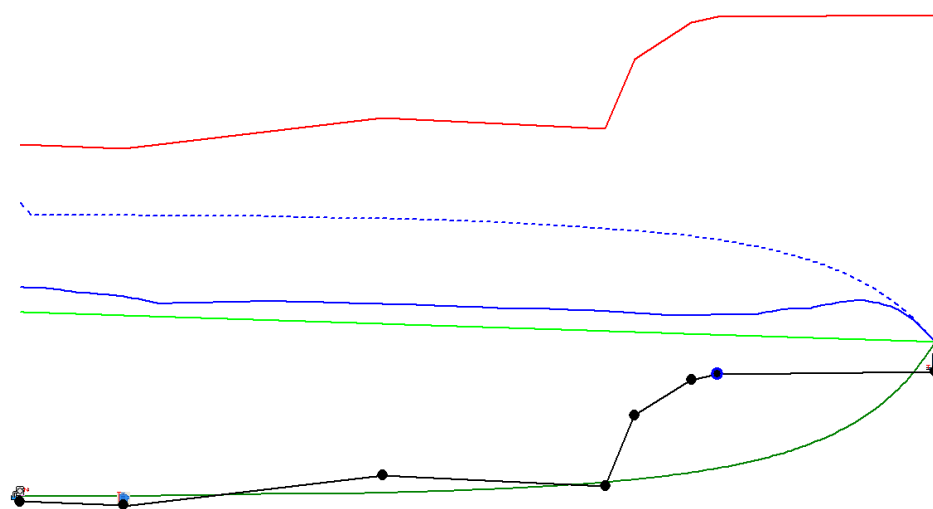


FIGURA B. 72 - Perfil calculado (Válvula Antecipadora de Onda)

O usuário tem a opção de visualizar os resultados dessa condição de contorno. Para isto, basta clicar com o *botão direito do mouse* nesse nó, e em seguida pressionar o botão *Resultados* (figura B.73).

FIGURA B. 73 - Formulário Dados do Nó (VAO, Botão Resultados)

Para esse caso é gerado o gráfico a seguir, e o usuário tem quatro opções de gráficos.

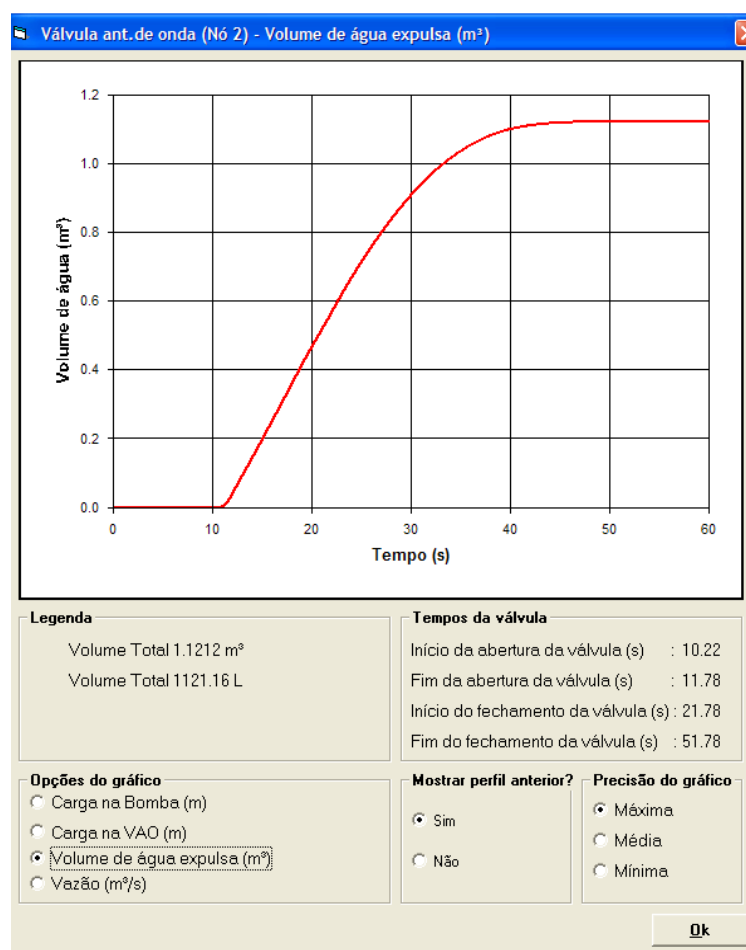


FIGURA B. 74 - Gráfico da Válvula Antecipadora de Onda (volume de água expulsa)

12. MENU ARQUIVO

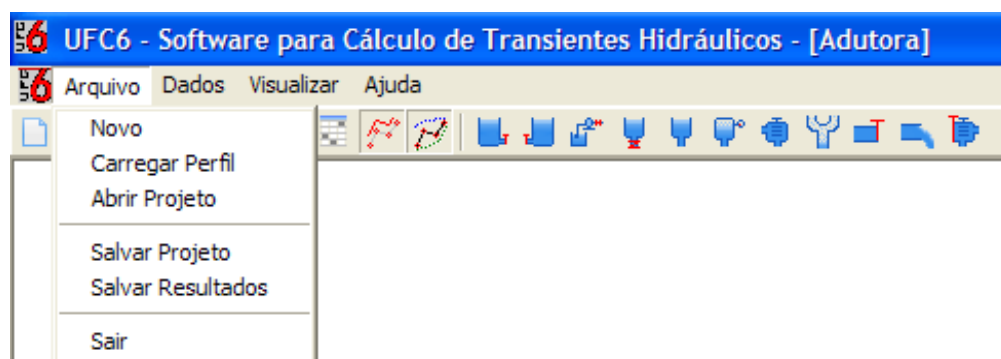


FIGURA B. 75 - Menu Arquivo

12.1. NOVO

Para abrir um projeto em branco vá ao menu *arquivo>Novo*.

12.2. CARREGAR PERFIL

Através do menu *Arquivo>Carregar Perfil*, o usuário pode acessar o formulário *Carregar Perfil*, devendo entrar com os dados necessários para o traçado do perfil da adutora (figura B.76).

Trecho	Cota Mont.(m)	Cota Jus.(m)	Comp.(m)	Diâm.(mm)
1	3.61	2.50	200.00	300
2	2.50	11.00	500.00	300
3	11.00	8.00	430.00	300
4	8.00	27.69	60.00	300
5	27.69	37.80	110.00	300
6	37.80	39.35	50.00	300
7	39.35	40.00	420.00	300

FIGURA B. 76 - formulário Carregar Perfil

12.3. ABRIR PROJETO

Para abrir um projeto vá ao menu *arquivo>Abrir Projeto* e em seguida vá ao diretório “C:\UFC\UFC6\Arquivos de Dados de Entrada” e escolha o arquivo de entrada.

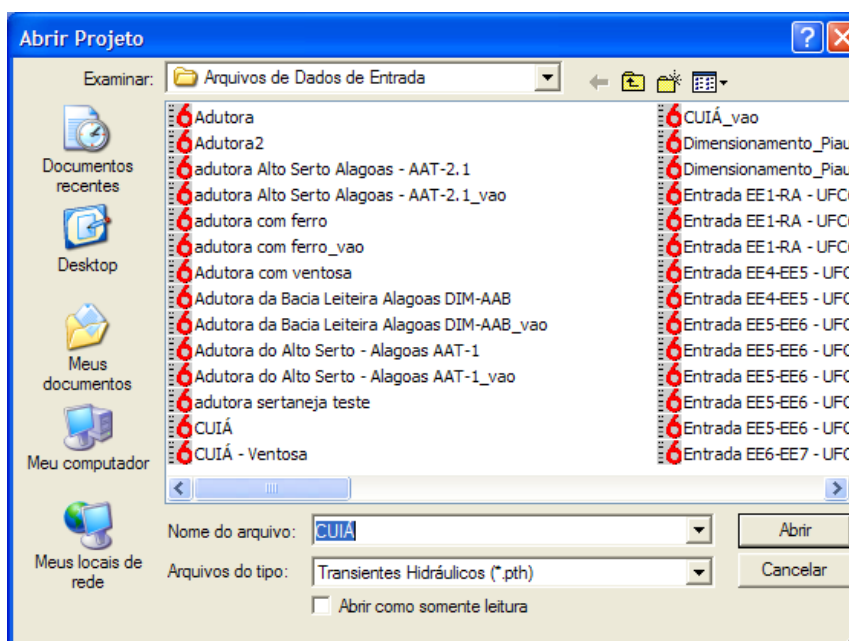


FIGURA B. 77 - Abrir Projeto

12.4. SALVAR PROJETO

Após executar o procedimento de entrada manual de dados, o usuário poderá salvar o projeto acessando o menu *Arquivo>Salvar Projeto*. O Programa irá salvar os dados do projeto em um arquivo no formato *Transientes Hidráulicos (*.pth)* cujo nome será dado pelo usuário, e servirá para a posterior entrada automática de dados (figura B.78).

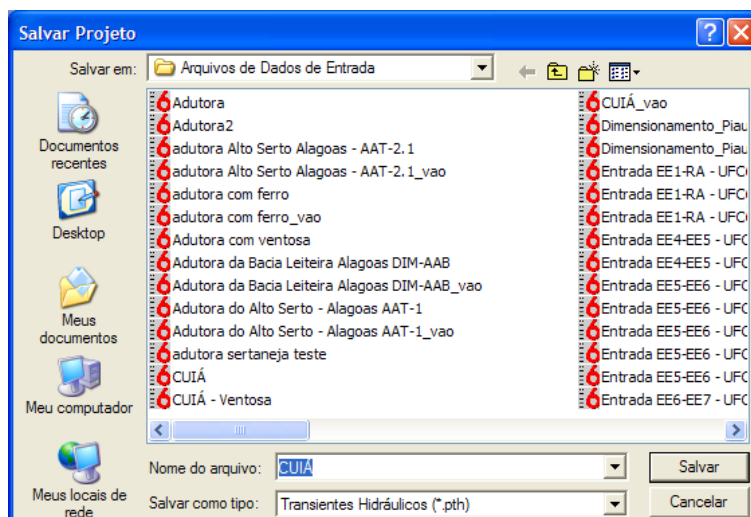


FIGURA B. 78 - Salvar Projeto

12.5. SALVAR RESULTADOS

Após executar o procedimento de entrada manual de dados e execução do cálculo transiente, o usuário poderá salvar os resultados gerados pelo projeto, acessando o menu *Arquivo>Salvar Resultados*. O Programa irá salvar os resultados do projeto em um arquivo no formato no formato (*.txt) cujo nome será dado pelo usuário (figura B.79).

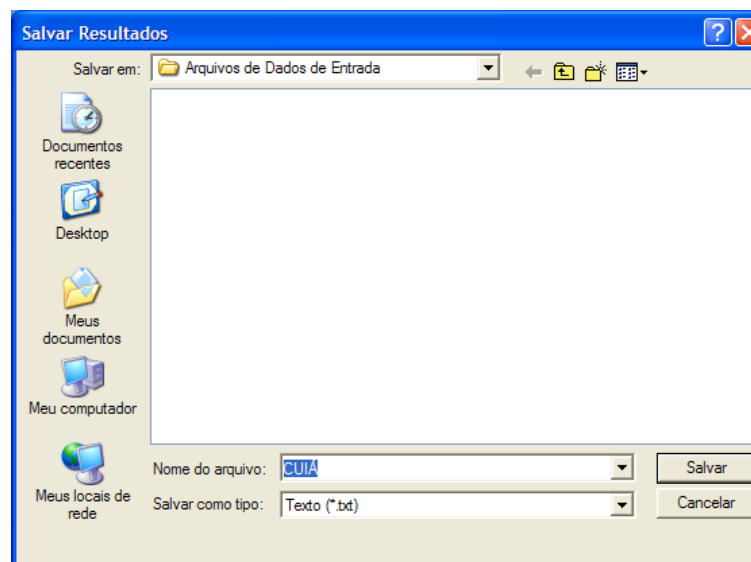


FIGURA B. 79 - Salvar Resultados

12.6. SAIR

Para Encerra o programa o usuário deve ir ao menu *Arquivo>Sair*.

13. MENU DADOS

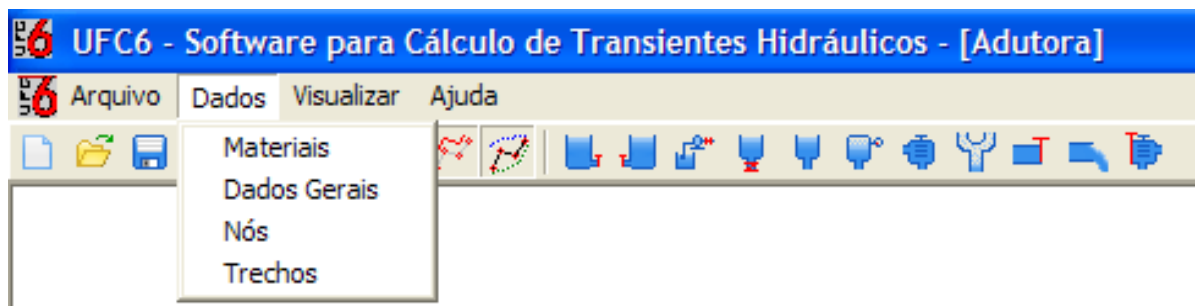


FIGURA B. 80 - Menu Dados

13.1. DADOS GERAIS

Através do menu *Dados>Dados Gerais*, o usuário pode acessar o formulário *Parâmetros do Projeto*, devendo entrar com os dados necessários para o cálculo do transiente. Tais dados são: Nome do projeto, descrição do projeto (se necessário), tempo de duração da simulação (s), número de divisões do menor trecho, módulo de elasticidade volumétrica do fluido (GPa), densidade do fluido (kg/m^3), Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

Os valores referentes aos três últimos parâmetros correspondem ao fluido verificado. O UFC6 utiliza água como fluido padrão.

 A screenshot of the 'Parâmetros do Projeto' dialog box. The dialog has two tabs: 'Dados do Projeto' and 'Parâmetros do Projeto', with the latter being active. It contains five input fields with their respective labels and values:

Label	Value
Tempo de duração da simulação (s):	60
Nº Divisões do menor trecho:	8
Módulo de Elasticidade Volumétrica do Fluido (Gpa):	2.19
Densidade do Fluido (kg/m^3):	1000.00
Viscosidade Cinemática do Fluido (m^2/s):	0.000001

 At the bottom of the dialog are 'OK' and 'Cancela' buttons.

FIGURA B. 81- Formulário Parâmetros do Projeto (Parâmetros do Projeto)

The screenshot shows a Windows-style dialog box titled 'Parâmetros do Projeto'. It has two tabs: 'Dados do Projeto' (selected) and 'Parâmetros do Projeto'. Under the 'Dados do Projeto' tab, there are two text input fields: 'Nome do Projeto:' and 'Descrição do Projeto:'. The 'Descrição do Projeto:' field has a small vertical scrollbar on its right side. At the bottom right of the dialog are two buttons: 'OK' and 'Cancela'.

