



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNO ARAÚJO PAIVA

**PROPOSIÇÃO DE EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA FRAÇÃO DE VAZIOS
INICIAL E DO COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO ATRAVÉS DA
ELABORAÇÃO DO MÉTODO DA CAVITAÇÃO COM VAZIOS E
AMORTECIMENTO DE ONDA**

FORTALEZA

2023

BRUNO ARAÚJO PAIVA

PROPOSIÇÃO DE EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA FRAÇÃO DE VAZIOS INICIAL
E DO COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO ATRAVÉS DA ELABORAÇÃO DO
MÉTODO DA CAVITAÇÃO COM VAZIOS E AMORTECIMENTO DE ONDA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Marco Aurelio Holanda de Castro, Ph.D.

Coorientador: Dr. João Marcelo Costa Barbosa.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P166p Paiva, Bruno Araújo.
Proposição de equações para estimativa da fração de vazios inicial e do coeficiente de amortecimento através da elaboração do método da cavitação com vazios e amortecimento de onda / Bruno Araújo Paiva. – 2023.
187 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurelio Holanda de Castro.
Coorientação: Prof. Dr. João Marcelo Costa Barbosa.
1. Fração de vazio. 2. Coeficiente de amortecimento. 3. Cavitação. 4. Celeridade variável. 5. Transiente hidráulico. I. Título.
-

BRUNO ARAÚJO PAIVA

PROPOSIÇÃO DE EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA FRAÇÃO DE VAZIOS INICIAL
E DO COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO ATRAVÉS DA ELABORAÇÃO DO
MÉTODO DA CAVITAÇÃO COM VAZIOS E AMORTECIMENTO DE ONDA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em 28/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marco Aurelio Holanda de Castro, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. José Roberto Goncalves de Azevedo, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dr. João Marcelo Costa Barbosa (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

E a todos que contribuíram e acreditaram nesta
conquista.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq).

Ao Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D. a quem já admirava antes mesmo de ingressar no Programa de Pós-Graduação. Minha mais sincera gratidão por me acolher como orientando, com paciência e prontidão e por acreditar em meu potencial.

Ao D. Sc. João Marcelo Costa Barbosa, pela coorientação e presteza, contribuindo fortemente da concepção ao desfecho da pesquisa.

Aos professores participantes da Banca examinadora, Prof. D. Sc. Paulo Roberto Lacerda Tavares, Prof. D. Sc. Alessandro de Araújo Bezerra, Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo, Ph.D. e Prof. D. Sc. Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo tempo e contribuição.

Ao corpo docente da Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recursos Hídricos.

Ao Vicente de Castro, colega de turma, parceiro de pesquisa disposto a ajudar todos, amigo e incentivador presente durante todo o trabalho.

Aos colaboradores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, que sempre estiveram à postos para tudo o que precisei. Em especial ao Erivelton, Shirley e Edineuza, que se empenham bastante em auxiliar-nos no dia a dia, em problemas diversos.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional (UFC), contribuindo com suas palavras de incentivo.

À minha mãe, Jucileide, exemplo de pessoa e mulher, minha fonte de luz e força, pelo amor e carinho recebidos. Ao meu irmão, Felipe, companheiro de todas as horas, sempre me incentivando e guiando. A meu pai, Francisco Luis, que mesmo distante, me motivou a estudar. À minha esposa, Bianca, manancial de amor e paz.

RESUMO

Adutoras são responsáveis pelo transporte de água em sistemas de abastecimento e podem sofrer danos devido à cavitação, resultando em um pico de pressão maior do que o previsto por modelos sem cavitação. Ignorar a cavitação em análises transitórias pode levar à ruptura da tubulação devido ao uso inadequado de dispositivos para mitigar o impacto. Portanto, recomenda-se considerar os efeitos colaterais, como cavitação transitória, separação de coluna e dissipação de energia, ao modelar computacionalmente esses sistemas. O objetivo deste trabalho foi propor uma equação da fração de vazio inicial de água e uma equação para o coeficiente de amortecimento da onda de pressão, mediante modelagem computacional da cavitação resultante do transiente em adutoras. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia, denominada de Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas (CMVWD). Ela incorpora os parâmetros: cavitação gasosa com celeridade variável, fator de atrito variável, consideração dos vazios e processo termodinâmico dentro da tubulação. A partir da CMVWD, do teorema de Vaschy-Buckingham e da análise estatística, foram também desenvolvidas as equações da fração de vazio inicial na água e do coeficiente de amortecimento. Este trabalho utilizou três modelos para a realização da modelagem computacional do golpe de aríete: o Modelo 1, composto apenas pelo método das características (MOC); o Modelo 2, utilizando o MOC, incluindo o *Discrete Gas Cavity Model* (DGCM); e o Modelo 3 é o CMVWD. Foram realizadas simulações para 12 casos diferentes e os resultados gerados foram comparados com os dados experimentais. Utilizou-se, para a análise dos resultados, a avaliação estatística através das métricas EQM e NSE. Nos resultados foram apresentados oito padrões de gráficos e três padrões de tabelas que se repetem para cada caso. Após a análise dos 12 casos, foram realizadas as proposições das equações da Fração do Vazio inicial de água e do coeficiente de amortecimento de onda K. De modo geral, os resultados obtidos do Modelo 3 se apresentaram mais próximos aos dados experimentais, comparado aos demais Modelos. A variação da fração de vazio inicial denotou que quanto menor o valor desta variável, mais curto será o comprimento da onda de pressão, resultando em aumento no número de picos. Constatou-se também que o parâmetro K é diretamente proporcional ao amortecimento da onda de pressão. Percebeu-se que as equações da fração de vazio inicial e do coeficiente de amortecimento desempenham um papel crucial na análise de fluxos cavitantes, uma vez que é essencial para os projetistas a utilização de métodos e modelos capazes de prever a quantidade de vazios no sistema e a sobrepressão resultante do colapso da separação de coluna. Essa pesquisa buscou

preencher uma lacuna existente na determinação da fração de vazio para o estado inicial e no amortecimento das ondas. Como conclusão, as novas equações propostas, juntamente com o método e modelo desenvolvidos, são altamente recomendados para a aplicação em sistemas reais de abastecimento de água, começando pelas adutoras em um sistema de macro distribuição. Essas ferramentas têm o potencial de aprimorar a capacidade de previsão do comportamento dos fenômenos transitórios nesses sistemas.

Palavras-chave: fração de vazio; coeficiente de amortecimento; cavitação; celeridade variável; transiente hidráulico.

ABSTRACT

Pipelines are responsible for transporting water in supply systems and can suffer damage due to cavitation, resulting in a higher pressure peak than predicted by models without cavitation. Ignoring cavitation in transient analysis can lead to pipeline rupture due to improper use of devices to mitigate the impact. Therefore, it is recommended to consider side effects such as transient cavitation, column separation and energy dissipation when computationally modeling these systems. The objective of this work was to propose an equation for the initial water void fraction and an equation for the damping coefficient of the pressure wave, through computational modeling of the cavitation resulting from the transient in water mains. For this, a methodology was developed, called the Cavitation Method with Voids and Wave Damping (CMVWD). It incorporates the parameters: gaseous cavitation with variable celerity, variable friction factor, consideration of voids and thermodynamic process within the pipeline. Based on the CMVWD, the Vaschy-Buckingham theorem and the statistical analysis, equations for the initial void fraction in water and the damping coefficient were also developed. This work used three models to carry out the computational modeling of water hammer: Model 1, composed only by the method of characteristics (MOC); Model 2, using the MOC, including the Discrete Gas Cavity Model (DGCM); and Model 3 is CMVWD. Simulations were performed for 12 different cases and the generated results were compared with the experimental data. For the analysis of the results, the statistical evaluation through the NSE and NSE metrics was used. In the results, eight patterns of graphics and three patterns of tables that are repeated for each case were presented. After the analysis of the 12 cases, the propositions of the equations of the Fraction of the initial void of water and the coefficient of damping of the K wave were carried out. In general, the results obtained from Model 3 were closer to the experimental data, compared to the others. Models. The variation of the initial void fraction denoted that the smaller the value of this variable, the shorter the pressure wave length will be, resulting in an increase in the number of peaks. It was also found that the K parameter is directly proportional to the damping of the pressure wave. It was noticed that the initial void fraction and damping coefficient equations play a crucial role in the analysis of cavitating flows, since it is essential for designers to use methods and models capable of predicting the amount of voids in the system and the overpressure resulting from the collapse of the column separation. This research sought to fill an existing gap in the determination of the void fraction for the initial state and in the damping of the waves. As a conclusion, the proposed new equations, together with the

developed method and model, are highly recommended for application in real water supply systems, starting with the mains in a macro distribution system. These tools have the potential to improve the ability to predict the behavior of transient phenomena in these systems.

Keywords: void fraction; damping coefficient; cavitation; variable speed; hydraulic transient.