FIGURA B. 82 - Formulário Parâmetros do Projeto (Dados do Projeto)

Como o método utiliza o mesmo intervalo de tempo computacional para todos os trechos do sistema, deve-se escolher um trecho (no caso o de menor comprimento) para se padronizar esse intervalo de tempo. Assim, o programa necessita saber em quantos segmentos o menor trecho será dividido. O programa calcula então o intervalo de tempo computacional entre as seções desse trecho e assume igual para os demais trechos do sistema. Para isso, o programa ajusta o valor da celeridade de onda fazendo pequenas alterações em seus valores.

13.2. NÓS

O usuário pode acessar qualquer nó da adutora através do menu *Dados>Nós*. Ou com o *botão direito do mouse* clicar no nó desejado. O formulário dados do nó tem o seguinte formato:

The screenshot shows a Windows-style dialog box titled 'Dados do Nó'. It contains several controls: a label 'Nó: 1' followed by navigation buttons '<<', '<', '1', '>', and '>>'; a text field 'Cota do Nó:' with the value '3.61'; a dropdown menu 'Condição de Contorno do Nó:' with the selected option 'Res. Mont. Bomba e Val. de Retenção'; and a button 'Especificação:' with '>>' next to it. On the right side, there is a small icon of a pump or valve. At the bottom are three buttons: 'OK', 'Cancelar', and 'Resultados >>'.

FIGURA B. 83 - Formulário Dados do Nó

13.2.1. Navegação nos Nós

Nessa versão o usuário tem a opção de navegar pelos nós da adutora. Para isso, basta o usuário seguir a nomenclatura adotada pelo programa (figura B.84).



FIGURA B. 84 - Navegação no Nó

Onde:

Nó: 1 Indica a numeração do nó da adutora

<< Retrocede para o primeiro nó

>> Avança para o último nó

< Volta 1 nó

> Avança 1 nó

13.3. TRECHOS

O usuário pode acessar qualquer trecho da adutora através do menu *Dados>Trechos*. Ou com o botão *direito do mouse* clicar no trecho desejado. O formulário dados do trecho tem o seguinte formato:

Dados do Trecho	
Trecho N°: 1	Comprimento (m): 200.00
Material: PVC DEFoFo	Diâmetro (m): 0.300
Condições de Assentamento: Ancorado contra mov. longitudinal	Espessura (m): 0.0131
Diâmetro Nominat: 300	Rugosidade (mm): 0.00150
<input type="checkbox"/> Especificar Rugosidade (Darcy-Weisbach)	Módulo de Elasticidade (GPa): 3.00
Rugosidade (mm): 0.001500	Coef. de Poisson: 0.38
<input type="checkbox"/> Especificar Celeridade	Pressão de serviço (mca): 100
Celeridade de Onda (m/s): 362.02	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	

FIGURA B. 85 - Formulário Dados do Trecho

13.3.1. Navegação nos trechos

Nessa versão o usuário tem a opção de navegar pelos trechos da adutora. Para isso, basta o usuário seguir a nomenclatura adotada pelo programa (figura B.86).



FIGURA B. 86 - Navegação nos Trechos

Onde:

Indica a numeração do trecho da adutora

Retrocede para o primeiro trecho

Avança para o último trecho

Volta 1 trecho

Avança 1 trecho

14. MENU VISUALIZAR

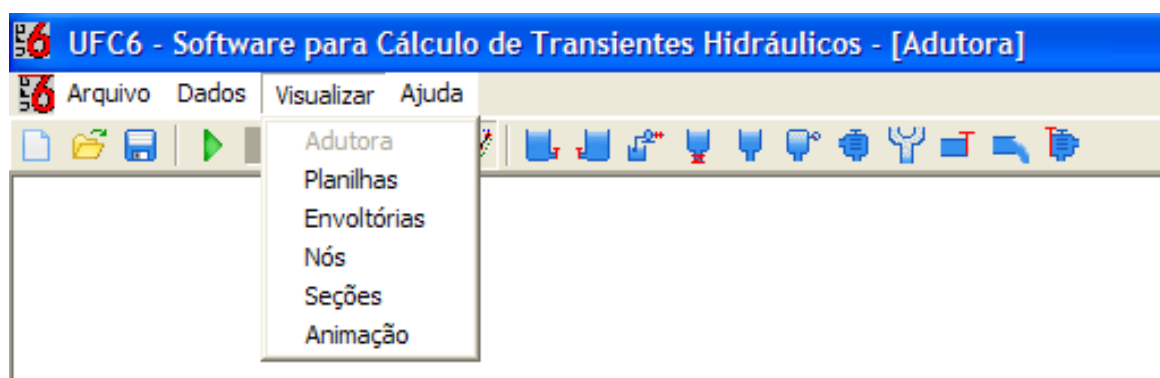


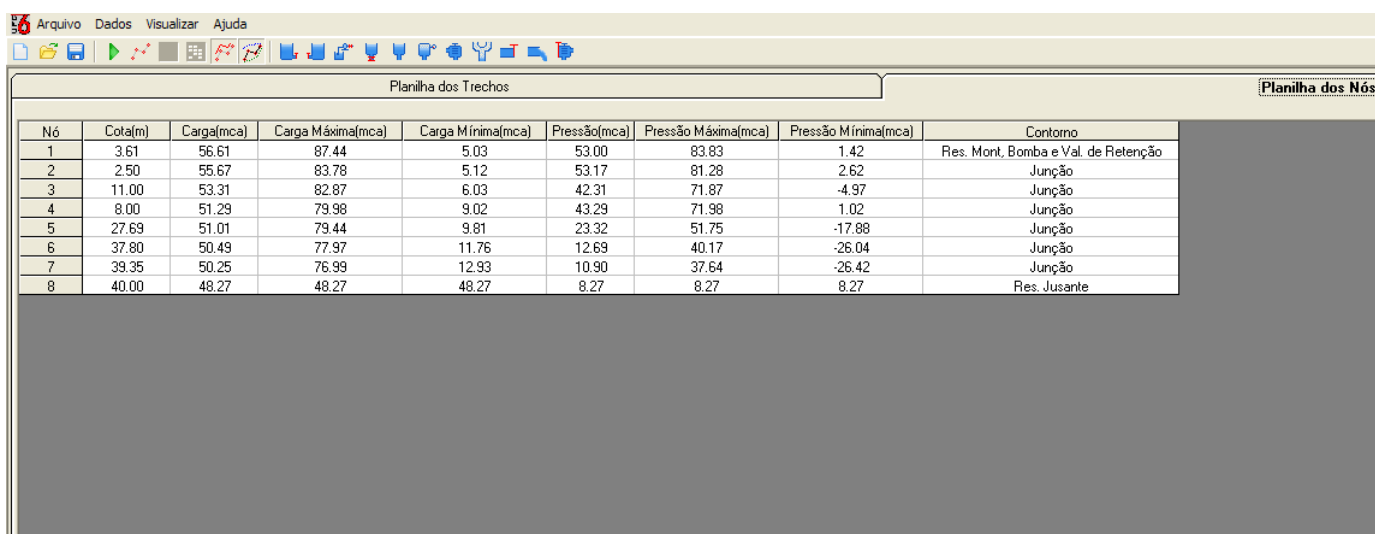


FIGURA B. 87 - Menu Visualizar

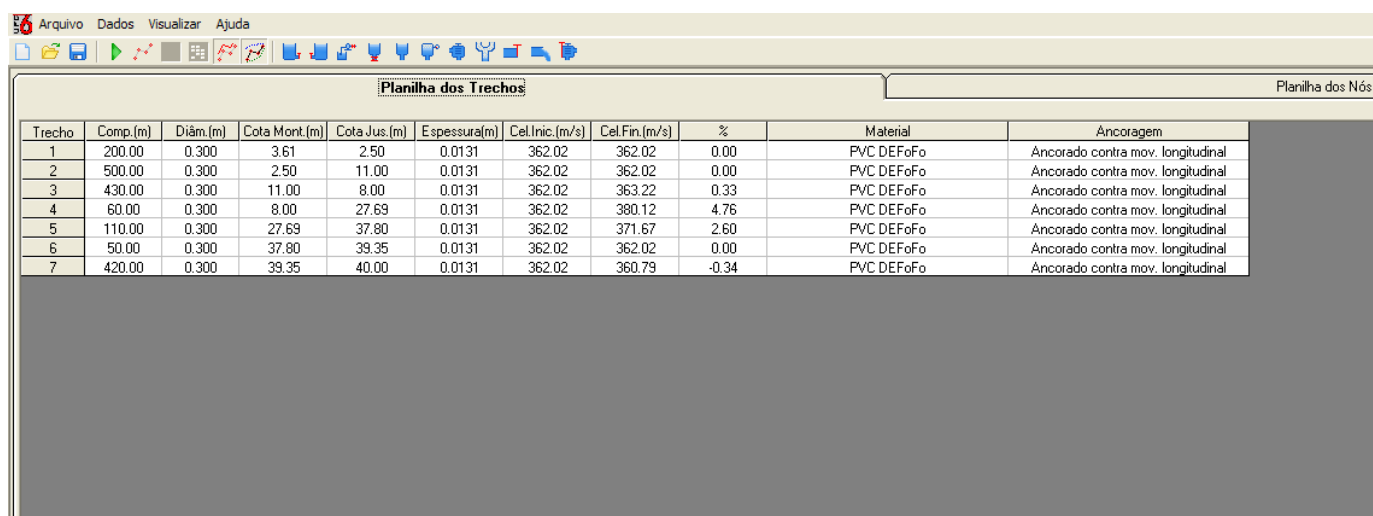
14.1. PLANILHAS

Através do menu *Visualizar>Planilhas* ou do ícone *Planilha*  da *barra de ferramentas*, o usuário pode verificar o resumo de cálculo por trecho e por nó, bastando clicar na guia superior de cada planilha. Para voltar a visualizar a adutora basta clicar no ícone *adutora*  localizado na *barra de ferramentas*.



Nó	Cota(m)	Carga(mca)	Carga Máxima(mca)	Carga Mínima(mca)	Pressão(mca)	Pressão Máxima(mca)	Pressão Mínima(mca)	Contorno
1	3.61	56.61	87.44	5.03	53.00	83.83	1.42	Res. Mont. Bomba e Val. de Retenção
2	2.50	55.67	83.78	5.12	53.17	81.28	2.62	Junção
3	11.00	53.31	82.87	6.03	42.31	71.87	-4.97	Junção
4	8.00	51.29	79.98	9.02	43.29	71.98	1.02	Junção
5	27.69	51.01	79.44	9.81	23.32	51.75	-17.88	Junção
6	37.80	50.49	77.97	11.76	12.69	40.17	-26.04	Junção
7	39.35	50.25	76.99	12.93	10.90	37.64	-26.42	Junção
8	40.00	48.27	48.27	48.27	8.27	8.27	8.27	Res. Jusante

FIGURA B. 88 - Formulário Planilhas (Nó)



Trecho	Comp.(m)	Diâm.(m)	Cota Mont.(m)	Cota Jus.(m)	Espessura(m)	Cel.Inic.(m/s)	Cel.Fin.(m/s)	%	Material	Ancoragem
1	200.00	0.300	3.61	2.50	0.0131	362.02	362.02	0.00	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal
2	500.00	0.300	2.50	11.00	0.0131	362.02	362.02	0.00	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal
3	430.00	0.300	11.00	8.00	0.0131	362.02	363.22	0.33	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal
4	60.00	0.300	8.00	27.69	0.0131	362.02	380.12	4.76	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal
5	110.00	0.300	27.69	37.80	0.0131	362.02	371.67	2.60	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal
6	50.00	0.300	37.80	39.35	0.0131	362.02	362.02	0.00	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal
7	420.00	0.300	39.35	40.00	0.0131	362.02	360.79	-0.34	PVC DEFoFo	Ancorado contra mov. longitudinal

FIGURA B. 89 - Formulário Planilhas (trecho)

14.2. ENVOLTÓRIAS

Acessando o menu *Visualizar>Envoltórias*, o programa fornece também a carga piezométrica máxima e mínima em toda a adutora durante o transiente hidráulico. Sendo representado pelo gráfico da cota piezométrica em função da distância horizontal.

Caso o usuário simular o transiente hidráulico, e em seguida visualizar as envoltórias para o exemplo da simulação Cuiá, o gráfico gerado será o seguinte:

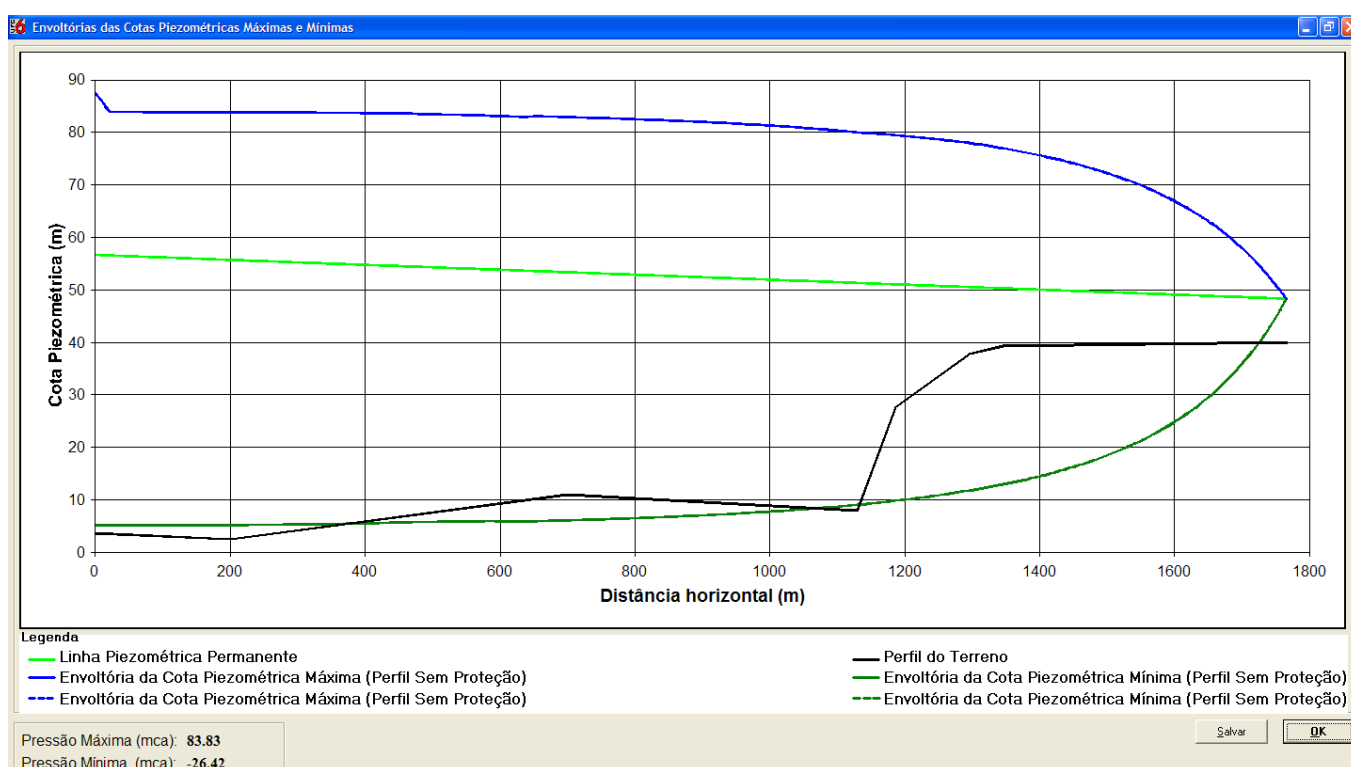


FIGURA B. 90 - Formulário Envoltórias (Sem mecanismo de proteção)

Caso o usuário instalar a Válvula Antecipadora de Onda (que deve ser instalada no segundo nó) e então executar os cálculos, no gráfico da figura B.91, pode-se observar que a envoltória anterior (nesse caso sem mecanismo de proteção) será representada pela linha pontilhada e a envoltória atual será representada pela linha cheia.

Para a análise de mecanismos de atenuação do golpe de aríete é muito importante à comparação entre as envoltórias sem e com proteção. Desse modo, o usuário poderá visualizar o efeito do alívio de pressão na adutora considerada.

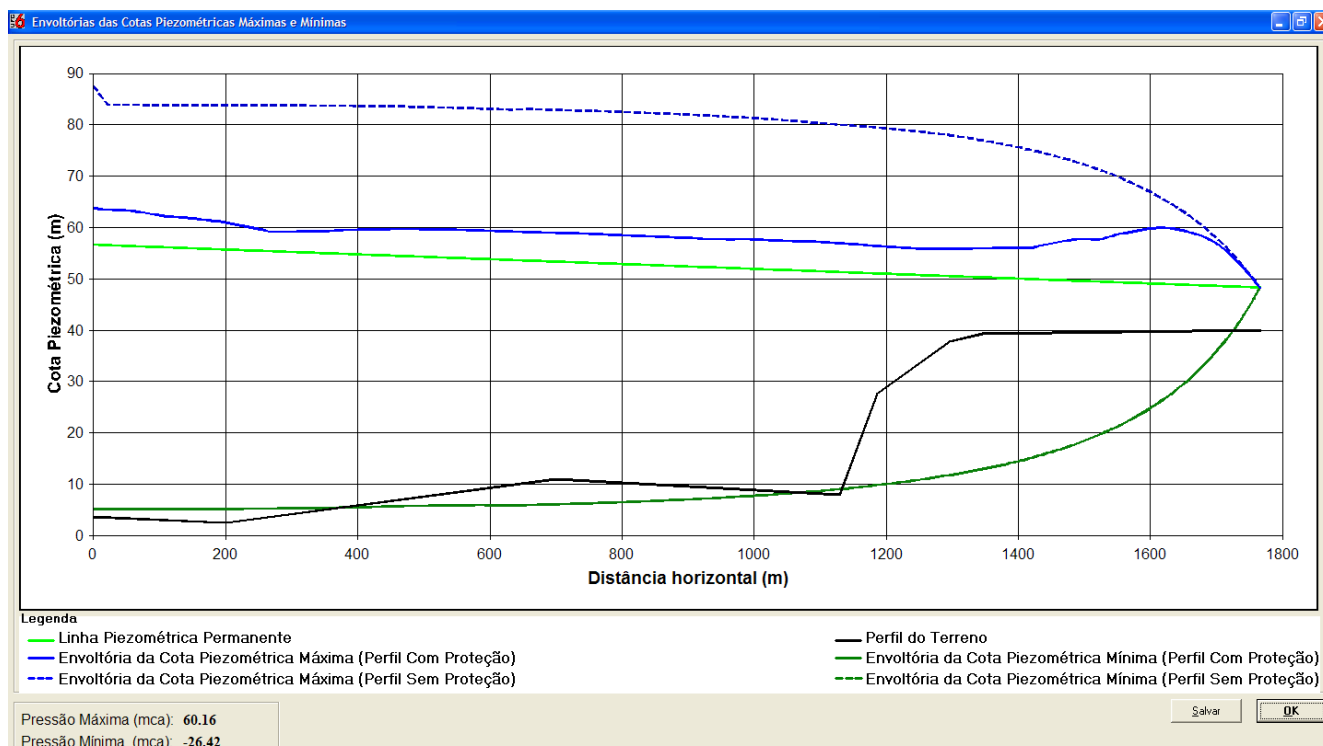


FIGURA B. 91 - Formulário Envoltórias (Com mecanismo de proteção)

14.2.1. Salvar Resultados das Envoltórias

O usuário tem a opção de salvar os resultados para a envoltória atual, para isso, basta apertar o botão **Salvar** localizado no canto inferior direito do formulário “Envoltórias das Cotas Piezométricas Máximas e Mínimas”. Em seguida, salve o arquivo no formato (*.txt) no diretório desejado.

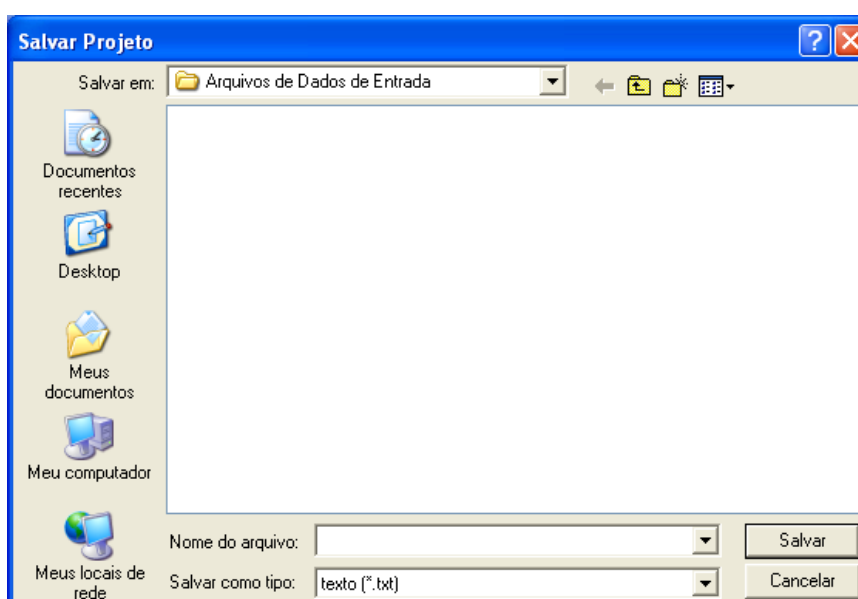
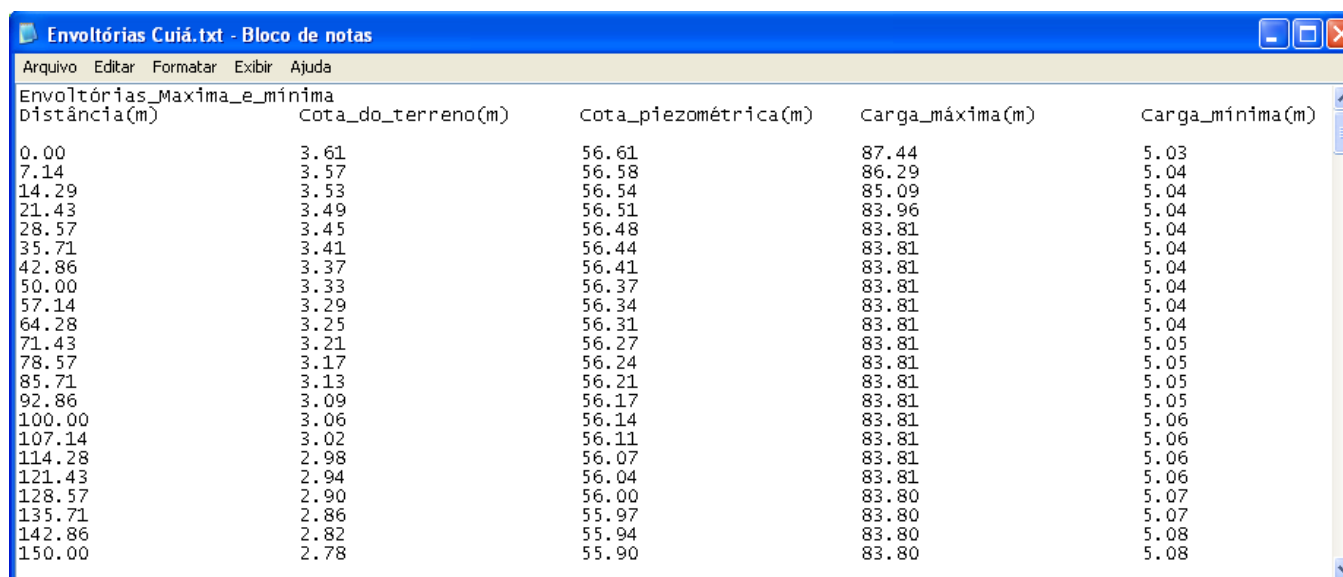


FIGURA B. 92 - Abrir Projeto

O arquivo (*.txt) gerado terá o seguinte formato:



Envoltórias_Maxima_e_mínima Distância(m)	Cota_do_terreno(m)	Cota_piezométrica(m)	Carga_máxima(m)	Carga_mínima(m)
0.00	3.61	56.61	87.44	5.03
7.14	3.57	56.58	86.29	5.04
14.29	3.53	56.54	85.09	5.04
21.43	3.49	56.51	83.96	5.04
28.57	3.45	56.48	83.81	5.04
35.71	3.41	56.44	83.81	5.04
42.86	3.37	56.41	83.81	5.04
50.00	3.33	56.37	83.81	5.04
57.14	3.29	56.34	83.81	5.04
64.28	3.25	56.31	83.81	5.04
71.43	3.21	56.27	83.81	5.05
78.57	3.17	56.24	83.81	5.05
85.71	3.13	56.21	83.81	5.05
92.86	3.09	56.17	83.81	5.05
100.00	3.06	56.14	83.81	5.06
107.14	3.02	56.11	83.81	5.06
114.28	2.98	56.07	83.81	5.06
121.43	2.94	56.04	83.81	5.06
128.57	2.90	56.00	83.80	5.07
135.71	2.86	55.97	83.80	5.07
142.86	2.82	55.94	83.80	5.08
150.00	2.78	55.90	83.80	5.08

FIGURA B. 93 – Arquivo formato *.txt (Envoltórias Máximas e Mínimas)

Onde:

Distância(m) = distância horizontal para cada seção da adutora

Cota_do_terreno(m) = Cota do terreno para cada seção da adutora

Cota_piezométrica(m) = Cota piezométrica permanente para cada seção da adutora

Carga_máxima(m) = Carga piezométrica máxima (Carga de pressão máxima + Cota) para cada seção

Carga_mínima(m) = Carga piezométrica mínima (Carga de pressão mínima + Cota) para cada seção

14.3. RESULTADOS POR NÓ

Através do menu *Visualizar>Nós*, o usuário poderá visualizar o comportamento do transitório hidráulico em cada nó da adutora. Esse formulário apresenta duas opções de visualização do transitório: carga (m) e vazão (m³/s). De acordo com a opção de gráfico e o nó selecionado, podem-se verificar os seguintes dados:

- ✓ Cota Piezométrica Máxima (m) e Mínima (m)
- ✓ Pressão no Estado Permanente (mca)
- ✓ Pressões Máxima e Mínima no Estado Transiente (mca)
- ✓ Vazões Máxima e Mínima no Estado Transiente (m^3/s)

Caso o usuário escolher a opção de gráfico “Carga” no formulário Resultados por nó será exibido o gráfico da cota piezométrica em função do tempo para o nó escolhido (ver figuras B.94 e B.95).

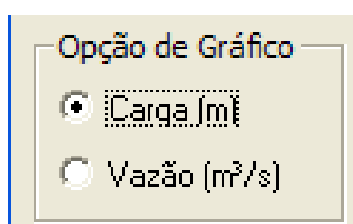


FIGURA B. 94 - Opções de gráfico

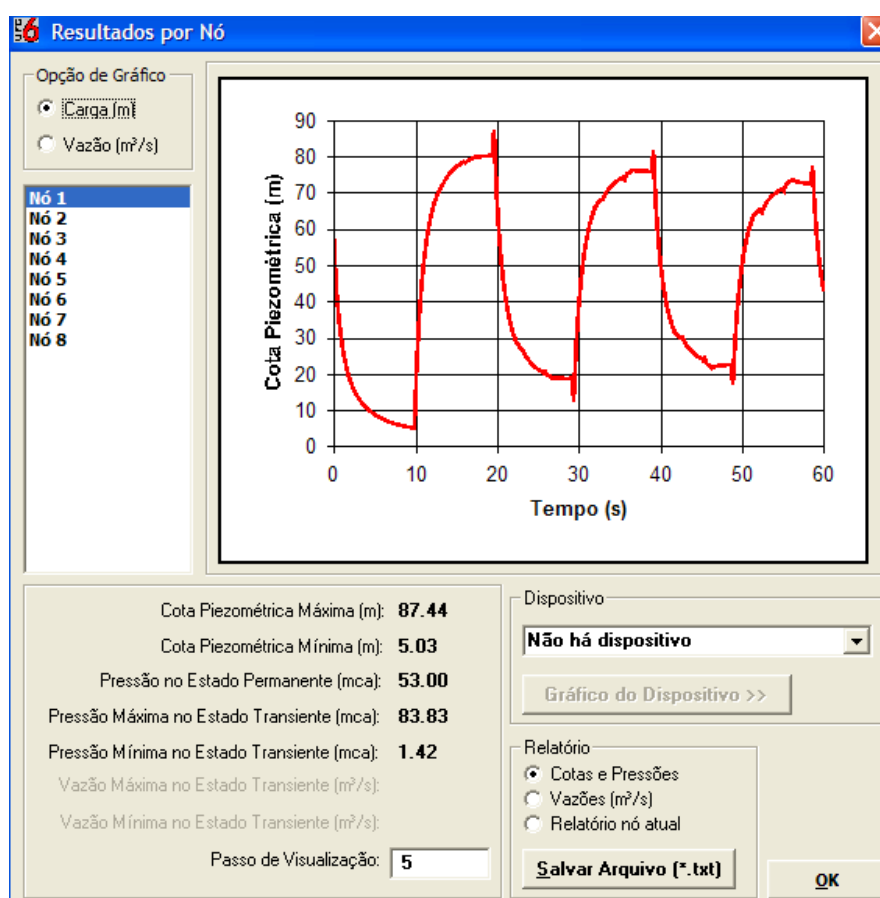


FIGURA B. 95 - Formulário Resultados por Nó (Carga)

Caso o usuário escolher a opção de gráfico “Vazão” no formulário Resultados por nó, será exibido o gráfico da vazão em função do tempo para o nó escolhido.