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Ruptura de tubulações da Central Elétrica de Oigawa, Japão (1950).....	38
Fotografia 2 – Ruptura de adutora na Barragem de Jati, Estado do Ceará - Brasil (2020)	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Publicações relacionadas ao termo “transiente” na literatura mundial (1986 - 2022).....	40
Gráfico 2 –	Áreas de estudo nas quais o termo “golpe de aríete” é citado.....	41
Gráfico 3 –	Ranking dos autores cujas produções citam o termo “cavitação”	42
Gráfico 4 –	Porcentagem de publicações que citam o termo "transiente", por país de origem (1986 a 2022).....	43
Gráfico 5 –	Testes executados em planilha do software Excel, aplicando o Método de Atrito Variável de Brunone	94
Gráfico 6 –	Testes executados em planilha do software Excel, aplicando um modelo de atrito semiestacionário	94
Gráfico 7 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 1)	96
Gráfico 8 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 1)	97
Gráfico 9 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 1).....	98
Gráfico 10 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 1)	98
Gráfico 11 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 1)	99
Gráfico 12 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 1).....	99
Gráfico 13 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 1)	100
Gráfico 14 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 1).....	101
Gráfico 15 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 2)	103
Gráfico 16 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 2)	103

Gráfico 17 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 2).....	104
Gráfico 18 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 2)	105
Gráfico 19 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 2)	105
Gráfico 20 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 2).....	106
Gráfico 21 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 2)	107
Gráfico 22 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 2).....	107
Gráfico 23 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 3)	108
Gráfico 24 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 3)	108
Gráfico 25 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 3).....	109
Gráfico 26 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 3)	110
Gráfico 27 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 3)	110
Gráfico 28 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 3).....	111
Gráfico 29 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 3)	111
Gráfico 30 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 3).....	112
Gráfico 31 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 4)	114
Gráfico 32 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 4)	114

Gráfico 33 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial (Caso 4).....	115
Gráfico 34 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial e os dados experimentais (Caso 4)	115
Gráfico 35 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 4)	116
Gráfico 36 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 4).....	116
Gráfico 37 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 4)	117
Gráfico 38 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 4).....	118
Gráfico 39 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 5)	119
Gráfico 40 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 5)	119
Gráfico 41 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial (Caso 5).....	120
Gráfico 42 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial e os dados experimentais (Caso 5)	120
Gráfico 43 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 5)	121
Gráfico 44 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 5).....	121
Gráfico 45 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 5)	122
Gráfico 46 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 5).....	122
Gráfico 47 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 6)	123
Gráfico 48 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 6)	124

Gráfico 49 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 6).....	125
Gráfico 50 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 6)	125
Gráfico 51 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 6)	126
Gráfico 52 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 6).....	126
Gráfico 53 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 6)	127
Gráfico 54 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 6).....	127
Gráfico 55 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 7)	128
Gráfico 56 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 7)	128
Gráfico 57 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 7).....	129
Gráfico 58 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 7)	129
Gráfico 59 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 7)	130
Gráfico 60 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 7).....	130
Gráfico 61 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 7)	131
Gráfico 62 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 7).....	131
Gráfico 63 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 8)	133
Gráfico 64 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 8)	133

Gráfico 65 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial (Caso 8).....	134
Gráfico 66 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial e os dados experimentais (Caso 8)	134
Gráfico 67 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 8)	135
Gráfico 68 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 8).....	135
Gráfico 69 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 8)	136
Gráfico 70 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 8).....	136
Gráfico 71 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 9)	137
Gráfico 72 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 9)	138
Gráfico 73 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial (Caso 9).....	138
Gráfico 74 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazío inicial e os dados experimentais (Caso 9)	139
Gráfico 75 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 9)	139
Gráfico 76 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 9).....	140
Gráfico 77 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 9).....	140
Gráfico 78 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 9).....	141
Gráfico 79 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 10)	143
Gráfico 80 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 10)	143

Gráfico 81 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 10).....	144
Gráfico 82 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 10)	144
Gráfico 83 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 10)	145
Gráfico 84 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 10).....	145
Gráfico 85 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 10)	146
Gráfico 86 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 10).....	147
Gráfico 87 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 11)	148
Gráfico 88 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 11)	148
Gráfico 89 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 11).....	149
Gráfico 90 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 11)	149
Gráfico 91 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 11)	150
Gráfico 92 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 11).....	150
Gráfico 93 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 11)	151
Gráfico 94 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 11).....	151
Gráfico 95 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 12)	153
Gráfico 96 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 12)	154

Gráfico 97 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial (Caso 12).....	155
Gráfico 98 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazão inicial e os dados experimentais (Caso 12)	155
Gráfico 99 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 12)	156
Gráfico 100 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 12).....	156
Gráfico 101 –	Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 12)	157
Gráfico 102 –	Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 12).....	157
Gráfico 103 –	Dados experimentais e dados adimensionais do 1º cenário.....	158
Gráfico 104 –	Dados do 1º cenário da Fração de Vazão Inicial.....	162
Gráfico 105 –	Dados do 2º cenário da Fração de Vazão Inicial.....	163
Gráfico 106 –	Comparativo entre o MOC, Nova Equação “e” e os dados experimentais ..	165
Gráfico 107 –	Erro relativo entre o MOC e a Nova Equação da fração de vazão inicial.....	165
Gráfico 108 –	Envoltórias das ondas de pressão do Caso 5 no 1º cenário	166
Gráfico 109 –	Dados do 1º cenário do Coeficiente de Amortecimento	167
Gráfico 110 –	Comparativo entre o MOC, Nova Equação “K” e os dados experimentais	169
Gráfico 111 –	Erro relativo entre o MOC e a Nova Equação do coeficiente de amortecimento da onda.....	169
Gráfico 112 –	Envoltórias das ondas de pressão do Caso 8 no 1º cenário	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de cocitações dos autores cujas publicações usaram o termo “transiente” (1986 - 2022).....	42
Figura 2 – Mapa de coocorrência das palavras-chave mais utilizadas pelos autores cujas publicações usaram o termo “transiente” (1986 - 2022).....	44
Figura 3 – Linhas características do MOC	50
Figura 4 – Quadros da representação das zonas de cavitação formadas durante o fenômeno de separação de coluna na tubulação	55
Figura 5 – Cavitação e formação do colapso em uma tubulação	58
Figura 6 – Esboço do modelo de cavidade discreta	60
Figura 7 – Oscilações numéricas de pressão resultantes do DVCM.....	60
Figura 8 – Implementação computacional em linguagem de programação Java.....	86
Figura 9 – Interface da tela inicial do software UFC7	86
Figura 10 – Layout do experimento de Chaudhry (1990) no software UFC7.....	95
Figura 11 – Layout do experimento de Soares et al. (2015) no software UFC7.....	102
Figura 12 – Layout do experimento de Simpson (1986) no software UFC7	113
Figura 13 – Layout do experimento de Traudt (2016) no software UFC7.....	132
Figura 14 – Layout do experimento de Bergant e Simpson (1999) no software UFC7	142
Figura 15 – Layout do experimento de Adamkowski e Lewandowski (2006) no software UFC7	152

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Fluxograma simplificado dos métodos adotados	83
Fluxograma 2 – Fluxograma do processo de formulação da equação da fração de vazão inicial	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Dados relevantes de cada caso experimental utilizado neste trabalho	92
Tabela 2 –	Valores utilizados na simulação do Modelo 3.....	93
Tabela 3 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para Modelos 1, 2 e 3, com base em dados experimentais (Caso 1).....	97
Tabela 4 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 1).....	98
Tabela 5 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 1)	100
Tabela 6 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 1)	101
Tabela 7 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para os Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 2).....	104
Tabela 8 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 2).....	105
Tabela 9 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 2)	106
Tabela 10 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 2)	107
Tabela 11 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 3).....	109
Tabela 12 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 3).....	110
Tabela 13 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 3)	111
Tabela 14 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 3)	112
Tabela 15 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 4).....	114
Tabela 16 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 4).....	116

Tabela 17 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 4)	117
Tabela 18 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 4)	118
Tabela 19 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 5).....	119
Tabela 20 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 5).....	120
Tabela 21 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 5)	121
Tabela 22 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 5)	122
Tabela 23 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 6).....	124
Tabela 24 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 6).....	125
Tabela 25 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 6)	126
Tabela 26 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 6)	127
Tabela 27 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 7).....	129
Tabela 28 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 7).....	130
Tabela 29 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 7)	131
Tabela 30 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 7)	132
Tabela 31 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 8).....	134
Tabela 32 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 8).....	135

Tabela 33 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 8)	136
Tabela 34 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 8)	137
Tabela 35 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 9).....	138
Tabela 36 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 9).....	139
Tabela 37 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 9)	140
Tabela 38 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 9)	141
Tabela 39 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 10).....	143
Tabela 40 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 10).....	144
Tabela 41 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 10)	146
Tabela 42 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 10)	147
Tabela 43 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 11).....	148
Tabela 44 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 11).....	150
Tabela 45 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 11)	151
Tabela 46 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 11)	152
Tabela 47 –	Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 12).....	154
Tabela 48 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 12).....	155

Tabela 49 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 12)	156
Tabela 50 –	Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 12)	157
Tabela 51 –	Dados de entrada para cada cenário	161
Tabela 52 –	Resultado dos adimensionais no 1º cenário.....	161
Tabela 53 –	Resultado dos adimensionais no 2º cenário.....	162
Tabela 54 –	Dados estatísticos referentes às equações dos dois cenários	164
Tabela 55 –	Relatório comparativo entre as equações	164
Tabela 56 –	Dados estatísticos dos métodos analisados.....	165
Tabela 57 –	Dados estatísticos referentes à equação do cenário	167
Tabela 58 –	Relatório de desempenho da equação.....	168
Tabela 59 –	Dados estatísticos dos métodos analisados.....	169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
CB	Modelo de Convolução
CC	Condições de Contorno
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLF	Condição de Estabilidade de Courant-Friedrich-Levy
CMVWD	Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas
DGCM	<i>Discrete Gas Cavity Model</i>
DVCM	<i>Discrete Vapor Cavity Model</i>
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EQM	Erro Quadrático Médio
ER	Erro Relativo
ERM	Erro Relativo Médio
MDF	Método das Diferenças Finitas
MOC	<i>Method of Characteristics</i>
NSE	Coefficiente de Nash - Sutcliffe
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
SAA	Sistema de Abastecimento de Água