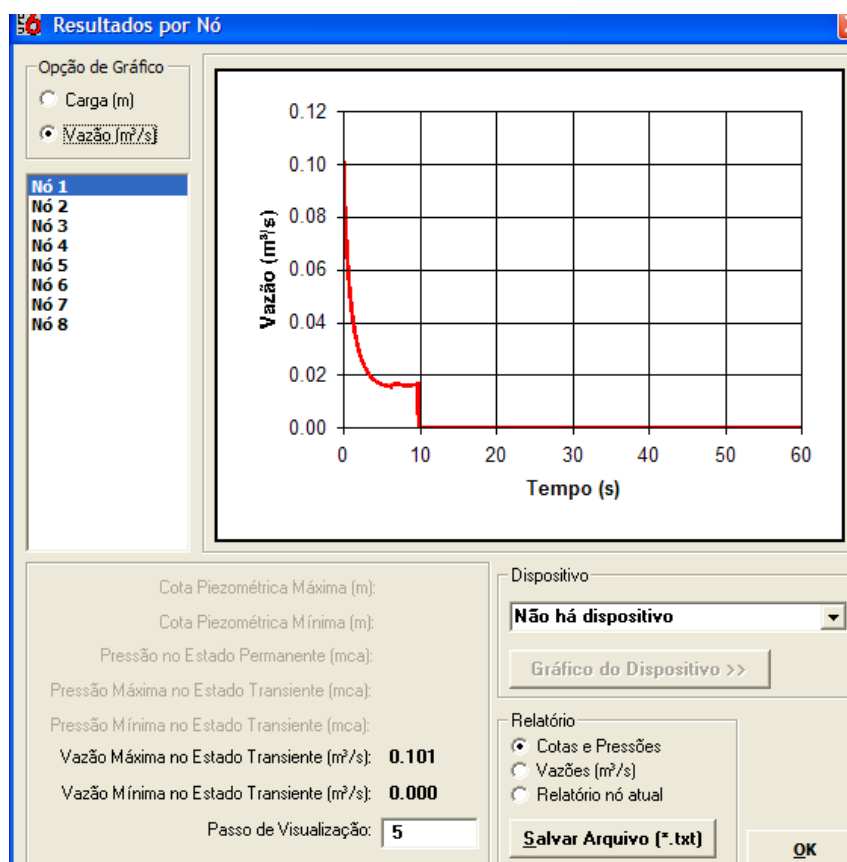


FIGURA B. 96 - Formulário Resultados por Nó (Vazão)

14.3.1. Salvando os dados num arquivo de texto

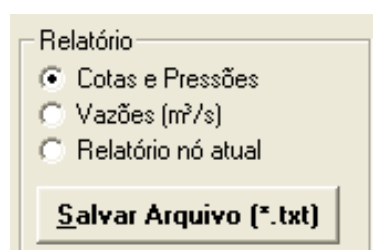


FIGURA B. 97 - Salvar relatório (nó)

O usuário poderá optar por salvar no formato de texto (*.txt), um relatório de cotas e pressões, vazões para todos os nós da adutora ou ainda salvar um relatório para cada nó da adutora escolhendo a opção “Relatório do nó atual”. Para salvar, basta clicar no *botão Salvar Arquivo (*.txt)* (ver figuras B.95, B.96 e B.97).

14.3.2. Visualização gráfica para o dispositivo de proteção

Para visualizar o gráfico correspondente ao mecanismo de proteção na adutora considerada, o usuário deverá fazer o seguinte: Escolha o dispositivo de proteção, como mostrado na figura B.98, e em seguida pressione o *botão gráfico do dispositivo* **Gráfico do Dispositivo >>** Localizado no formulário *Resultados por Nó* para gerar o gráfico correspondente ao dispositivo de proteção escolhido.

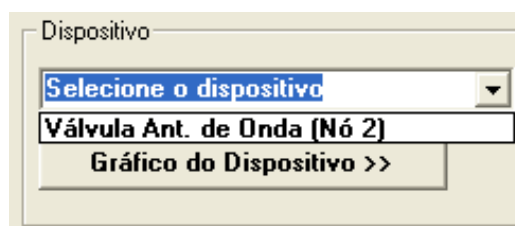


FIGURA B. 98 – Formulário Resultados por Nó (Dispositivo)

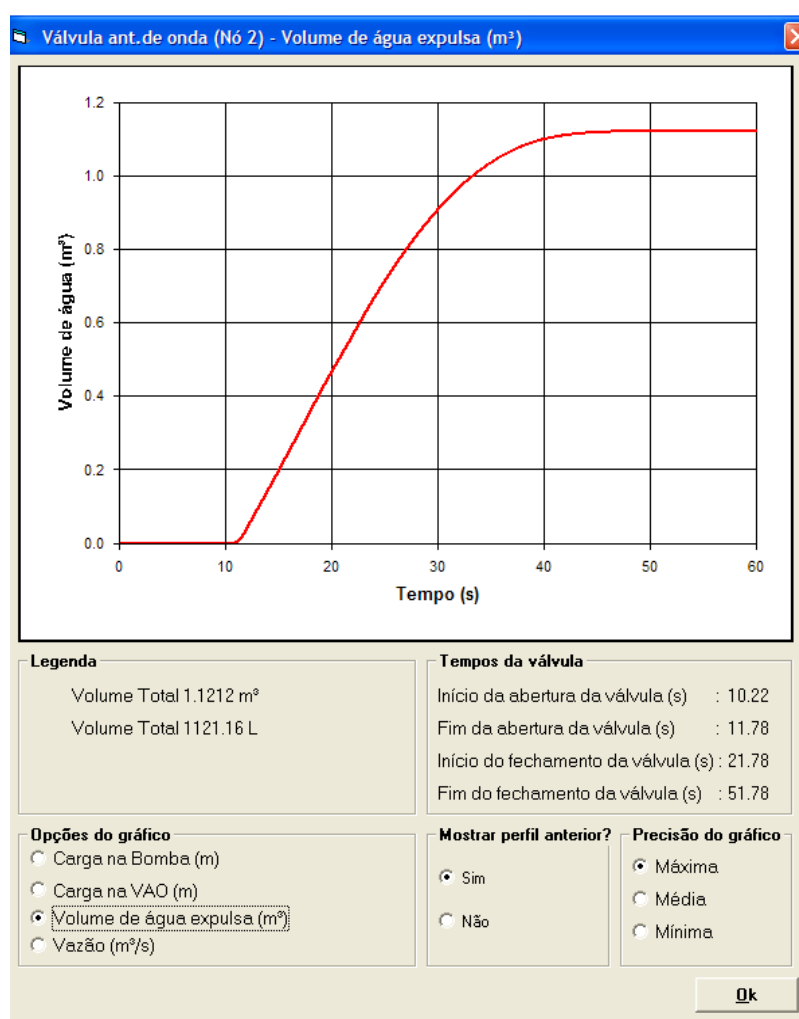


FIGURA B. 99 - Gráfico do Dispositivo de Proteção

14.4. RESULTADOS POR SEÇÃO

Através do menu *Visualizar>Seções*, o usuário poderá visualizar o comportamento do transitório hidráulico em cada seção da adutora. Esse formulário apresenta duas opções de visualização do transitório: carga (m) e vazão (m³/s). De acordo com a opção de gráfico e a seção selecionada, podem-se verificar os seguintes dados:

- ✓ Cota Piezométrica Máxima (m) e Mínima (m)
- ✓ Pressão no Estado Permanente (mca)
- ✓ Pressões Máxima e Mínima no Estado Transiente (mca)
- ✓ Vazões Máxima e Mínima no Estado Transiente (m³/s)

O usuário tem a opção de recalculer o gráfico, para isso basta clicar no botão Recalcular.

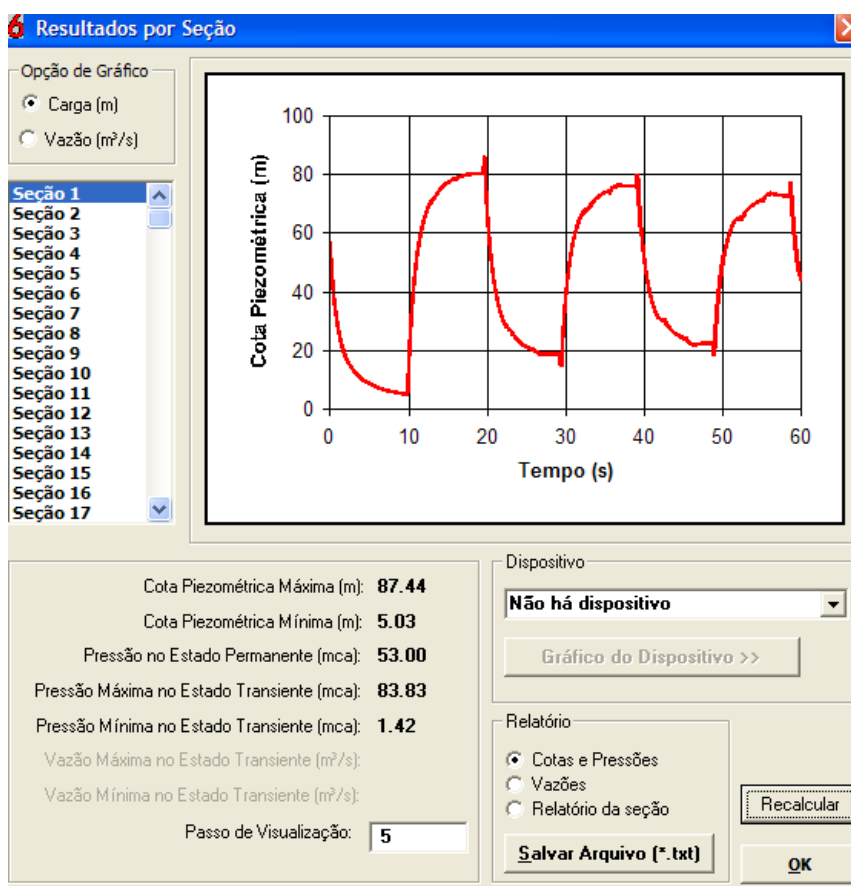


FIGURA B. 100 - Formulário Resultados por Seção (Carga)

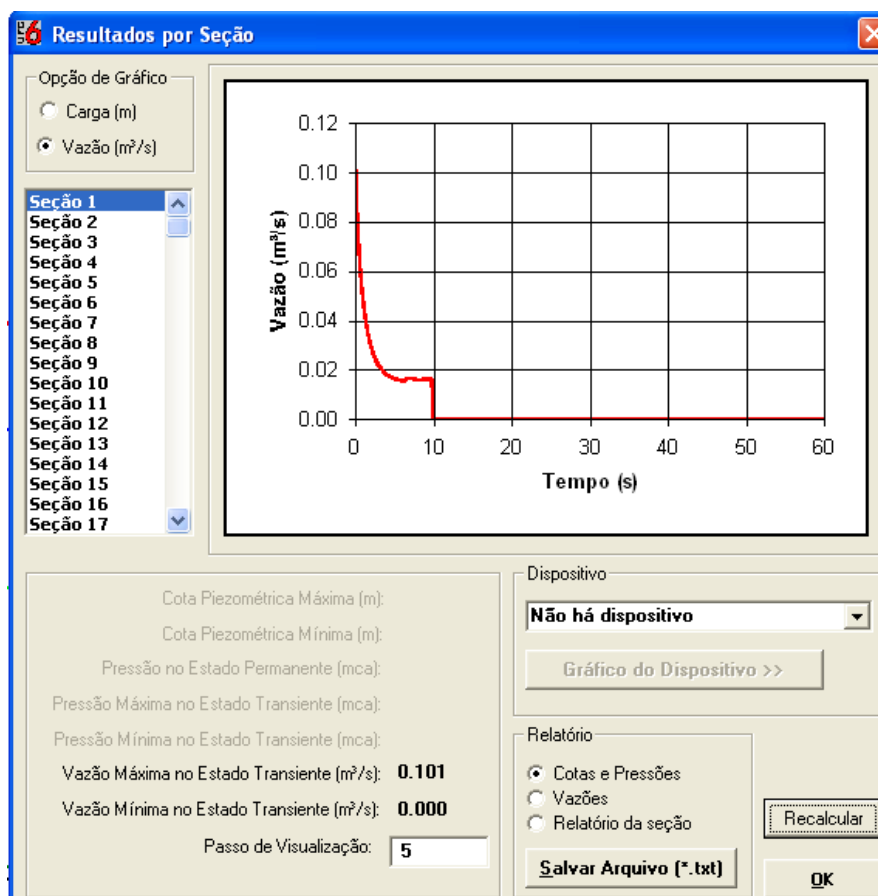


FIGURA B. 101 - Formulário Resultados por Seção (Vazão)

14.4.1. Salvando os dados num arquivo de texto

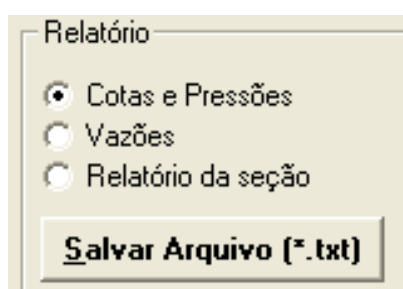


FIGURA B. 102 - Relatório

O usuário poderá optar por salvar no formato de texto (*.txt) um relatório relativo as seções, o programa dispõe das seguintes opções de relatório: Cotas e pressões, Vazões para todas as seções da adutora ou ainda salvar um relatório para a secção atual escolhendo a opção “Relatório da seção”. Para salvar, basta clicar no botão *Salvar Arquivo (*.txt)*.

14.4.2. Visualização gráfica para o dispositivo de proteção

Para visualizar o gráfico correspondente ao mecanismo de proteção na adutora considerada, o usuário deverá fazer o seguinte: Escolha o dispositivo de proteção, como mostrado na figura B.103, e em seguida pressione o *botão gráfico do dispositivo* **Gráfico do Dispositivo >>** Localizado no formulário *Resultados por Seção* (ver figuras B.100 e B.101) para gerar o gráfico correspondente ao dispositivo de proteção escolhido.