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Alfabéticos

a	Celeridade - $[LT^{-1}]$
$a_{j,k}$	Celeridade da onda em um passo de tempo k (atual) num trecho j - $[LT^{-1}]$
A	Área da seção transversal do tubo - $[L^2]$
c_l	Parâmetro adimensional referente à restrição do tubo no sistema - adimensional
C_N	Condição de Courant – adimensional
C	Constante desconhecida – adimensional
D	Diâmetro do tubo - $[L]$
e	Espessura da parede do tubo - $[L]$
E	Módulo de Young/Elasticidade do material - $[ML^{-1}T^{-2}]$
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach - adimensional
g	Aceleração da gravidade - $[LT^{-2}]$
H	Cota piezométrica - $[L]$
H_o	Cota piezométrica inicial - $[L]$
H_p	Cota piezométrica em cada seção computacional – $[L]$
H_b	Carga de pressão barométrica – $[L]$
J_q	Termo do atrito permanente - $[LT^{-2}]$
J_u	Termo do atrito variável - $[LT^{-2}]$
K	Coeficiente de amortecimento da onda de pressão – adimensional
K_f	Módulo de elasticidade volumétrica de um fluido - $[ML^{-1}T^{-2}]$
K^*	Módulo de elasticidade volumétrica de um fluido após um incremento ΔP - $[ML^{-1}T^{-2}]$
K_m	Módulo de elasticidade volumétrica efetivo de uma mistura gás/líquido - $[ML^{-1}T^{-2}]$
L	Comprimento do tubo – $[L]$
L, L_1, L_2	Operadores lineares do MOC – adimensional
M_g	Massa de gás livre – $[M]$
n	Constante anisotrópica - adimensional
P	Pressão de um fluido na tubulação - $[ML^{-1}T^{-2}]$
P_v	Pressão de vapor de um líquido - $[ML^{-1}T^{-2}]$
P_g^*	Pressão absoluta do gás - $[ML^{-1}T^{-2}]$

$P_{j,k-\Delta t}$	Pressão na tubulação em um passo de tempo $k - \Delta t$ (anterior) num trecho j - $[ML^{-1}T^{-2}]$
Q	Vazão volumétrica do fluido do tubo - $[L^3T^{-1}]$
R_g	Constante do gás – adimensional
R	Constante característica – adimensional
T	Temperatura absoluta – $[\theta]$
T_c	Tempo de fechamento da válvula - [T]
t	Tempo - [T]
t_{in}	Tempo de início da cavidade de vapor discreta – [T]
V_{VC}	Volume de cavidade de vapor discreto – $[L^3]$
V	Velocidade média do fluido na seção transversal do tubo - $[LT^{-1}]$
V_o	Velocidade no estado permanente - $[LT^{-1}]$
x	Espaço no eixo x - [L]
z	Elevação da tubulação – [L]

Símbolos Gregos

ΔP	Variação de pressão na tubulação - $[ML^{-1}T^{-2}]$
ΔH	Variação da carga piezométrica - [L]
Δt	Intervalo de tempo - [T]
Δx	Distância ou variação no espaço no eixo x - [L]
ε	Fração do volume de ar disperso - adimensional
ε_v	Fração de vazio disperso - adimensional
$\varepsilon_{j,k-\Delta t}$	Fração de vapor num passo de tempo $k - \Delta t$ (anterior) num trecho j - adimensional
$\varepsilon_{j,k}$	Fração do vapor num passo de tempo k (atual) num trecho j - adimensional
ρ	Massa Específica de um fluido - $[ML^{-3}]$
ρ_g	Massa Específica de um gás - $[ML^{-3}]$
ρ_l	Massa Específica de um líquido - $[ML^{-3}]$
ρ_m	Massa Específica de uma mistura gás/líquido - $[ML^{-3}]$
λ	Multiplicador da combinação linear do MOC – adimensional
θ	Característica do fechamento da válvula – adimensional
Φ	Constante desconhecida – adimensional

Símbolos Diversos

∂H	Variação diferencial parcial na carga de pressão - [L]
∂Q	Variação diferencial parcial na vazão volumétrica - [L ³ T ⁻¹]
dt	Variação diferencial do tempo - [T]
dx	Variação diferencial do comprimento da tubulação - [L]
∂t	Variação diferencial parcial no tempo - [T]
∂x	Variação diferencial parcial no espaço no eixo x - [L]
$\%V$	Fração de volume adicional de líquido – adimensional
ΔV	Volume adicional de líquido – [L ³]
V	Volume de líquido – [L ³]
V_m	Volume da mistura – [L ³]
V_v	Volume total de vapor - [L ³]
V_g	Volume total de gás - [L ³]
V_g^*	Volume total de gás após um incremento ΔP - [L ³]
V_l	Volume total de líquido - [L ³]
V_l^*	Volume total de líquido após um incremento ΔP - [L ³]
V_t	Volume total de gás + líquido - [L ³]
V_t^*	Volume total de gás + líquido após um incremento ΔP - [L ³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Problematização e contextualização	29
1.2	Objetivos.....	35
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>35</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>35</i>
1.3	Organização dos capítulos	36
2	REFERENCIAL TEÓRICO	37
2.1	Produção científica sobre transiente hidráulico: estudo bibliográfico.....	37
2.2	Transiente hidráulico: Método das Características (MOC).....	45
2.3	Fluxo bifásico: conceito histórico da cavitação.....	52
2.3.1	<i>Discrete Vapor Cavity Model - DVCM.....</i>	<i>59</i>
2.3.2	<i>Discrete Gas Cavity Model – DGCM.....</i>	<i>62</i>
2.4	Método da Celeridade Variável com o Modelo Politrópico Termodinâmico	65
2.5	Fator de atrito: semiestacionário e variável.....	73
2.5.1	<i>Semiestacionário.....</i>	<i>76</i>
2.5.2	<i>Modelos de Convolução</i>	<i>76</i>
2.5.3	<i>Modelos de Aceleração Instantânea.....</i>	<i>78</i>
3	METODOLOGIA	81
3.1	Critério de seleção dos dados experimentais	81
3.2	Método Numérico Proposto.....	81
3.3	Fluxograma de trabalho para modelagem computacional.....	83
3.4	Ferramentas para modelagem do Método	84
3.4.1	<i>Utilização do Excel.....</i>	<i>84</i>
3.4.2	<i>Utilização do Java e a implementação no UFC7.....</i>	<i>85</i>
3.5	Validação do modelo: métodos estatísticos	87
3.6	Proposição de uma equação da fração de vazio inicial	89
4	RESULTADOS.....	92
4.1	Experimento de Chaudhry (1990).....	94
4.1.1	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 1.....</i>	<i>95</i>
4.2	Experimento de Soares <i>et al.</i> (2015).....	101
4.2.1	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 2.....</i>	<i>102</i>

4.2.2	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 3</i>	107
4.3	Experimento de Simpson (1986)	112
4.3.1	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 4</i>	113
4.3.2	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 5</i>	118
4.3.3	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 6</i>	123
4.3.4	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 7</i>	128
4.4	Experimento de Traudt et al. (2016)	132
4.4.1	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 8</i>	133
4.4.2	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 9</i>	137
4.5	Experimento de Bergant e Simpson (1999)	141
4.5.1	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 10</i>	142
4.5.2	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 11</i>	147
4.6	Experimento de Adamkowski e Lewandowski (2006)	152
4.6.1	<i>Análise dos resultados obtidos do Caso 12</i>	153
4.7	Influência da variação da fração de vazio inicial nas envoltórias de pressões .	158
4.8	Proposição e análise de uma Nova Equação da Fração de Vazio Inicial para o cálculo do transiente hidráulico	159
4.9	Proposição e análise de uma Nova Equação do Coeficiente de Amortecimento para o Método de Aceleração Instantânea do Brunone	166
5	CONCLUSÃO	171
	REFERÊNCIAS	174
	APÊNDICE A - PLANILHA PARA O CÁLCULO DA CAVITAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO	184

1 INTRODUÇÃO

Este tópico visa abordar o conceito do fenômeno transitório em termos gerais, como também suas possíveis causas e consequências. Em seguida, serão descritos os métodos mais utilizados e as aplicações propostas no campo de estudo, além de assuntos complementares. Posteriormente, os objetivos gerais e específicos e, finalmente, a estrutura organizacional do trabalho serão expostos.

1.1 Problematização e contextualização

Para Netto e Fernández (2015, p. 407),

“Sistema de abastecimento de água” é o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável a um determinado consumidor (por exemplo, uma comunidade urbana) para fins de consumo doméstico, serviços públicos, industriais e outros usos.

O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) é subdividido nos sistemas: produtor, adutor e de distribuição.

Esta pesquisa focou-se nas adutoras, que podem ser de dois tipos, a depender de sua localização no SAA:

- a) Adutora de Água Bruta – localizada no Sistema Produtor, transporta água da Captação à Estação de Tratamento de Água;
- b) Adutora de Água Tratada – localizada no Sistema Adutor, transporta água da Estação de Tratamento de Água ao Reservatório.

Nas adutoras, a água pode ser conduzida por gravidade ou por recalque, de acordo com a topografia do local de instalação do SAA.

Dentre os fenômenos que ocorrem nesses sistemas, destaca-se o transitório hidráulico, definido como qualquer variação de pressão em um sistema hidráulico, normalmente associado a uma mudança no gradiente de velocidade. Pode ser provocado, por exemplo, pelo fechamento ou abertura de válvula, pela partida ou parada de uma bomba ou na mudança operacional de turbinas (Karadžić *et al.*, 2018).

Devido às variações operacionais já citadas, altas e baixas pressões são formadas, dando origem a uma onda com velocidade próxima do som no líquido (1.498,00 m/s). Devido à intensidade da onda, equipamentos do sistema de abastecimento de água, tais como bombas,

turbinas, válvulas e tubulações sofrem sérios riscos de serem danificados ou, ainda, de entrarem em colapso, ocasionando perdas materiais ou até mesmo humanas.

Recomenda-se um ótimo dimensionamento do SAA, para prever possíveis falhas, fenômenos adversos ou ambos em adutoras nas quais ocorram transiente hidráulico. Esta ação minimizaria os efeitos decorrentes do golpe de aríete (Azevedo Netto; Fernández, 2018).

Compreende-se então a importância do estudo do fluxo num regime transiente, demandando mais difusão nos cursos de Engenharia e conseqüentemente nas aplicações práticas de projetos hidráulicos (Barbosa, 2015).

Para melhor compreensão do transiente hidráulico, também conhecido como fluxo instável, devem ser considerados na modelagem computacional seus efeitos colaterais, tais como cavitação transitória, separação de coluna e dissipação energética (atrito) ao longo da tubulação (Adamkowski; Lewandowsky, 2009).