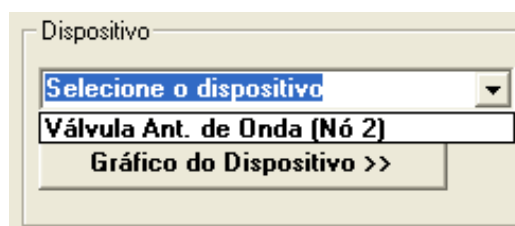


FIGURA B. 103 – Dispositivo

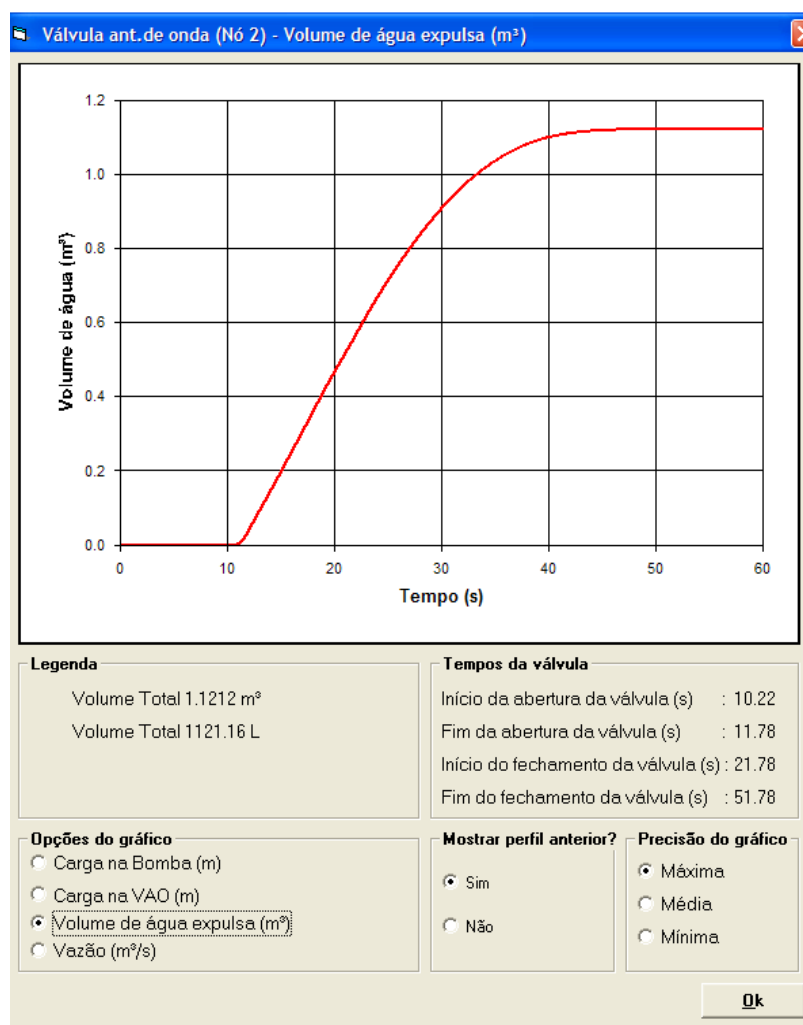


FIGURA B. 104 - Gráfico do Dispositivo de Proteção

14.5. ANIMAÇÃO DAS PRESSÕES NA ADUTORA

Para avaliar o a evolução da carga piezométrica da adutora em função do tempo, o usuário deve ir ao menu *Vizualizar>animação* e em seguida iniciar a animação através do botão **Iniciar**.

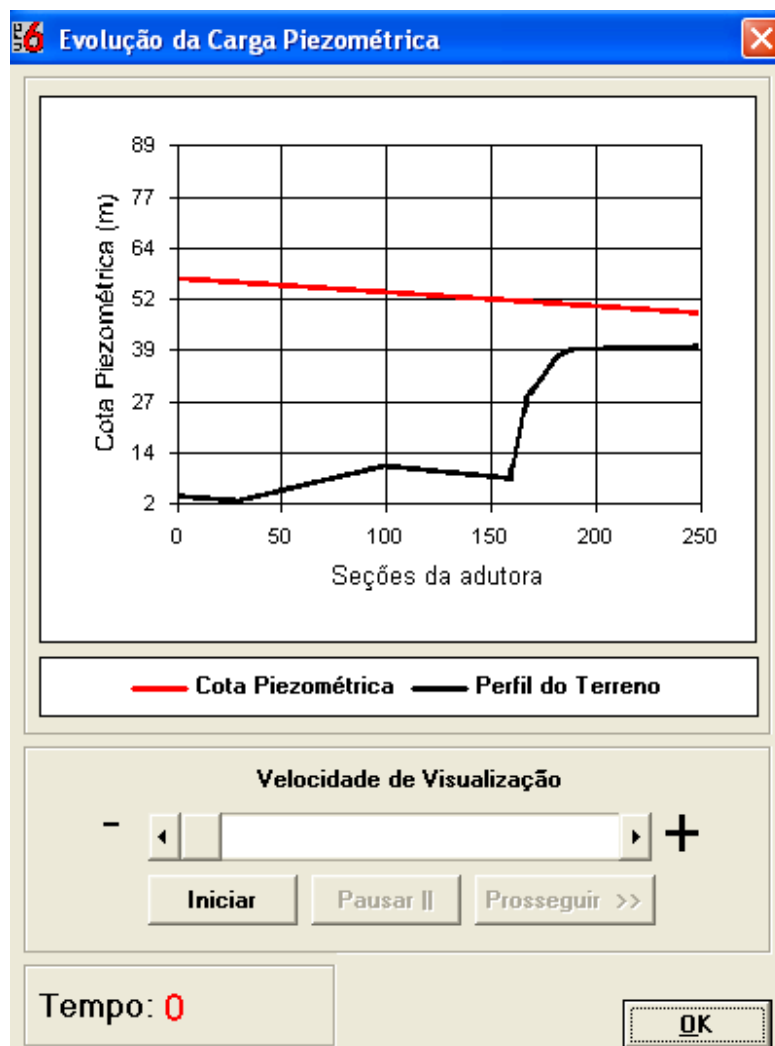




FIGURA B. 105 - Formulário Evolução da Cota Piezométrica

O usuário tem a opção de controlar a velocidade de visualização. Apertando o botão  o usuário Aumenta o passo de visualização e apertando o botão  o usuário reduz o passo de visualização.

Através do botão **Pausar II** o usuário pausa a animação e para prosseguir basta apertar o botão **Prosseguir >>**.

15. MENU AJUDA

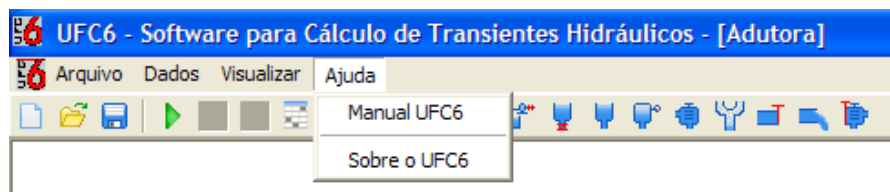



FIGURA B. 106 - Menu Ajuda

15.1. MANUAL UFC6

Nessa opção o usuário poderá abrir o manual do programa UFC6. Para isso, basta ir ao menu *ajuda* > *Manual UFC6*, e então irá abrir o manual do programa no formato (*pdf). Caso o usuário desejar acessar a versão (*pdf) diretamente, deve ir ao diretório “C:\UFC\UFC6” e escolher o arquivo  Manual UFC6.pdf

15.2. SOBRE O UFC6

Essa é a versão 2.0 do programa UFC6 produzido pelo grupo de estudos em hidráulica computacional pela Universidade Federal do Ceará. Para visualizar algumas informações acerca do programa vá ao *menu* > *Sobre UFC6*.



FIGURA B. 107 – Sobre UFC6

16. FERRAMENTAS E BOTÕES ADICIONAIS

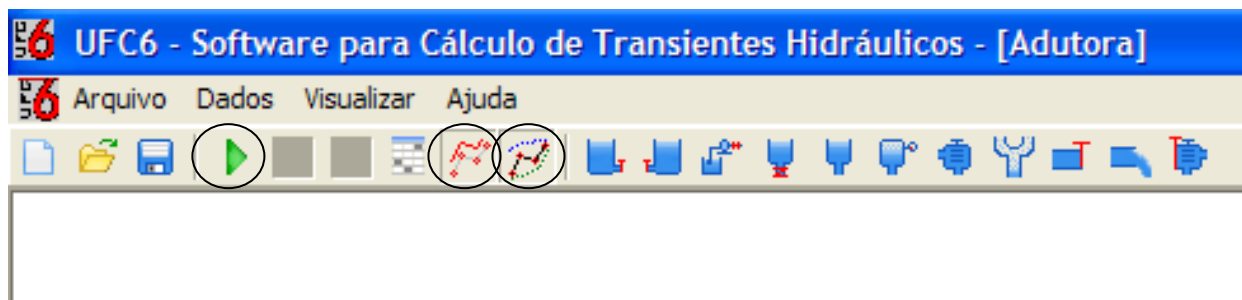



FIGURA B. 108 - Menu e Barra de Ferramentas

16.1. EXECUTAR CÁLCULO NO PROGRAMA UFC6

Para executar os cálculos do transiente hidráulico o usuário deve ir a barra de ferramentas e apertar o botão .

Em seguida, aperte *OK* para o cálculo e então espere carregar até que o botão *Resultados >>* esteja disponível.

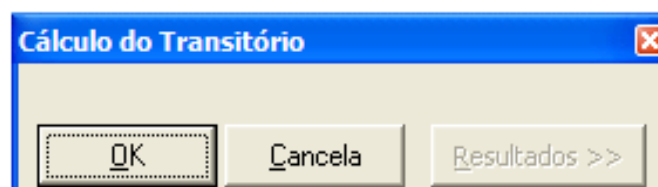



FIGURA B. 109 - Formulário Cálculo do Transitório (Botão OK)

O formulário *Cálculo do Transitório* está 100% carregado. E o usuário poderá verificar os resultados da simulação clicando no botão .

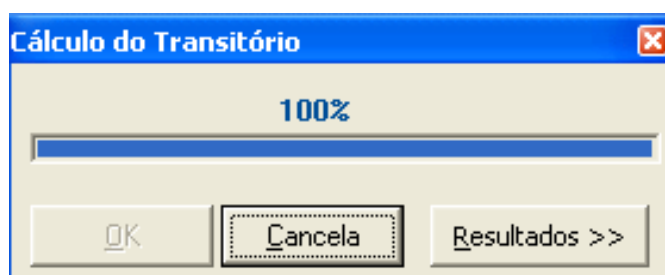



FIGURA B. 110 - Cálculo do Transitório (Botão Resultados)

16.2. VISUALIZAR CARGA MÁXIMA DE RESISTÊNCIA

Nessa versão do programa, o usuário tem a opção de visualizar a carga máxima que a tubulação pode suportar. Para isso, deve-se verificar se o botão  localizado na barra de ferramentas está pressionado.

Se o botão estiver pressionado, após executar os cálculos, para o exemplo da simulação Cuiá, será gerado o seguinte gráfico:

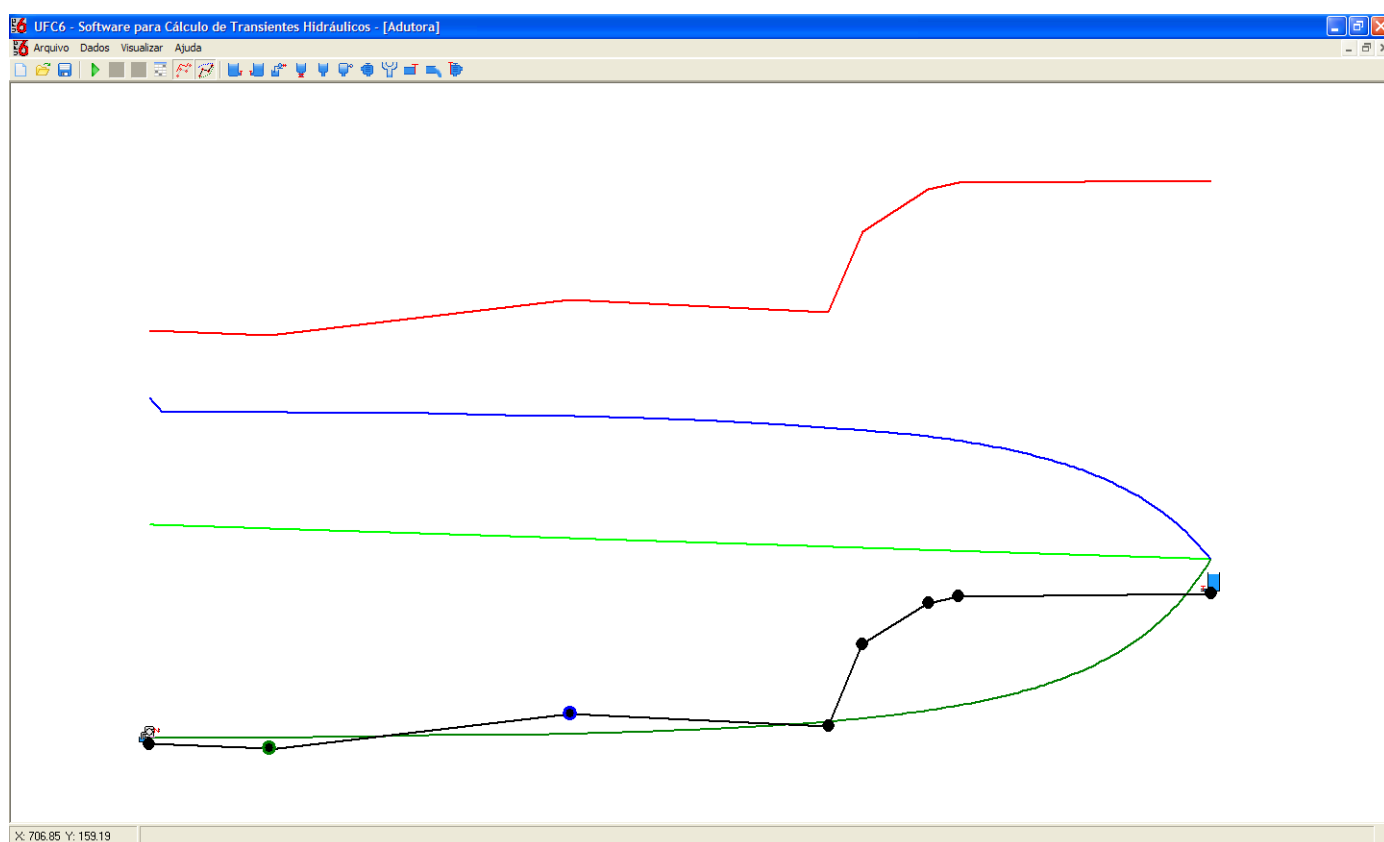


FIGURA B. 111 - Perfil Calculado (Com Carga Máxima de Resistência)

Se o botão não estiver pressionado após executar os cálculos, para o exemplo da simulação Cuiá, será gerado o seguinte gráfico:

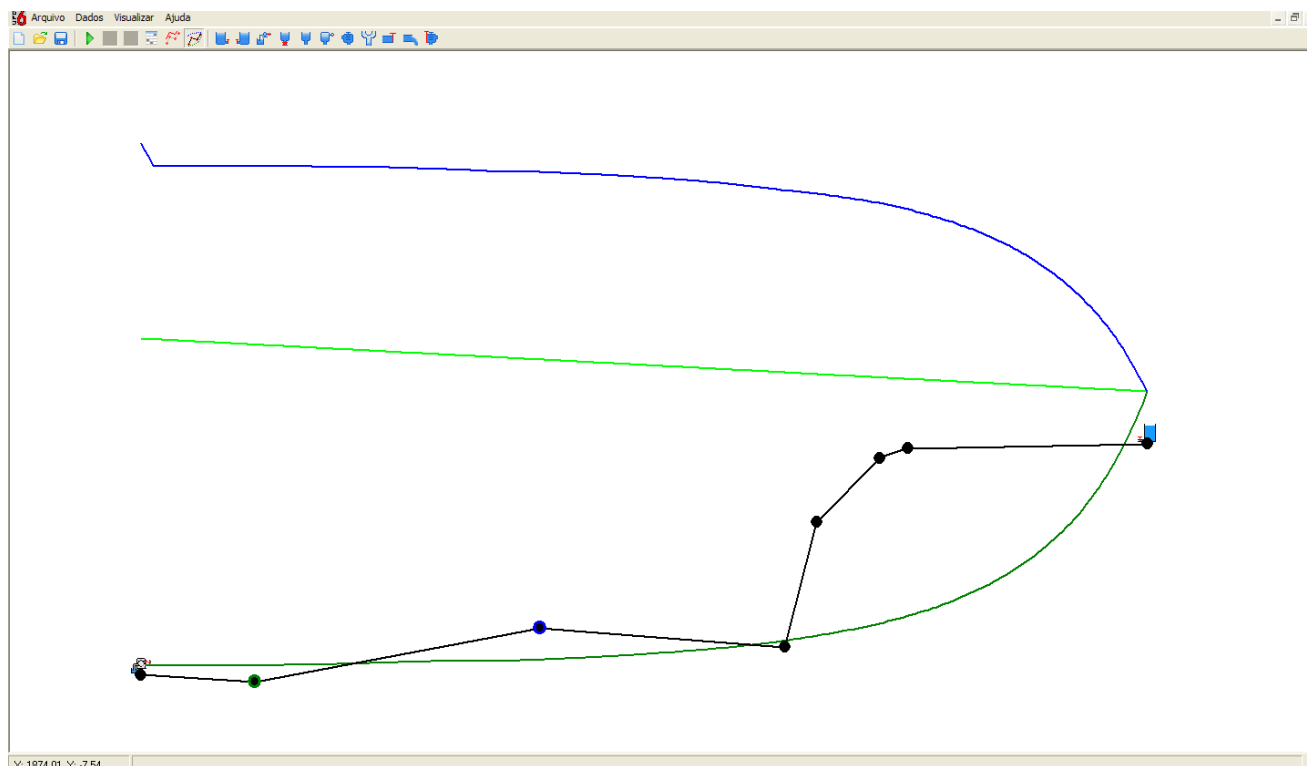






FIGURA B. 112 - Perfil Calculado (Sem Carga Máxima de Resistência)

16.3. VISUALIZAR PERFIL ANTERIOR

Para melhor visualização deste exemplo, vamos considerar que o botão  discutido na seção anterior não está pressionado.

Nessa versão do programa, o usuário tem a opção de visualizar as cargas piezométricas máximas e mínimas (carga piezométrica é igual à carga de pressão acrescido da cota) que foi calculado antes. Para isso, deve-se verificar se o botão  localizado na barra de ferramentas está pressionado.

Após a execução do cálculo transitório, sem mecanismo de proteção, através do botão  localizada na barra de ferramentas, será gerado o gráfico da figura B.112. Caso o usuário adicionar a condição de contorno “válvula antecipadora de onda”, e se o botão  estiver pressionado, após executar os cálculos, para o exemplo da simulação Cuiá, será gerado o gráfico da figura B.113.

Desse modo, torna-se fácil a visualização do amortecimento do transiente através da comparação das envoltórias máximas e mínimas anteriores (linhas pontilhadas) com as envoltórias máxima e mínima com mecanismo de proteção (linhas cheias).

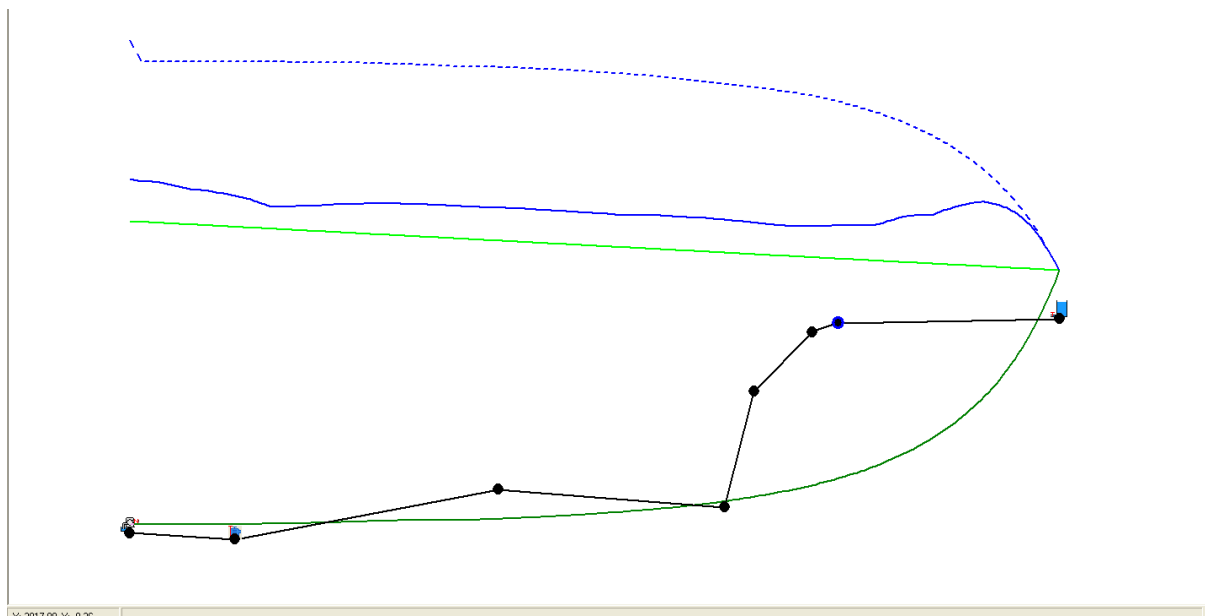



FIGURA B. 113 - Perfil Carregado (Visualização Ativada)

Se o botão  não estiver pressionado, após executar os cálculos, para o exemplo da simulação Cuiá, será gerado o seguinte gráfico:

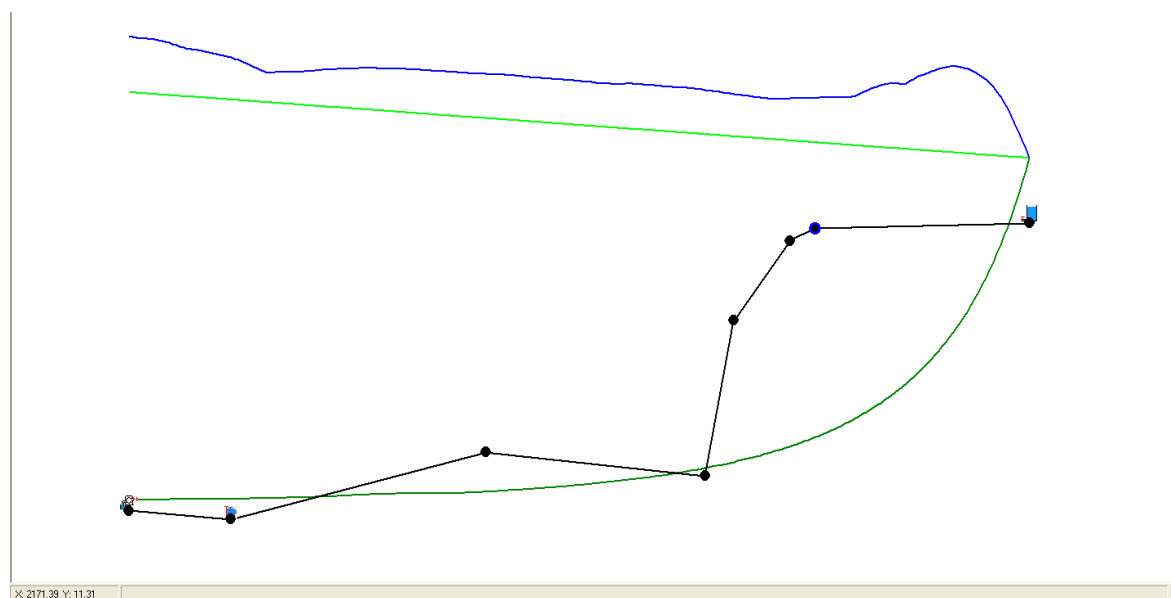


FIGURA B. 114 - Perfil Carregado (Visualização Desativada)

17. ARQUIVO PTH

O formato (*.pth) reúne todas as características do projeto, de modo que, se utilizado como entrada, o usuário deverá apenas executar o cálculo do transiente hidráulico. Para abrir qualquer arquivo no formato (*.pth) como bloco de notas, o usuário deve ir ao diretório do arquivo e com o *botão direito do mouse* ir a *Abrir com>escolher programa...* E escolher Bloco de notas. Assim o arquivo aberto terá o seguinte formato para o exemplo Cuiá.

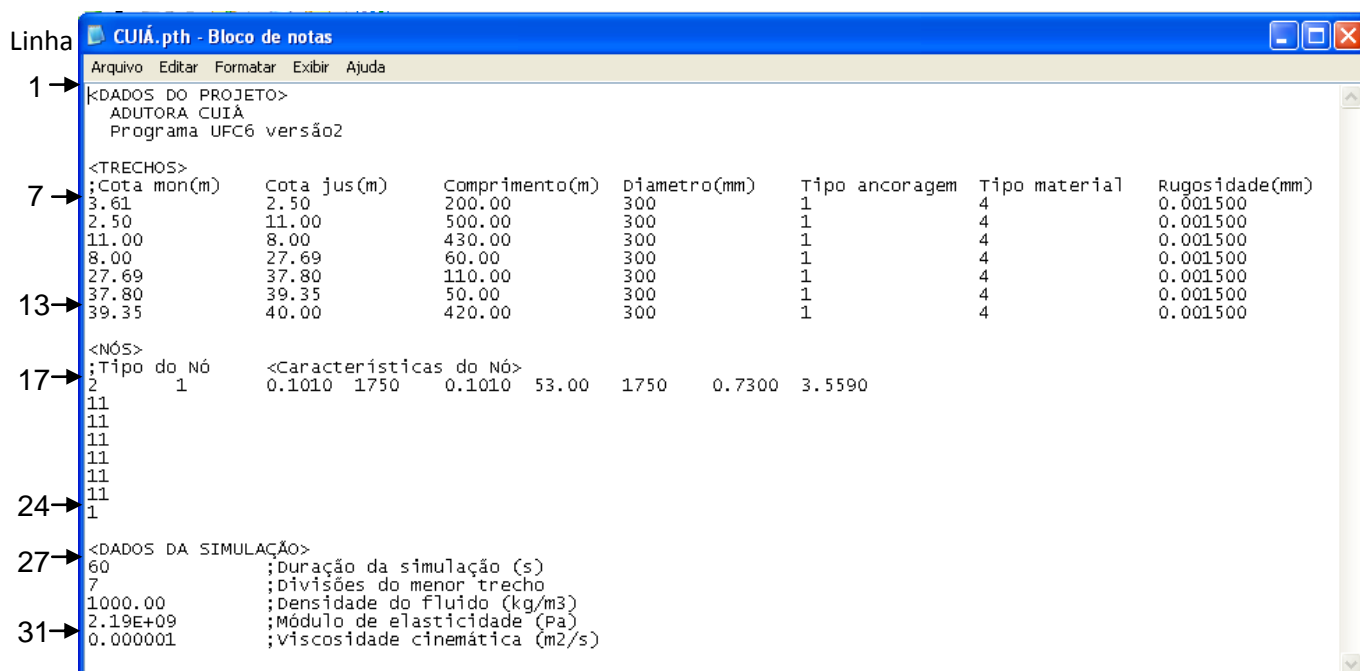


FIGURA B. 115 - Entrada Automática de Dados (formato *.txt)

O usuário pode acessar os dados de entrada para qualquer simulação e editar os dados, desde que obedeça ao formato de dados. Compõem o formato *.pth (exemplo acima):

TABELA B. 11 - Descrição do arquivo da entrada de dados

Linhas	Descrição
1	Descrição do projeto;
2	Nome do projeto;
3	Versão do programa;
7 a 13	Dados dos trechos: Cota de montante (m), Cota de jusante (m), Comprimento (m), Diâmetro (mm), Tipo de ancoragem (ver Tabela B.13), Tipo de material (ver tabela B.12), Rugosidade (mm);

17 a 24	Dados dos nós: Tipo dos nós (condições de contorno), características do nó. Cada elemento de contorno possui um número identificador e dados específicos indicados na tabela B.14.
27 a 31	Parâmetros do projeto: Tempo de duração da simulação (s), número de divisões do menor trecho, densidade do fluido (kg/m^3), viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

TABELA B. 12 - Identificadores do Material da Tubulação

<i>Identificador</i>	<i>Material da Tubulação</i>
1	PVC PBA Classe 12
2	PVC PBA Classe 15
3	PVC PBA Classe 20
4	PVC DEFoFo
5	Ferro Fundido Dúctil Classe K7
6	Ferro Fundido Dúctil Classe K9
7	Aço Comercial

TABELA B. 13 - Identificadores do Tipo de Ancoragem

<i>Identificador</i>	<i>Tipo de Ancoragem</i>
0	Conduto rígido
1	Ancorado contra movimento longitudinal
2	Uma extremidade ancorada
3	Com juntas de dilatação

TABELA B. 14 - Identificadores do Elemento de Contorno

<i>Identificador</i>	<i>Tipo de Ancoragem</i>
0	Reservatório de montante
1	Reservatório de jusante
2	Res. de Montante, bomba e válvula de retenção
3	TAU ou One-Way
4	Chaminé de Equilíbrio
5	Reservatório Hidropneumático
6	Ventosa
7	Válvula de alívio
8	Válvula de controle *
9	Saída livre *
10	Extremidade fechada *
11	Junção
12	Válvula Antecipadora de Onda

* Elementos de contorno a serem implementados posteriormente

OBS: O usuário deverá inserir os dados específicos de cada elemento de contorno no arquivo de formato (*.pth), na mesma ordem em que foram apresentados.

Do exemplo:

- ✓ Linha 17: refere-se ao Reservatório de montante, bomba e válvula de retenção (identificador 2) e a as colunas da mesma linha referem-se aos dados específicos do mesmo;
- ✓ Linhas 18 a 23: referem-se à Junção (identificador 11);
- ✓ Linha 24: refere-se ao Reservatório de Jusante (identificador 1).

18. ARQUIVO DE MATERIAIS

O programa UFC6, dispõe de um arquivo no formato (*.txt), que contém os dados relativos aos materiais preexistentes no programa, para acesso dos dados relativos ao material escolhido e alterações dos valores. O arquivo está localizado no diretório “C:\UFC\UFC6\materiais_UFC6.txt”.