De acordo com Bergant *et al.* (2006), diferentes autores tais como Joukowski (1900), Alliévi (1902), Streeter (1969), Chaudhry (1979), Simpson (1986), Bergant (1991) e Covas (2003) vêm investigando o fenômeno transitório há mais de um século. Os estudos iniciaram-se em meio fluido, através da observação da propagação de ondas sonoras no ar. Posteriormente a pesquisa avançou para o estudo da movimentação de ondas em águas rasas e do fluxo de sangue nas artérias.

Desde meados de 1960 até hoje, os métodos aplicados computacionalmente têm dado um grande salto, tornando possível modelar adutoras de água, emissários, redes de distribuição de água, além de dispositivos que atenuam o efeito do golpe de aríete (transiente hidráulico) como: ventosas, chaminés de equilíbrio, reservatório hidropneumático, entre outros (Chaudhry, 2014; Wylie *et al.*, 1993).

O Método das Características (MOC) destaca-se como o mais utilizado para o cálculo do transiente hidráulico unidimensional. No MOC, realiza-se uma transformação linear das equações da continuidade e do momento transformando-as em equações diferenciais ordinárias.

As equações do momento e da continuidade, que governam o fluxo hídrico em tubulações e, conseqüentemente transiente hidráulico, são equações diferenciais parciais lineares de 2ª ordem Quasi-Hiperbólica. Elas são transformadas em equações homogêneas através de um transformador linear e da aplicação do método das diferenças finitas. Dessa forma, passam a possuir somente uma variável independente (Ferreira *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2015).

O MOC possui facilidade na aplicação computacional por conta de sua relativa simplicidade ao resolver equações. Devido a essa característica, ampliou-se o nível de análise técnica através de modelos mais complexos, tornando possível prever colapsos em sistemas hidráulicos, que podem ser provocados por variações de sobrepressões acima e subpressões abaixo do limite suportado pela tubulação.

Nesse contexto, os bolsões de ar presos e os gases dissolvidos podem intensificar o golpe, pois os gases podem expandir-se quando submetidos a baixas pressões e comprimir-se em altas pressões (Quilodrán J. T., 2018a, 2018b).

De forma elucidativa, os efeitos do ar aprisionado ou bolsões de ar, podem depender de alguns aspectos, tais como, características do fluido, natureza e causa do transitório, topologia do sistema envolvido, baixa carga no sistema ou situações de rápido transitório (Ivljanin *et al.*, 2018).

Esse vapor ou gás pode estar presente em qualquer região da tubulação, no entanto, ao preencher toda a seção da tubulação, forma-se uma cavidade de vapor ocasionando eventualmente uma separação de coluna no líquido. Em seguida, essa coluna é colapsada formando altas pressões, prejudicando significativamente a tubulação (Santoro *et al.*, 2018).

Bergant e Simpson (1999), no estudo sobre separação de coluna, relataram a existência dos dois principais problemas associados à cavitação em condutos forçados. O primeiro foi o colapso das cavidades ao atingirem grandes proporções e o segundo, a rejunção abrupta da coluna líquida na ocorrência de separação de coluna. Em ambos os casos, grandes pressões foram formadas.

Com a geração do fenômeno transitório, forma-se a chamada celeridade da onda que poderá atingir a velocidade do som. Entretanto, os cientistas Adamkowski e Lewandowski (2009), Bergant *et al.* (2017); Daude *et al.* (2018), Pezzinga e Santoro (2017) e Soares *et al.* (2015) afirmaram que a propriedade de compressibilidade dos gases na mistura (gás e líquido) diminuem a velocidade da onda e conseqüentemente uma dispersão nas ondas de pressão geradas pelo transitório. Devido a este fato, a celeridade da onda pode diminuir em até 75%, dependendo do teor de gás no líquido (Chaudhry, 2014).

Para consideração do gás juntamente com o líquido dentro da tubulação em um sistema de adução de água, ou seja, em um fluxo bifásico, têm-se os dois métodos mais utilizados para simulação computacional que são o Método da Cavidade de Vapor Discreto (DVCM) e o Método da Cavidade de Gás Livre Discreto (DGCM). Ambos utilizam o Método das Características como base numérica. Zhou *et al.* (2018) e Soares *et al.* (2017) relataram que

o DGCM reproduz resultados mais aceitáveis, pois as cavidades formadas pelos gases são distribuídas ao longo de cada seção da tubulação.

Quando há gás dentro da tubulação, pode-se denominar de fluxo bifásico ou sistema com cavitação. Esse sistema é amplamente estudado até os dias atuais, pois seu entendimento é essencial para melhor compreensão do fenômeno transitório.

No entanto, a análise em sistemas cavitantes causa aumento de complexidade da modelagem computacional, pois variáveis como: a fração de vazio do fluido, o coeficiente politrópico, o coeficiente de dissipação de Brunone, são de difícil obtenção matemática.

Deste modo, para solucionar esse problema, recorreu-se à adimensionalização das variáveis baseadas em testes experimentais. Com isso, novas variáveis adimensionais foram desenvolvidas por intermédio de testes experimentais associados a um modelo numérico. Isto causou um avanço para ciência da engenharia hidráulica, preenchendo parte da lacuna do conhecimento (Wylie, E. B.; Streeter, V. L.; Suo, 1993).

Para Wylie *et al.* (1993) e Chaudhry (2014), apesar do desenvolvimento teórico da análise dos transitório ter avançado nas últimas décadas, ainda se notam consideráveis divergências entre os dados numéricos e os dados experimentais.

Para isso, métodos numéricos que utilizam celeridade variável, cavitação, atrito variável, expansão e compressão do gás precisam ser amplamente estudados e desenvolvidos numericamente a partir das teorias existentes na literatura (Dinh Tam, 2009).

No presente trabalho, desenvolveu-se uma metodologia a fim de analisar e resolver numericamente as equações do transiente hidráulico, utilizando os métodos do atrito variável e da cavitação com celeridade variável, realizando a consideração da fração de vazio inicial e respeitando os processos termodinâmicos. Portanto, para melhor compressão do desenvolvimento do método numérico foram expostos todos os métodos que fazem parte do modelo proposto.

Aplicou-se neste trabalho o método inercial elástico desenvolvido por Wylie *et al.* (1993). No entanto, para simulação de fenômenos transitórios pode-se utilizar tanto os modelos inerciais rígidos como os modelos inerciais elásticos (Miji Cherian *et al.*, 2022).

Outro método utilizado neste trabalho foi o DGCM de celeridade variável. Segundo Dinh Tam (2009), em um mesmo instante, é possível ter variações de velocidade de onda devido a variações de propriedade do fluido. Assim sendo, ignorar a variação da velocidade de onda poderia levar a erros na previsão do transiente real.

Já os autores Lee *et al.* (2008) produziram um método de velocidade de onda variável que leva em consideração a variação local dessa velocidade devido ao conteúdo de ar local e aos seus respectivos efeitos.

Foram utilizados dois grupos (modelos de convolução e modelos de aceleração instantânea) na análise da dissipação de energia de um fluxo transitório. Os modelos de convolução são dependentes da convolução do histórico de acelerações, com uma função de ponderação. Já os modelos de aceleração instantânea são dependentes da aceleração instantânea, da aceleração convectiva e do coeficiente de amortecimento (Abdeldayem *et al.*, 2021; Bergant *et al.*, 2001a; Urbanowicz; Zarzycki, 2012a; Zhou *et al.*, 2021).

Para melhorar a compreensão do golpe de aríete, Bergant *et al.* (2017); Ferreira *et al.* (2015); Soares *et al.* (2015); Vardy e Brown (2004) e Vítkovský *et al.* (2004) unificaram modelos com suas devidas adequações ao sistema hidráulico simulado, tais como os modelos:

- a) viscoelásticos, propostos por Zhu *et al.* (2018);
- b) com fator de atrito variável, propostos por Jensen *et al.* (2018);
- c) com celeridade variável, propostos por Dinh Tam (2009).

Esses modelos foram usados como complementares ao modelo elástico clássico (MOC).

No entanto, um método que incorpore a cavitação gasosa, a celeridade e o fator de atrito variável, acrescido à consideração dos vazios e ao processo termodinâmico dentro da tubulação ainda não havia sido estudado. Essa união de métodos poderá contribuir para a compreensão geral do golpe de aríete, desde que dados experimentais estejam disponíveis. Promoverá ainda, o aprofundamento teórico da influência dos vazios em um sistema hidráulico de tubulações pressurizadas.

Visando preencher essa lacuna, o presente trabalho propõe uma equação da fração de vazio inicial de água e uma equação do coeficiente de amortecimento da onda de pressão no transitório em condutos forçados.

Para a elaboração dessas equações foi necessário o desenvolvimento de um novo método, denominado de Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas (Cavitation Method with Voids and Wave Damping - CMVWD). Considerando, para isso, um fluxo bifásico por meio do DGCM, com celeridade e fator de atrito variáveis; além do processo termodinâmico, que consiste em um processo adiabático politrópico com a expansão e compressão do gás.

Nesse novo método CMVWD, unificou-se o ar e o gás da mistura bifásica em uma variável adimensional chamada de fração de vazio, ou seja, tudo que não é líquido será considerado nessa variável, respeitando o processo adiabático (Araújo Paiva *et al.*, 2021).

Foram verificados valores para a fração de vazios inicial e do coeficiente de amortecimento da onda de cada caso experimental disponível, buscando o melhor ajuste em relação aos dados experimentais para cada caso.

Posteriormente foi analisada a influência da fração de vazio inicial e do coeficiente “k” na modelagem do transitório hidráulico, por meio de comparações entre três modelos computacionais.

Para a análise, foram adotados três valores da fração de vazio inicial e do coeficiente de “k”. O valor central, para cada caso, é o mais otimizado em comparação aos dados experimentais. Os valores acima e abaixo são considerados para verificar a sensibilidade dos parâmetros.

Comparando com dados experimentais, fazendo uso de métodos estatísticos. Por fim, foram criadas duas equações inéditas: uma para a fração de vazio inicial e outra para o coeficiente de amortecimento correlacionando 12 experimentos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Propor uma equação da fração de vazio inicial de água e uma equação para o coeficiente de amortecimento da onda de pressão, mediante modelagem computacional da cavitação resultante do transiente em adutoras.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho foram motivados pela proposta de duas equações: uma equação da fração de vazio inicial de água e outra para o coeficiente de amortecimento da onda de pressão. Ambas obtidas por meio de modelagem computacional da cavitação no transiente hidráulico.

Assim, como meio de alcançar o objetivo principal, alguns outros objetivos específicos foram estabelecidos:

- a) desenvolver um método para determinar a nova equação da fração de vazio inicial e uma nova equação para o coeficiente de amortecimento da onda de pressão, sendo considerados:
 - o fluxo bifásico;
 - a velocidade da onda variável com o tempo;
 - o atrito variável com o tempo;
 - o processo termodinâmico.
- b) desenvolver um método com rotinas que permitam verificação numérica do transiente hidráulico utilizando o método da aceleração instantânea em sistema com cavitação;
- c) implementar o método proposto neste trabalho, no programa para cálculo do transiente hidráulico (UFC7), desenvolvido em linguagem de programação Java;
- d) validar as rotinas propostas com o auxílio de dados experimentais disponíveis na literatura. Os dados experimentais representam características diversas de vazão, pressão e comprimento da tubulação;

- e) analisar, através de métodos estatísticos, qual a melhor fração de vazio inicial e melhor coeficiente de amortecimento para cada experimento;

1.3 Organização dos capítulos

Capítulo 1 – Definição e contextualização do fenômeno transiente e da lacuna de pesquisa, bem como os objetivos, a justificativa e a importância da realização do trabalho.

Capítulo 2 – Estudo bibliográfico e definição do transiente hidráulico, desenvolvimento das equações do Método das Características, conceito histórico do fluxo bifásico e de seus modelos; desenvolvido do Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas que foi utilizado no trabalho, conceito sobre atrito quase-estável e atrito variável, juntamente com os modelos utilizados.

Capítulo 3 – Informações sobre os dados experimentais, modelo proposto (Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas) e seu fluxograma de operação, *softwares* utilizados.

Capítulo 4 – Resultado da modelagem computacional de cada experimento testado: Adamkowski e Lewandowski (2006), Bergant e Simpson (1999), Chaudhry *et al.* (1990), Simpson (1986), Soares *et al.* (2015) e Traudt *et al.* (2016) juntamente com as comparações e análises por intermédio de métodos estatísticos. Validação do modelo e criação dos adimensionais de fração de vazio inicial e coeficiente de amortecimento.

Capítulo 5 – Conclusão dos estudos com ênfase no novo método proposto e as novas equações da fração de vazio inicial e do coeficiente de amortecimento da onda de pressão e as recomendações de trabalho futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica do presente trabalho busca embasar desde o conceito básico de transiente hidráulico até os assuntos mais pertinentes para desenvolvimento da pesquisa. Assim, uma base conceitual será construída a fim de fundamentar a metodologia. Enfatiza-se que a diversidade de métodos apontados na pesquisa possibilitará ao leitor uma visão ampla do fenômeno transitório.

O material evidenciado foi obtido através de pesquisas realizadas em plataformas digitais tais como, *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar* e em livros consagrados da área como *Applied Hydraulic Transients*, *Fluid Transients in Systems* e *Manual de Hidráulica*.

2.1 Produção científica sobre transiente hidráulico: estudo bibliográfico

Para iniciar os estudos, a análise bibliométrica é fundamental para conhecer as bases literárias abordadas e as lacunas do conhecimento de um determinado tema, de tal forma que essa metodologia vem sendo amplamente utilizada por pesquisadores. O uso dessa abordagem possibilita uma visão quantitativa dos trabalhos estudados, os principais autores da área, como também as palavras-chave do tema (Rodrigues, 2014).

Com foco no levantamento de trabalhos acadêmicos relacionados ao tema do presente trabalho, o processo de seleção das publicações foi realizado em três etapas. De início realizou-se uma busca iterativa no *Scopus*, com utilização do termo “*water hammer*”. Dessa forma obteve-se 1.323 trabalhos divididos entre artigos, conferências, *reviews* e livros. Reforça-se que a única restrição feita para o levantamento foi a abrangência do período, limitada entre 1966 e 2022.

Em seguida, aumentou-se algumas restrições. O período foi reduzido para 1986 a 2022 e o idioma das publicações, apenas para inglês, espanhol e português. Assim o número do acervo reduziu para 884. Vale sublinhar que esta pesquisa não teve o intuito de coletar e analisar toda a bibliografia vinculada ao tema “transiente”, mas obter informações suficientes para satisfazer o objetivo geral da pesquisa.

A etapa posterior foi a inclusão das palavras-chave que têm relação mais direta com o tema proposto na tese. Utilizou-se para isso os termos: “*water hammer*”, “*transiente*” e “*cavitation*”. Posto isto, o número de publicações decresceu para 127.

Percebeu-se maior solidez aos dados obtidos, evitando publicações sem relação com o objetivo do trabalho. Desta forma, obteve-se dados interessantes sobre a importância da pesquisa no âmbito global e sobre os principais cientistas que estudam transiente com fluxo cavitante.

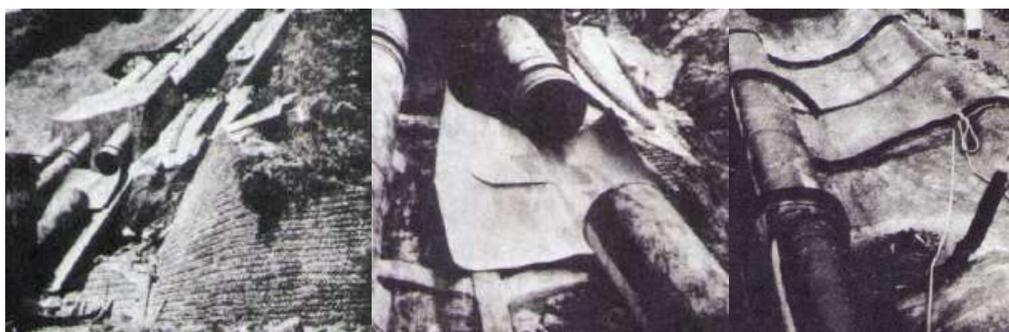
Salienta-se que através da análise bibliométrica pôde-se conhecer a evolução histórica das pesquisas em transiente hidráulico. No entanto, antes de relatar este avanço, iremos nos expor e aprofundar o conceito do fenômeno transitório.

Define-se o transiente hidráulico como um termo utilizado para referir-se às flutuações de pressão verificadas em uma tubulação pressurizada de água, resultando em alterações na velocidade do fluxo, devido à ação ou mudança operacional de alguns equipamentos, tais como, válvulas, turbinas e bombas (Florêncio *et al.*, 2022).

Essas alterações funcionais nos equipamentos provocam uma onda que é propagada ao longo da tubulação, formando variações de pressões que podem ocasionar danos físicos, materiais ou ambos.

Em 1950, na cidade de Oigawa, no Japão, uma central elétrica teve seu segmento de tubulação rompido por sobrepressões e mais adiante teve outro segmento esmagado por altas subpressões (Fotografia 1) (Chaudhry, 2014).

Fotografia 1 – Ruptura de tubulações da Central Elétrica de Oigawa, Japão (1950)



Fonte: Bonin (1960 *apud* CHAUDHRY, 2014).

Além de ser utilizado para minorar quantitativa e qualitativamente os danos nas tubulações, o estudo do transiente poderá ainda ser potencializado para uso em aplicações de análise de falha, para monitoramento de condições e auxiliar no projeto de medidas de proteção, a fim de evitar, exemplificativamente, ruptura na tubulação (Ruben *et al.*, 2019).

Faz-se necessário destacar que a condição transiente tem curtíssimo período de duração, ocorrendo entre duas situações permanentes. Por esse motivo, não há tempo suficiente

para evitar um possível rompimento de sistema hidráulico após manobra malsucedida de uma válvula ou bomba (Zhu *et al.*, 2018).

Em 21 de agosto de 2020, na cidade de Jati, sul do Ceará, Brasil, ocorreu o rompimento de uma adutora, parte do Projeto de Integração do Rio São Francisco. Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR – houve falhas na instalação e na operação das válvulas pertencentes à tubulação do Ramal 2 do empreendimento (Fotografia 2).

Fotografia 2 – Ruptura de adutora na Barragem de Jati, Estado do Ceará - Brasil (2020)



Fonte: Site G1 globo (2020).

A alteração funcional da válvula causou, portanto, o colapso da estrutura, motivado por uma pressão transiente. Este fato ratifica a importância da modelagem computacional para prevenção do golpe de aríete em sistemas hidráulicos de adução de água.

Fatos mostram que, apesar das evoluções históricas dos estudos relacionados ao golpe de aríete, a ruptura e o colapso de sistemas hidráulicos ainda acontecem. Portanto, uma difusão maior desse conhecimento está se tornando peça fundamental para prevenção de possíveis danos ambientais, materiais ou humanos (Barbosa, 2015).