Todos os perfis do formato (*.pth) tem uma identificação referente ao arquivo de materiais (tabela B.12), com base nessa identificação e no diâmetro nominal do trecho contido no mesmo, o programa compara com o arquivo de materiais, para em seguida armazenar os valores de rugosidade, módulo de elasticidade do material, coeficiente de Poisson, diâmetro interno, espessura e resistência máxima.

Por exemplo, se a identificação do material for igual a 4 e o diâmetro nominal igual 200 mm e a rugosidade nula, e considerando a notação inglesa para números decimais, o programa irá armazenar 0.06mm para a rugosidade (a rugosidade nula é modificada para a rugosidade do material) , 3.0GPa para o módulo de elasticidade do material e 0.38 para o coeficiente de Poisson (figura B.116). Com base no diâmetro nominal, o diâmetro interno é igual a 0.2042m, espessura é igual a 0.0089 m e o material nesse trecho tem resistência máxima de 100 mca.

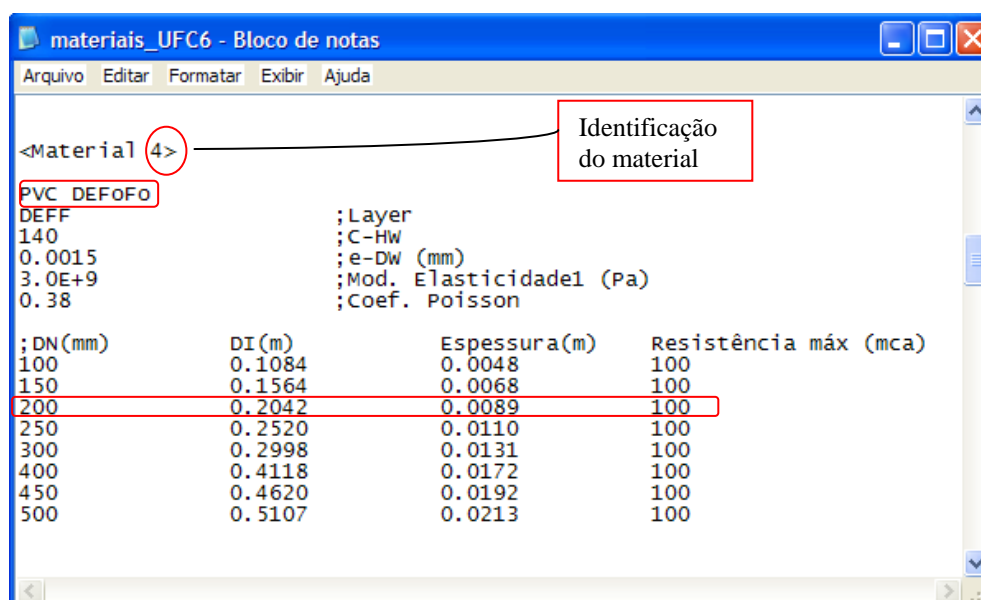


FIGURA B. 116 – Bloco de notas do arquivo de materiais

Nessa versão do programa UFC6, na entrada manual de dados (ver seção 8 deste manual) o usuário tem a opção de entrar com o diâmetro nominal do material, que deve estar de acordo com o diâmetro nominal para o material escolhido, ou ainda entrar com um diâmetro nominal para a opção outro material (que nesse caso será o diâmetro interno). Para ilustrar a diferença entre essas opções de entrada manual de dados, será apresentada nas duas seções a seguir:

18.1. MATERIAIS ADOTADOS PELO PROGRAMA

No caso da entrada manual de dados (ver seção 8), ao adicionar o diâmetro nominal do material (ver figura B.22 da seção 8) e em seguida escolher o material, deve ser verificado se o diâmetro nominal adicionado pelo usuário (ver figura B.22 da seção 8) tem o seu valor que corresponde ao material no arquivo *materiais_UFC6.txt* localizado no diretório “C:\UFC\UFC6”. Por isso, ao inserir o diâmetro nominal do material escolhido o usuário deve verificar se esse valor tem o seu correspondente no arquivo de materiais.

Por exemplo, se o usuário inserir o diâmetro 150 mm (ver seção 8) e em seguida escolher a identificação 4 para o material (ver tabela B.12 da seção 17) então o diâmetro interno é igual a “0.1564 m”, indicado em negrito na tabela B.15.

TABELA B. 15 – Diâmetro Nominal de interno

Material 1		Material 2		Material 3		Material 4		Material 5		Material 6		Material 7	
DN (mm)	DI (m)	DN (mm)	DI (m)	DN (mm)	DI (m)	DN (mm)	DI (m)	DN (mm)	DI (m)	DN (mm)	DI (m)	DN (mm)	DI (m)
50	0.0546	50	0.0534	50	0.0600	100	0.1084	150	0.1546	80	0.0810	300	0.3199
60	0.0682	60	0.0666	75	0.0850	150	0.1564	200	0.2062	100	0.1008	350	0.3515
75	0.0772	75	0.0756	100	0.1100	200	0.2042	250	0.2580	150	0.1524	400	0.4020
100	0.1000	100	0.0978	-	-	250	0.2520	300	0.3096	200	0.2042	450	0.4524
-	-	-	-	-	-	300	0.2998	350	0.3572	250	0.2554	500	0.5016
-	-	-	-	-	-	400	0.4118	400	0.4074	300	0.3066	600	0.6302
-	-	-	-	-	-	450	0.4620	450	0.4576	350	0.3536	700	0.7324
-	-	-	-	-	-	500	0.5107	500	0.5090	400	0.4038	800	0.8364
-	-	-	-	-	-	-	-	600	0.6106	450	0.4538	900	0.9394
-	-	-	-	-	-	-	-	700	0.7092	500	0.5050	1000	1.0416
-	-	-	-	-	-	-	-	800	0.8118	600	0.6062	1100	1.1431
-	-	-	-	-	-	-	-	900	0.9134	700	0.7044	1200	1.2471
-	-	-	-	-	-	-	-	1000	1.0150	800	0.8066	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	1200	1.2192	900	0.9078	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	1.0090	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200	1.2124	-	-

18.2. OUTROS MATERIAIS

Na entrada manual de dados (ver seção 8), caso o usuário escolher a opção “outros materiais” deve-se proceder da seguinte forma:

- 1) Digitar o número “0” que corresponde a opção “outro material” e pressionar o *botão OK*.

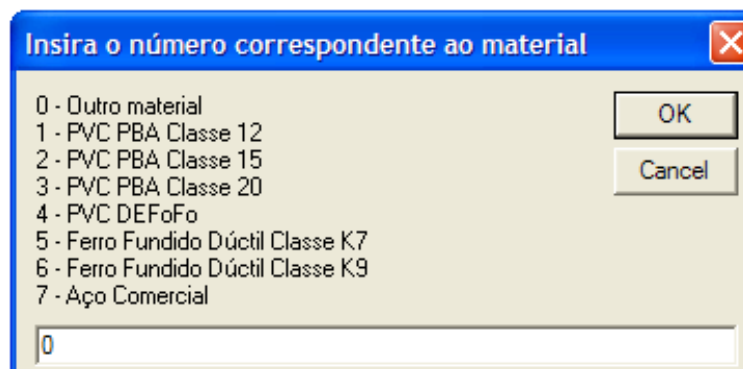


FIGURA B. 117 - Outro material (identificação 0)

- 2) Inserir o valor da rugosidade (em mm) para todos os trechos da tubulação, e em seguida pressionar o botão OK.

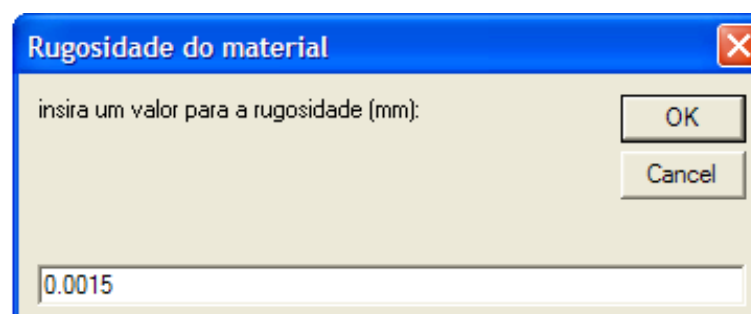


FIGURA B. 118 - Rugosidade do material

- 3) Inserir o valor do módulo de elasticidade (em GPa) para todos os trechos da tubulação, e em seguida pressionar o botão *OK*.

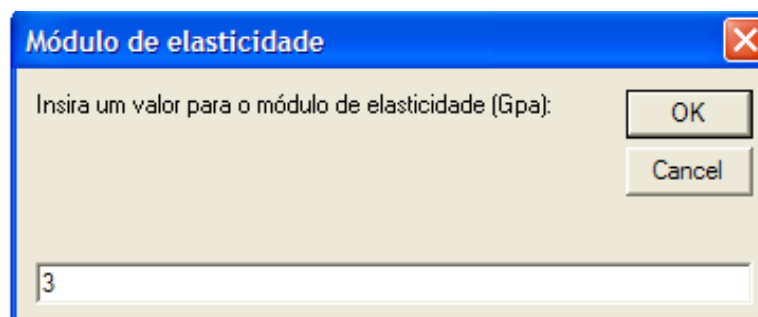


FIGURA B. 119 - Módulo de elasticidade

- 4) Inserir o valor da pressão máxima que o material pode suportar (em mca) para todos os trechos da tubulação, e em seguida pressionar o *botão OK*.

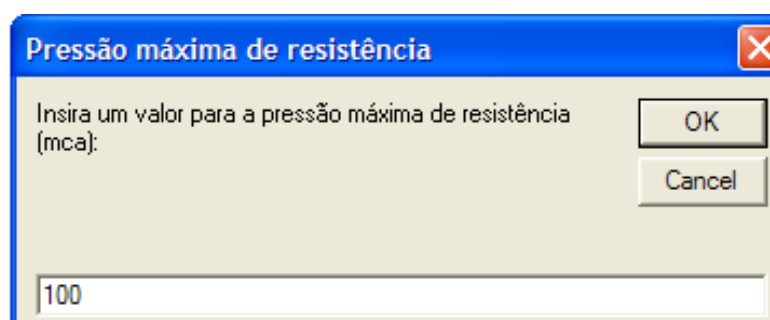


FIGURA B. 120 - pressão máxima de resistência

- 5) Inserir o valor do coeficiente de Poisson (adimensional) para todos os trechos da tubulação, e em seguida pressionar o *botão OK*.

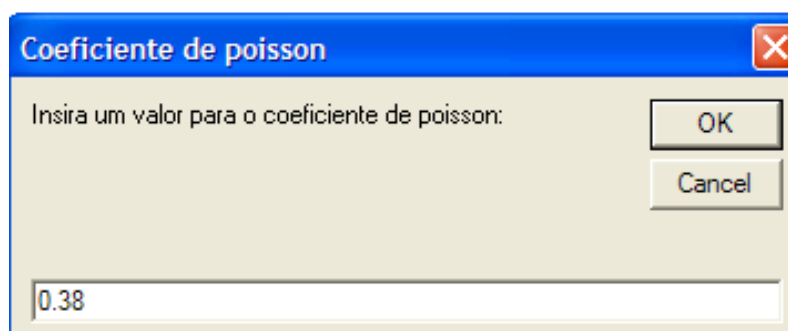
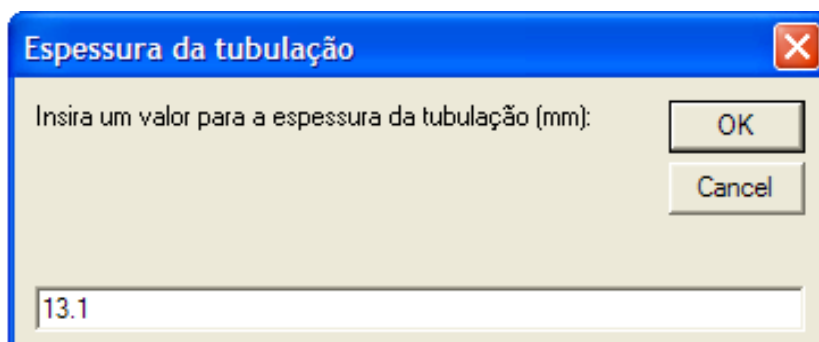


FIGURA B. 121 - Coeficiente de Poisson

- 6) Inserir o valor da espessura do material (em mm) para todos os trechos da tubulação, e em seguida pressionar o *botão OK*.



Espessura da tubulação

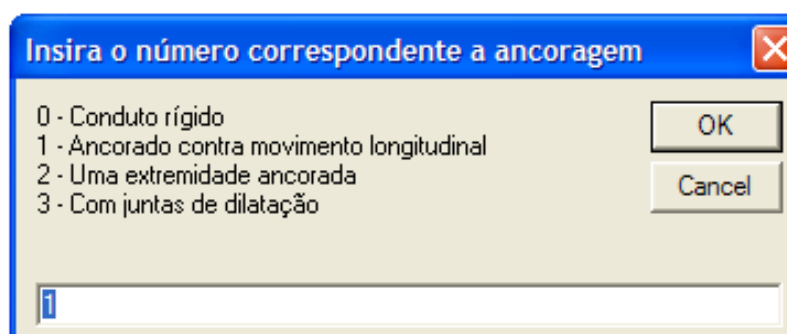
Insira um valor para a espessura da tubulação (mm):

13.1

OK Cancel

FIGURA B. 122 - Espessura da tubulação

- 7) Digitar o número correspondente ao tipo de ancoragem, e em seguida pressionar o *botão OK*, e será gerado o perfil mostrado na figura B.124.