As pesquisas sobre transiente hidráulico ou golpe de aríete começaram, entre o final do século XIX e início do século XX, com os estudos de Michaud (1878), Joukowski (1900) e Alliévi (1902). O ponto de partida dos estudos sobre o fenômeno transiente constitui a base da teoria clássica, ao mostrar que a carga máxima em uma tubulação pode ser obtida pela equação de Joukowski (1) (Bergant *et al.*, 2006).

$$H = \frac{a \cdot V}{g} \quad (1)$$

Em que:

a – celeridade da onda [L.T⁻¹]

V – velocidade média do fluido [L.T⁻¹]

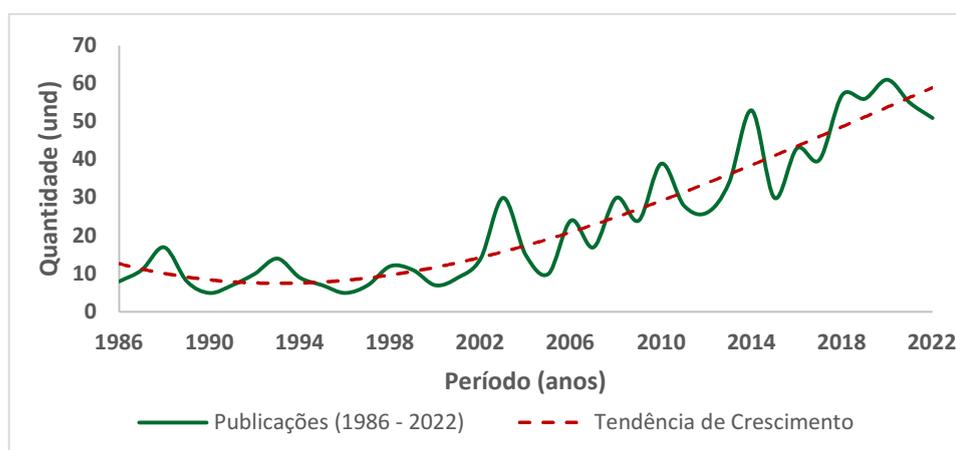
g – aceleração gravitacional [L.T⁻²]

Anos depois, em 1932, Schnyder desenvolveu um método gráfico para solucionar as condições transientes, chamado de Schnyder-Bergeron. Desta maneira, pôde-se calcular os termos de velocidade e pressão de uma tubulação com o auxílio de um gráfico, a partir das condições iniciais dos contornos disponíveis (Bergant *et al.*, 2006).

Devido ao advento dos computadores, em meados de 1960 o método de Schnyder-Bergeron foi substituído por métodos mais complexos, como o Método das Características. Desta forma, termos que antes eram desconsiderados, como o fator de atrito e a compressibilidade do fluido, foram incorporados na modelagem, a fim de obter resultados mais precisos (Wylie *et al.*, 1993).

Com essa evolução, o Método das Características tornou-se o mais utilizado até os dias atuais para resolução de transientes hidráulicos com fluxo unidimensional. Isso tornou-se peça fundamental para as crescentes publicações relacionadas ao termo “transiente”, que nas últimas duas décadas tiveram aumento significativo em relação às décadas anteriores, ultrapassando 60 publicações no ano de 2020, número muito maior que as 12 publicações em 1998 (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Publicações relacionadas ao termo “transiente” na literatura mundial (1986 - 2022)

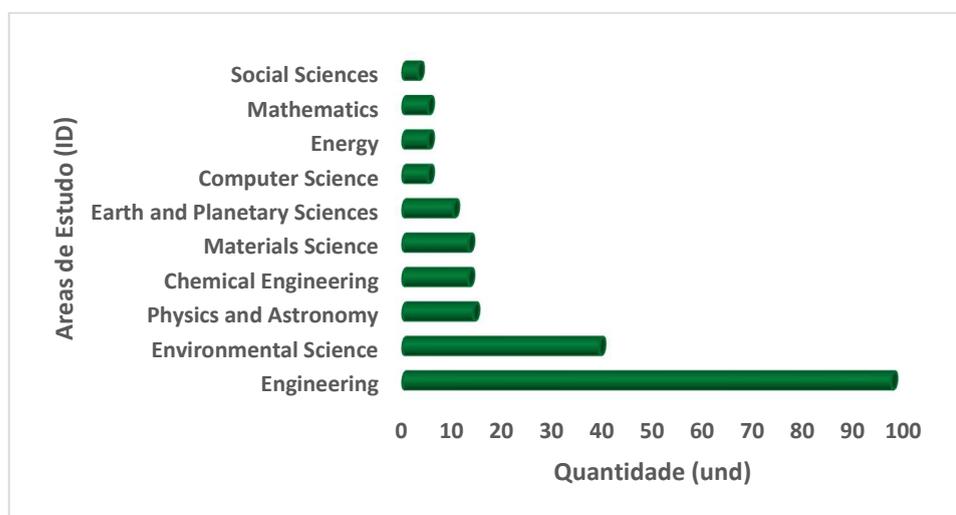


Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados do Scopus (2023).

Outro aspecto importante é que essa crescente nos estudos relacionados ao golpe de aríete foi motivada pelo interesse na segurança hidráulica e pela preocupação em preservar os meios ambientais, materiais e humanos.

Reforça-se que os métodos numéricos aplicados computacionalmente facilitaram a crescente pluralidade dos estudos, permitindo-lhes que não ficassem restritos às áreas da Engenharia (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Áreas de estudo nas quais o termo “golpe de aríete” é citado



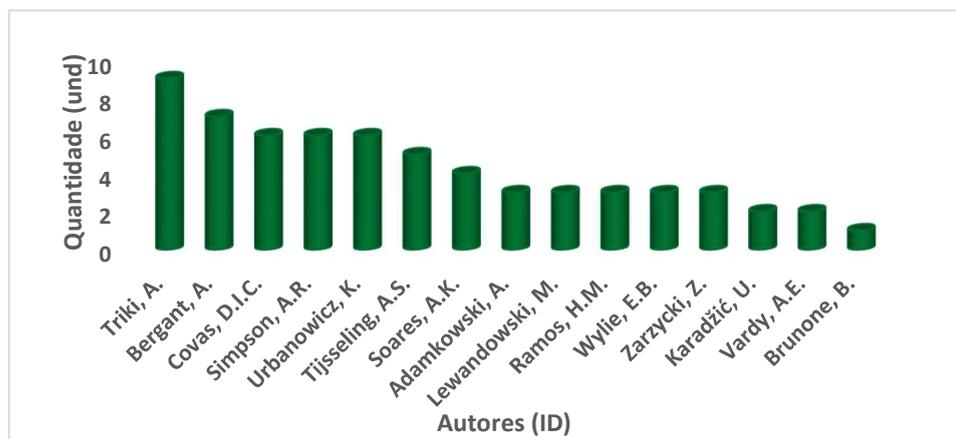
Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados do *Scopus* (2023).

Essa diversidade de questões disciplinares, com vários estudiosos de formações acadêmicas distintas, tais como, químicos, cientistas da computação, cientistas sociais, matemáticos e demais estudiosos de áreas afins da Engenharia em geral, contribuíram para a evolução teórica e prática do transiente.

Selecionou-se então, as dez principais áreas de estudo que mais publicaram e constatou-se que, apesar dessa pluralidade latente das áreas que se interessam pelo tema “transiente”, grande parte das publicações são na área de Engenharia, chegando a 47% do total. Em seguida, apareceram as Ciências Ambientais com 19% do total e os quase 30% restantes ficaram distribuídos entre outras categorias.

Já que a Engenharia concentra o maior número de publicações, foi possível averiguar os principais autores atuantes no campo de pesquisa em transiente. É importante lembrar que como a pesquisa incluiu o termo “*water hammer*”, “*transiente*” e “*cavitation*”, ficou claro que há diversos autores que publicam na área de interesse do presente estudo (Gráfico 3).

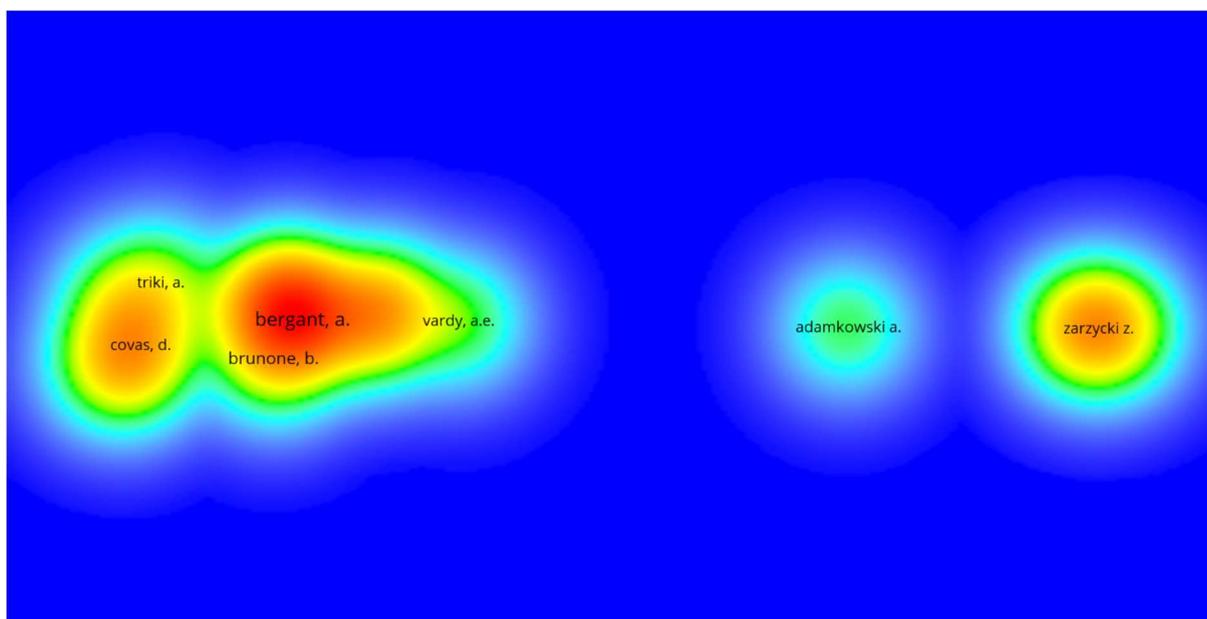
Gráfico 3 – Ranking dos autores cujas produções citam o termo “cavitação”



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados do *Scopus* (2023).

Ao pesquisar autores cujas publicações usaram o termo “transiente” foi possível identificar os mais citados e aqueles cujas pesquisas apresentaram similaridades entre si (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de cocitações dos autores cujas publicações usaram o termo “transiente” (1986 - 2022)



Fonte: Elaborado pelo autor com o *software VOSviewer* (2023).

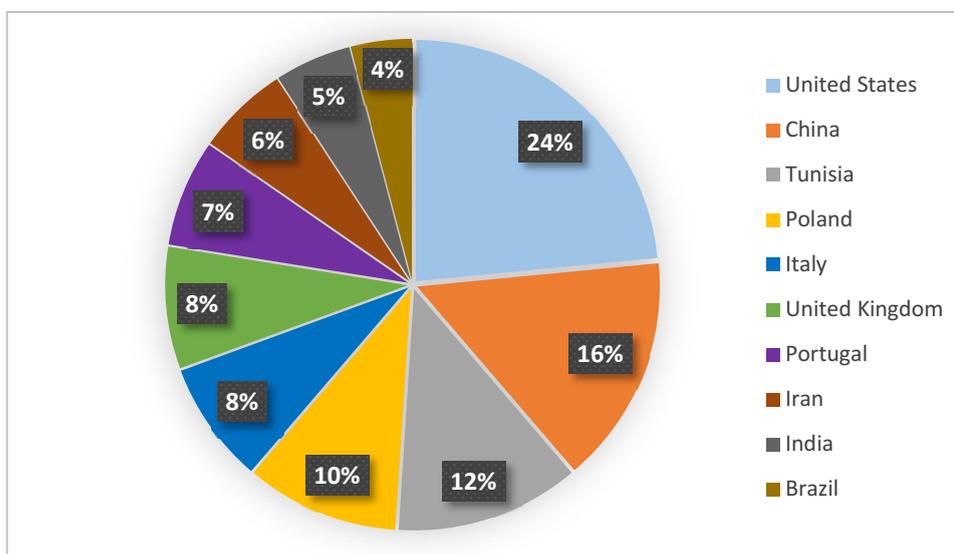
A região mais avermelhada indicou maior quantidade de citações do autor e, por outro lado, a região cuja coloração tende para o azul apontou que o autor teve menos citações. A densidade entre as citações assinalou a similaridade entre as pesquisas; quanto maior a aglomeração entre as citações, mais semelhantes são as pesquisas dos autores.

Importante acentuar que a distância entre as citações não significa que os trabalhos apresentaram vieses independentes. Exemplificando, um autor realizou um trabalho com o objetivo principal na modelagem computacional, porém, dentro de sua pesquisa, há citações que não necessariamente são voltadas à modelagem. Isso faz com que haja uma maior distância em termos de densidade nas citações.

Portanto, entende-se que o tema em estudo possui pluralidade latente de conteúdos produzidos em diversas áreas sem relação mútua. Por outro lado, podemos ver que os autores mais consolidados, tais como, Bergant, Vardy, Covas, entre outros têm um maior número de citações aos seus trabalhos. Isso deve-se ao fato da consolidação numérica matemática provada por ensaios experimentais, passando mais confiabilidade em seus estudos.

Outro dado observado foi o da concentração de referências em alguns países. A título de exemplo, os autores residentes nos Estados Unidos e na China detêm, respectivamente, 24% e 16% das publicações totais. Quase metade das obras publicadas mundialmente concentram-se entre os dois países (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Porcentagem de publicações que citam o termo "transiente", por país de origem (1986 a 2022)



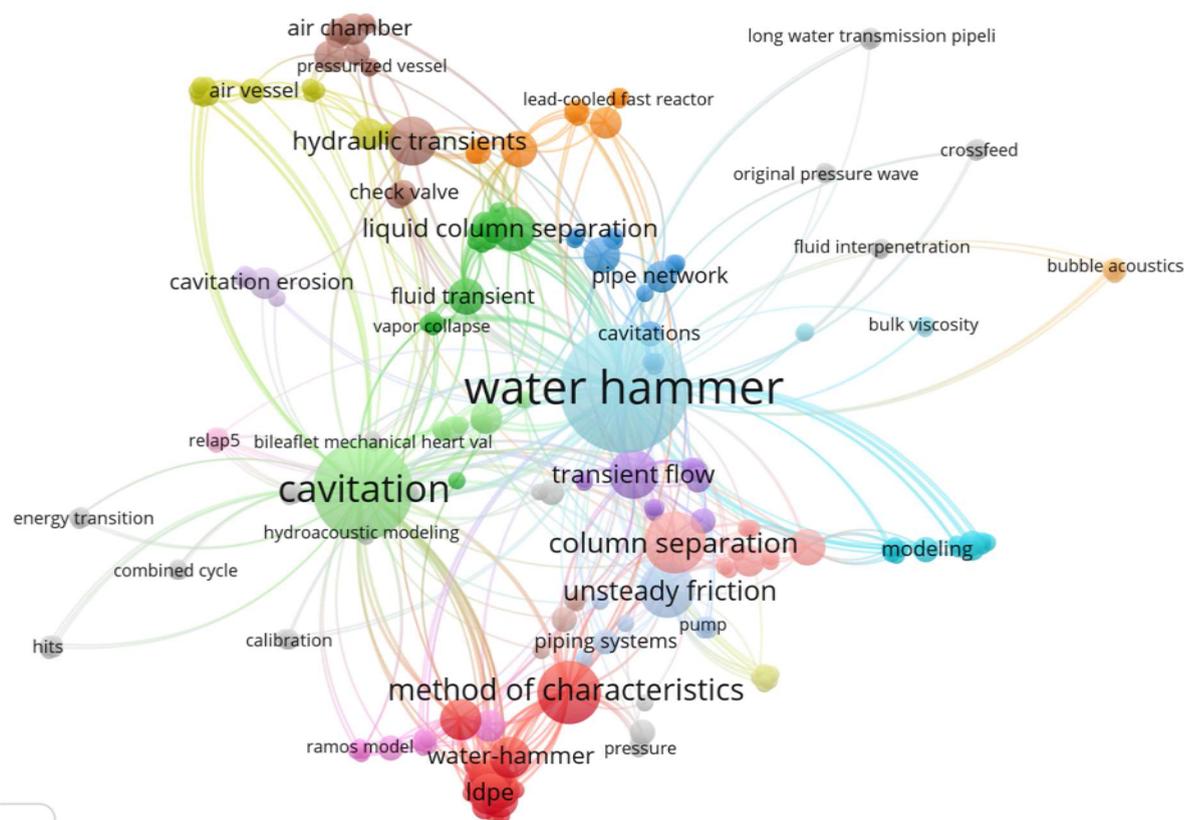
Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados do *Scopus* (2023).

Entende-se que esse destaque esteja relacionado a uma maior quantidade de grupos que pesquisam transiente. Embora haja dois países com maior representatividade, outros vêm produzindo trabalhos acadêmicos no tema com grande relevância, como é o caso de Portugal, mais precisamente através da Universidade de Lisboa.

O termo “transiente hidráulico” é multidimensional, apresentando conexões entre diversas áreas. É apresentado um mapa de coocorrência das palavras-chave mais mencionadas pelas publicações com o termo golpe de aríete, transiente e cavitação pesquisadas no banco de dados do *Scopus*. Observa-se que quanto maior o número de ligações e de proximidade entre os termos os trabalhos terão mais conexão. No centro da rede se encontra o termo “*water hammer*” (golpe de aríete), que é conectada a todos os “*clusters*” (Figura 2).

Ao utilizar o *software VOSviewer* para analisar as palavras-chave mais mencionadas entre as 127 publicações filtradas no banco de dados *Scopus*, observou-se que quanto maior o número de ligações e a proximidade entre os termos, maior a conexão entre os trabalhos. O termo “transiente hidráulico” é, por conseguinte, multidimensional, apresentando conexões entre diversas áreas (Figura 2).

Figura 2 – Mapa de coocorrência das palavras-chave mais utilizadas pelos autores cujas publicações usaram o termo “transiente” (1986 - 2022)



Fonte: Elaborado pelo autor com o *software VOSviewer* (2023).

O mapa é dividido entre grupos de “*cluster*” que tem como destaques, palavras-chave deste trabalho. O principal grupo é o “*water hammer*” que interliga todos os outros grupos e em segundo lugar de relevância aparece o grupo “*cavitation*” que enfatiza os estudos voltados

ao fluxo bifásico. Outro grupo relevante é o “*method of characteristics*” que interliga os estudos voltados ao fluxo bifásico e aos estudos de atrito variável. Outros grupos com menor relevância também fazem parte dos estudos transientes. Deste modo entende-se que os estudos do golpe de aríete são inter, multi e transdisciplinar.

Percebe-se uma pluralidade nas áreas que estudam o tema transiente, com maior representatividade das áreas de Engenharia. Em relação aos países, os Estados Unidos e a China têm maior concentração de pesquisadores do tema, porém há outros países com grupos importantes de estudo, que é o caso de Portugal. Em termos gerais, nota-se uma contribuição pequena do Brasil na ciência voltada aos estudos de transitório, provavelmente devido à poucos grupos de estudos na área.

Por fim, os resultados da análise bibliométrica indicam uma tendência de crescimento da produção internacional sobre transiente hidráulico, principalmente nas últimas duas décadas (2010 a 2022).

2.2 Transiente hidráulico: Método das Características (MOC)

Os modelos numéricos computacionais são ferramentas que têm por propósito reproduzir o comportamento de um sistema físico. Desse modo, uma solução de método numérico é associada às equações matemáticas de forma a transformar o modelo em uma sequência ordenada de operações numéricas (Simpson; Bergant, 1994).

Isto posto, para analisar os transientes hidráulicos de uma tubulação pressurizada há dois modelos numéricos. O primeiro é o da coluna rígida, utilizado para investigar os fenômenos de oscilação de massas, ou seja, transitórios lentos com baixa frequência; o segundo é o da coluna elástica, empregado para análise do golpe de aríete, ou seja, transitórios rápidos com alta frequência (Fuertes-Miquel *et al.*, 2019a, 2019b).

Vale enfatizar que as modelagens numéricas computacionais presentes nesse trabalho são embasadas no modelo elástico utilizando duas equações diferenciais, a equação do momento (2) e a equação da continuidade (3) (Sanders Neto *et al.*, 2020).

Em termos gerais, essas duas equações contemplam as principais características físicas do transitório hidráulico. Para efeito, considera-se o fluxo unidimensional, com a parede do conduto e do fluido linearmente elásticos. Pela ausência de solução analítica utiliza-se o Método das Características (MOC) para resolver as equações do modelo elástico, pelo fato de ter fácil implementação computacional (Wylie *et al.*, 1993).