Insira o número correspondente a ancoragem

- 0 - Conduto rígido
- 1 - Ancorado contra movimento longitudinal
- 2 - Uma extremidade ancorada
- 3 - Com juntas de dilatação

1

OK Cancel

FIGURA B. 123 - Tipo de ancoragem

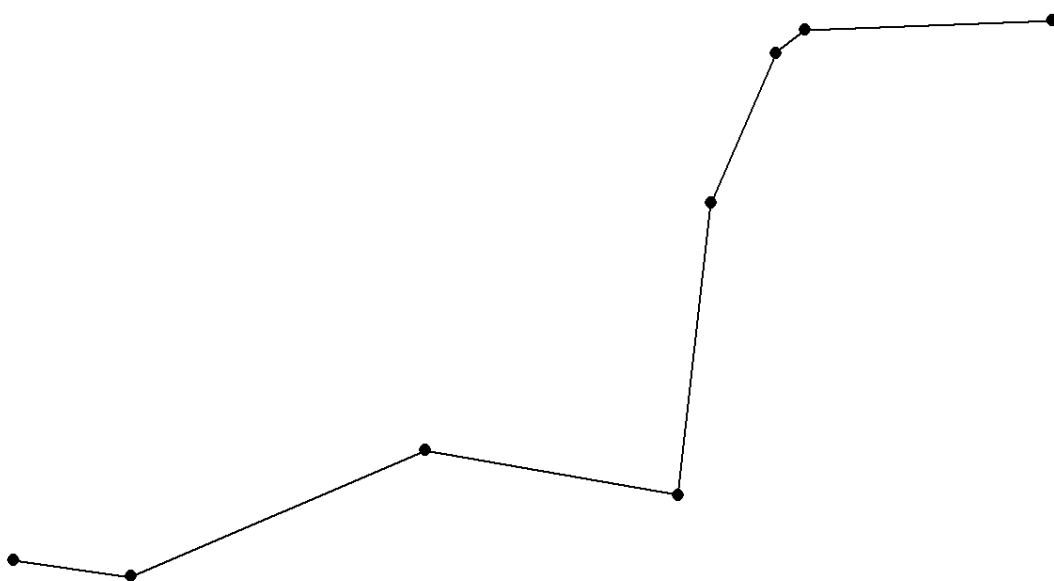



FIGURA B. 124 - Perfil carregado

- 8) Inserir as condições de contorno para a bomba (para o primeiro nó) e reservatório de jusante (para o último nó) de acordo com o exemplo apresentado na seção 8 deste manual (ver figuras B.27, B.28 e B.29 para o exemplo da simulação Cuiá).
- 9) Executar o cálculo do transiente hidráulico através do *botão*  localizada na barra de ferramentas (ver seção 16.1).

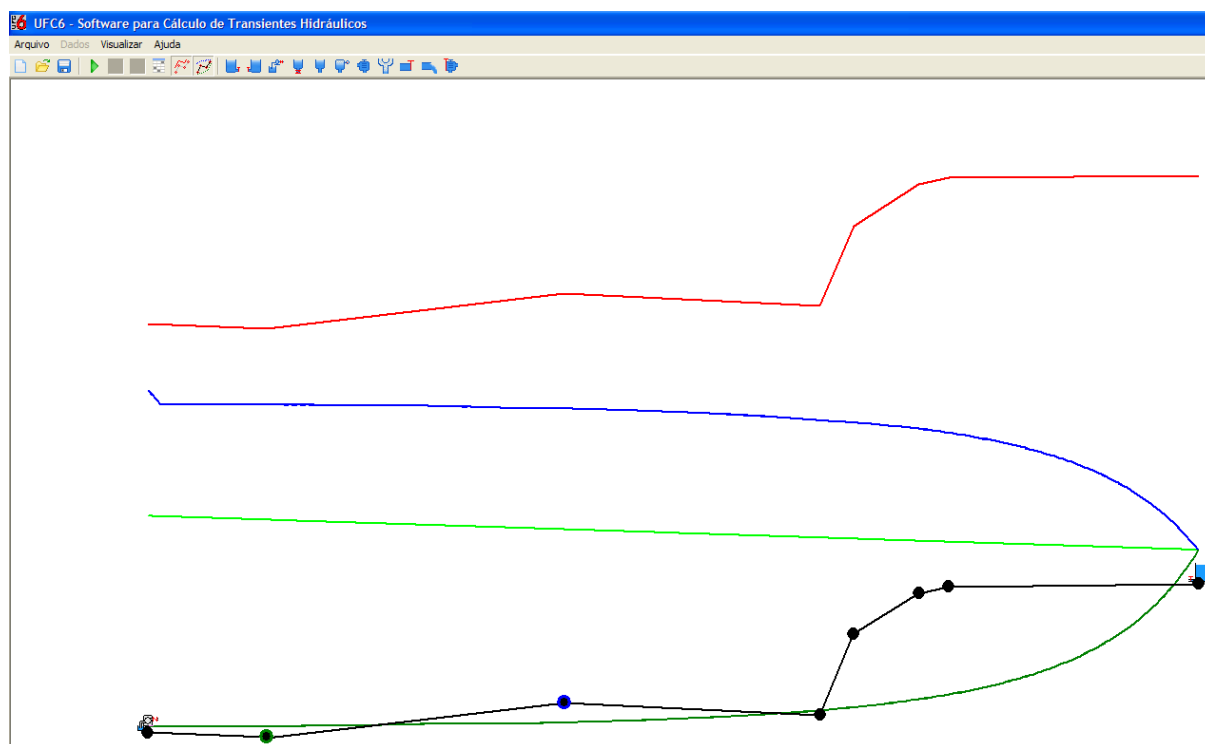


FIGURA B. 125 - Perfil calculado

- 10) Para salvar, o usuário deve ir ao menu *Arquivo>Salvar Projeto* e então salvar o projeto no diretório “C:\UFC\UFC6\Arquivos de Dados de Entrada” (ver seção 12.4 deste manual).

Após seguir esses passos, será gerado um arquivo auxiliar no formato (*.txt) no diretório em que foi salvo com o seguinte nome: “Nome_do_projeto.pth_Dados_do_material.txt” que não deve ser excluído caso o usuário desejar executar os cálculos desse projeto posteriormente. O arquivo (*.txt) gerado terá o seguinte formato:

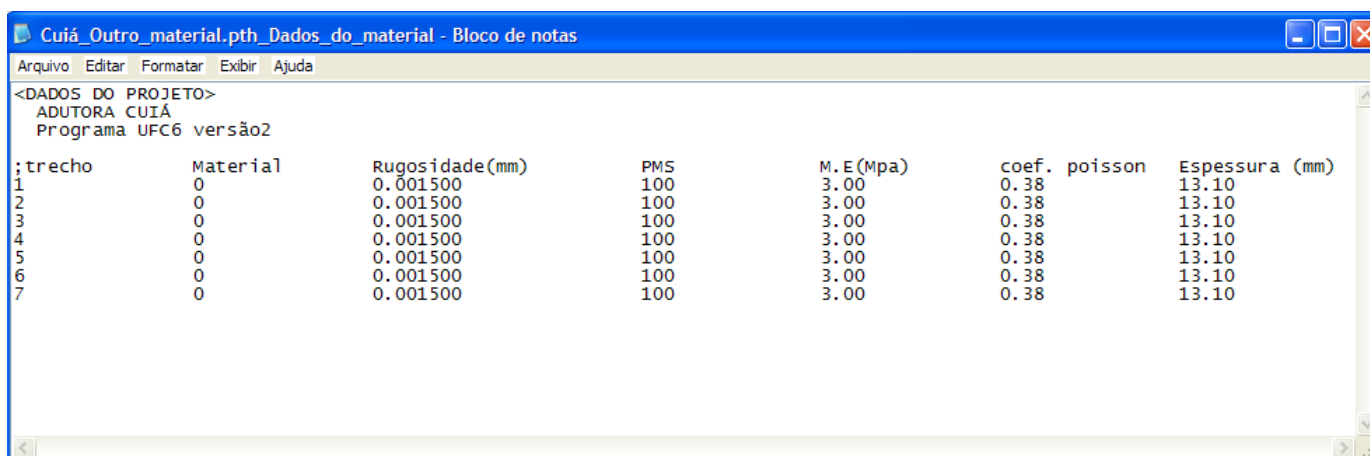


FIGURA B. 126 - Arquivo auxiliar de entrada

- 11) Para abrir esse projeto, vá ao diretório no qual ele foi salvo (ser seção 12.3).

Caso o usuário desejar executar esse projeto em outro diretório, deve-se copiar os arquivos (*.pth) e (*.txt) do diretório de origem deste projeto e colar os arquivos no diretório de destino.

19. REFERÊNCIA ADOTADA PELO PROGRAMA UFC6

O programa UFC6 adota a referência espacial no primeiro nó para os cálculos internos, por isso a carga piezométrica desse nó é igual à carga de pressão. Porém, na apresentação final dos resultados por meio de planilhas e gráficos, ocorre a mudança na referência passando então ser adotado o nível do mar como referência. Por esse motivo, será apresentada uma pequena revisão sobre mudança de referência, onde:

Referência espacial 1 = Nó 1

Referência espacial 2 = Nível do mar

Pode-se dividir a cota de cada nó jusante ao nó 1, em dois casos distintos como segue:

Caso 1: $Z_{2,r1} \geq 0$

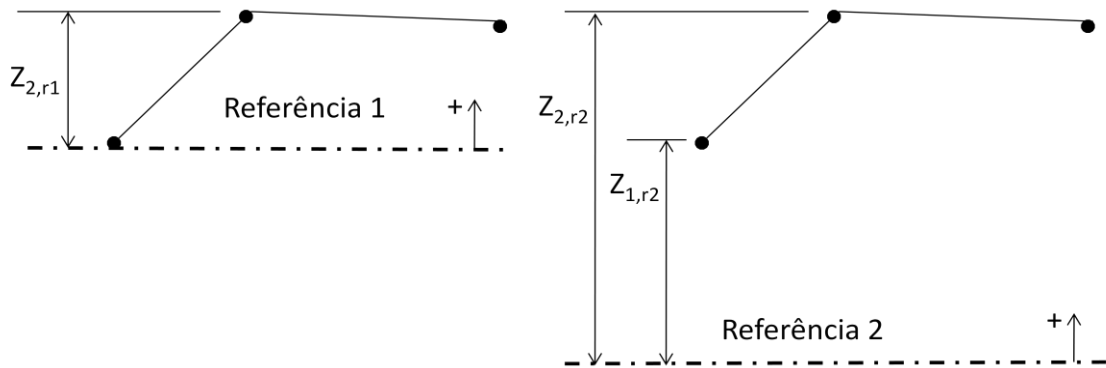


FIGURA B. 127 - Referência (caso 1)

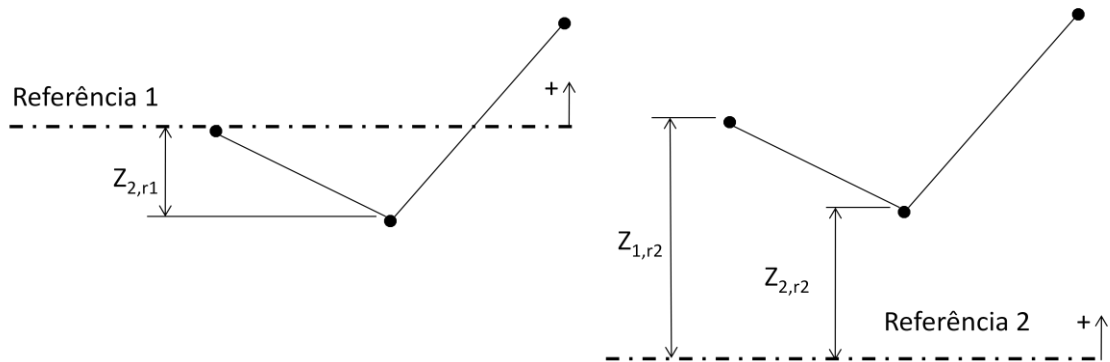
Caso 2: $Z_{2,r1} < 0$ 

FIGURA B. 128 - Referência (caso 2)

A relação abaixo é determinada observando os casos 1 e 2:

$$Z_{2,r2} = Z_{2,r1} + Z_{1,r2} \quad (\text{B. 2})$$

Onde:

$Z_{1,r1}$; $H_{1,r1}$; $P_{1,r1}$ = cota, carga e pressão do nó 1 e referencial 1 respectivamente;

$Z_{2,r1}$; $H_{2,r1}$; $P_{2,r1}$ = cota, carga e pressão do nó 2 e referencial 1 respectivamente;

$Z_{1,r2}$; $H_{1,r2}$; $P_{1,r2}$ = cota, carga e pressão do nó 1 e referencial 2 respectivamente;

$Z_{2,r2}$; $H_{2,r2}$; $P_{1,r2}$ = cota, carga e pressão do nó 2 e referencial 2 respectivamente.

- 1) Referência 1: A referência 1 é adotada pelo programa UFC6 nos cálculos do transiente hidráulico, portando a cota do primeiro nó é considerada nula.

$$H_{1,r1} = Z_{1,r1} + P_{1,r1} \quad (B.3)$$

$$P_{1,r1} = H_{1,r1} \quad (B.4)$$

$$H_{2,r1} = Z_{2,r1} + P_{2,r1} \quad (B.5)$$

$$P_{2,r1} = H_{2,r1} - Z_{2,r1} \quad (B.6)$$

- 2) Referência 2: A referência 2 é adotada pelo programa UFC6 na apresentação dos resultados. Portanto, a cota do primeiro nó é igual à cota na referência do nível do mar.

$$H_{1,r2} = Z_{1,r2} + P_{1,r2} \quad (B.7)$$

$$P_{1,r2} = H_{1,r2} - Z_{1,r2} \quad (B.8)$$

$$H_{2,r2} = Z_{2,r2} + P_{2,r2} \quad (B.9)$$

$$P_{2,r2} = H_{2,r2} - Z_{2,r2} \quad (B.10)$$

- 3) Mudança de referência: Para a apresentação dos resultados, é necessária a mudança da referência 1 para a referência 2, desse modo os resultados serão apresentados com base referencial ao nível do mar.

Observe que independente do referencial espacial adotado, a pressão é a mesma para o ponto considerado, portanto:

$$P_1 = P_{1,r1} = P_{1,r2} \quad (B.11)$$

$$P_2 = P_{2,r1} = P_{2,r2} \quad (B.12)$$

- Mudança de referência para o nó 1

$$P_1 = P_{1,r1} = P_{1,r2} = H_{1,r1} \quad (B.13)$$

$$H_{1,r2} = Z_{1,r2} + P_1 = Z_{1,r2} + H_{1,r1} \quad (B.14)$$

- Mudança de referência para o nó 2

$$P_2 = P_{2,r1} = P_{2,r2} = H_{2,r1} - Z_{2,r1} \quad (B.15)$$

$$H_{2,r2} = Z_{2,r2} + P_2 = H_{2,r1} + (Z_{2,r2} - Z_{2,r1}) \quad (B.16)$$

$$Z_{2,r2} = Z_{2,r1} + Z_{1,r2} \quad (B.17)$$

$$H_{2,r2} = H_{2,r1} + Z_{1,r2} \quad (B.18)$$

20. LIMITAÇÕES DO PROGRAMA

- 1) O UFC6 calcula apenas transientes hidráulicos gerados por interrupção do bombeamento, não permitindo, para a atual condição, a análise dos mesmos em sistemas por gravidade.
- 2) Por estar em desenvolvimento, o programa não dispõe de todos os elementos de contorno apresentados. Para posterior implementação estão os seguintes elementos: Válvula de Controle, Saída Livre e Extremidade Fechada.
- 3) Dessa forma, o modelo mostra flexibilidade somente nos nós internos, pois aceita para o primeiro nó o contorno Reservatório de Montante Bomba e Válvula de Retenção e para o último, o Reservatório de Jusante.
- 4) O sistema a ser avaliado deve possuir no máximo 31 nós, portanto, 30 trechos.
- 5) O UFC6 permite, no máximo, 80 subdivisões por trecho e 15000 intervalos de tempo computacional. Se esse número for excedido, o programa recalcula internamente o número de divisões para o menor trecho.