As equações que governam o transiente hidráulico formam uma equação diferencial parcial linear de 2ª ordem Quasi-Hiperbólica e tem como base o Teorema Fundamental de Reynolds. Através do Método das Diferenças Finitas, essas equações são transformadas em homogêneas, ou seja, possuem somente uma variável independente. Por conseguinte, na sequência do tópico será exposto o desenvolvimento matemático para resolver o golpe de aríete em condutos forçados de água (Ferreira *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2015).

- Equação do momento:

$$L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + J_q + J_u = 0 \quad (2)$$

- Equação da continuidade:

$$L_2 = g \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Em que:

J_q - Termo do atrito permanente - $[LT^{-2}]$

J_u - Termo do atrito variável - $[LT^{-2}]$

A - Área da seção transversal - $[L^2]$

Q - Vazão média do fluido na seção transversal do tubo - $[L^3T^{-1}]$

H - Cota piezométrica - $[L]$

a - Celeridade - $[LT^{-1}]$

g - Aceleração da gravidade - $[LT^{-2}]$

Através de uma combinação linear das equações (2) e (3), com o auxílio de um multiplicador desconhecido, λ (lambda), tem-se (4), (5) e (6):

$$L = L_1 + \lambda \cdot L_2 \quad (4)$$

$$J = J_q + J_u \quad (5)$$

Em que:

L, L_1, L_2 - Operadores lineares do MOC

λ - Multiplicador da combinação linear do MOC

Sendo:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + J + \lambda \left(g \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = 0 \quad (6)$$

Multiplicando pela área “A” e readequando a equação (6), de modo que se possa isolar λ e agrupar as variáveis H e Q, tem-se (7):

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda g A \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + JA = 0 \quad (7)$$

Segundo Wylie *et al.* (1993), ambas as variáveis **H** e **Q** são dependentes de **x** e **t**. No cálculo fundamental, a variável **x** pode ser enquadrada como função de **t**, ou seja, o comprimento pode variar infinitesimalmente em função do tempo. Para Chaudhry (2014), se **H** = **H(x, t)** e **Q** = **Q(x, t)**, tem-se (8) e (9):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (9)$$

Ao analisar as equações (7), (8), e (9), percebe-se que (10) e (11):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \quad (10)$$

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (11)$$

Com isso, a equação (7) torna-se uma Equação Diferencial Ordinária (EDO) ao substituir as equações (8) e (9), (12):

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + JA = 0 \quad (12)$$

De acordo com Wood *et al.* (2005), a equação (12) sinaliza o movimento da onda de pressão e o sinal positivo ou negativo indica a direção da propagação da celeridade a (Wylie *et al.*, 1993; Chaudhry, 2014). Por convenção, o sinal positivo de λ refere-se à movimentação gráfica da esquerda para a direita em modelagem de adutora e sentido horário para redes ramificadas e/ou malhadas. As equações de compatibilidade (13) e (15) terão validade somente se a as equações (14) e (16) forem satisfeitas.

$$C^+ \rightarrow \left\{ \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + JA = 0 \right. \quad (13)$$

$$C^+ \rightarrow \left\{ \frac{dx}{dt} = +a \right. \quad (14)$$

$$C^- \rightarrow \left\{ \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + JA = 0 \right. \quad (15)$$

$$C^- \rightarrow \left\{ \frac{dx}{dt} = -a \right. \quad (16)$$

Com o desenvolvimento da transformação linear adquirem-se equações diferenciais ordinárias (EDOs). Com isso pode-se representar a linha característica da seguinte forma:

$$\pm dH + \frac{a}{gA} \cdot dQ + \frac{a}{g} J dt = 0 \quad (17)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (18)$$

Sendo que H_p e C_p representam a linha característica positiva **AP** (Figura 3):

A partir da equação (17) tem-se a equação (19).

$$+dH + \frac{a}{gA} \cdot dQ + \frac{a}{g} J dt = 0 \quad (19)$$

Integrando a equação anterior entre os pontos A e P e considerando uma aproximação do termo de atrito “J” tem-se a equação (20):

$$(H_P - H_A) + B(Q_P - Q_A) + \frac{a}{g}J\Delta t = 0 \quad (20)$$

Com isso, a linha positiva (Figura 3) fica representada pelas equações (21) e (22) e a variável “C_p”.

$$C^+ : H_P = C_P - BQ_P \quad (21)$$

$$C_P = H_A + BQ_A - \frac{a}{g}J_A\Delta t \quad (22)$$

H_P e **C_n** representam a linha característica negativa **BP** (Figura 3):

A partir da equação (17) tem-se a equação (23).

$$-dH + \frac{a}{gA} \cdot dQ + \frac{a}{g}Jdt = 0 \quad (23)$$

Integrando a equação anterior entre os pontos B e P e considerando uma aproximação do termo de atrito “J” tem-se a equação (24):

$$-(H_P - H_B) + B(Q_P - Q_B) + \frac{a}{g}J\Delta t = 0 \quad (24)$$

Com isso, a linha negativa da Figura 3 fica representada pelas equações (25) e (26) e a variável “C_n”.

$$C^- : H_P = C_n + BQ_P \quad (25)$$

$$C_n = H_B - BQ_B + \frac{a}{g}J_B\Delta t \quad (26)$$

Para o cálculo da vazão no ponto “P” utilizou-se a equação (25), isolando a variável “ Q_p ”. Desse modo possibilita-se termos a variação da vazão para cada passo de tempo.

$$Q_p = \frac{H_p - C_n}{B} \quad (27)$$

A fim de obter o cálculo da variação da carga de pressão utilizou-se a equação (25). Assim, a variação de pressão a cada passo de tempo poderá ser calculada.

$$H_p = C_n + BQ_p \quad (28)$$

Em que:

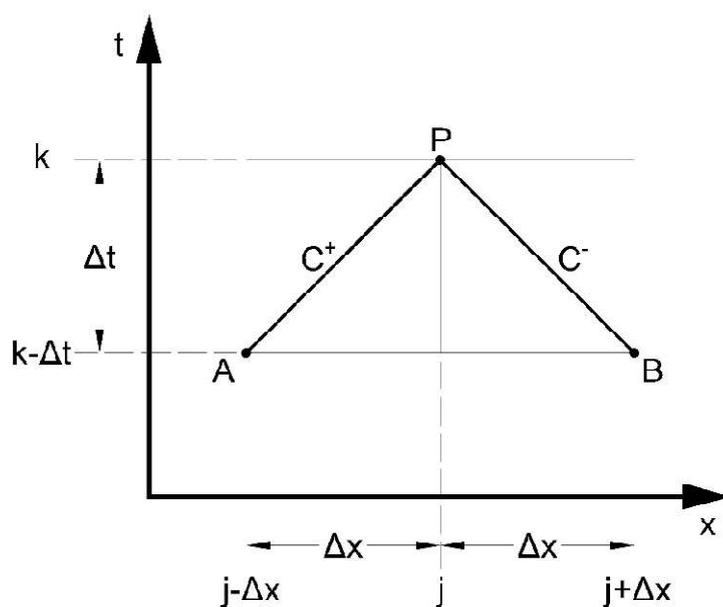
Δt - Intervalo de tempo - [T]

Q - Vazão volumétrica do fluido do tubo - [L^3T^{-1}]

H - Carga de pressão - [L]

Os subscritos **A** e **B** referem-se respectivamente as secções antes e depois de **P**, em um passo de tempo anterior (Figura 3).

Figura 3 – Linhas características do MOC



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Adiante, serão esclarecidas as condições de contorno desenvolvidas pelo Método das Características, fornecidas pela bibliografia de Chaudhry (2014). Importante frisar que serão expostas somente as equações que servirão de embasamento para análise do objetivo deste trabalho.

No sistema hidráulico reservatório – tubulação - válvula a jusante, a primeira condição de Contorno é referente ao Reservatório a Montante com Nível Constante durante o período do transitório hidráulico. Esta consideração é válida para reservatórios de grande volume, como os açudes.

$$Q_{pj,1} = \frac{H_{res} - C_n}{B} \quad (29)$$

$$H_{pj,1} = H_{res} \quad (30)$$

Outra condição de contorno importante é o da válvula de fechamento a jusante. As equações de vazão e carga de pressão têm como base a bibliografia de Wylie *et al.* (1993), vale apontar que a variável τ depende da porcentagem de fechamento da válvula, do tempo de início de fechamento e do próprio tempo de fechamento.

$$Q_{pj,n+1} = \sqrt{[(C_v \cdot B_v)^2 + 2 \cdot C_v \cdot C_p] - B_v \cdot C_v} \quad (31)$$

$$C_v = \frac{(\tau \cdot Q_{oj,n+1})^2}{2 \cdot H_{oj,n+1}} \quad (32)$$

$$\tau = \frac{C_d \cdot A_v}{(C_d \cdot A_v)_o} \quad (33)$$

Em que:

C_d – Coeficiente de descarga da válvula – adimensional

A_v – Área da válvula - [L²]

$(C_d \cdot A_v)_o$ – Estado inicial da válvula

$C_d \cdot A_v$ – Estado atual da válvula

$$H_{pj,n+1} = C_p - (Q_{pj,n+1} \cdot B_v) \quad (34)$$

2.3 Fluxo bifásico: conceito histórico da cavitação

Em muitas situações transitórias de uma adutora pressurizada é possível produzir baixas pressões em certos lugares de um sistema como nos pontos altos. Dependendo da intensidade do fenômeno pode-se atingir a pressão de vapor (Kessal; Amaouche, 2001).

Quando isso ocorre, o líquido se converte rapidamente em vapor, surgindo a chamada cavitação. Quando esse vapor preenche toda a seção da tubulação, ocorre a separação da coluna líquida e, em seguida, na união das colunas, acontece um colapso, resultando em pressões ainda maiores. Dessa maneira, estudar modelos que consideram o fluxo bifásico torna-se fundamental para melhor compreensão do fenômeno físico transiente (Tijsseling *et al.*, 1996).

A literatura existente sobre cavitação transitória é extensa e concentra-se, particularmente, em: cavitação gasosa sendo um escoamento bifásico de dois componentes e na cavitação vaporosa, que é um escoamento bifásico de um componente (Soares *et al.*, 2015).

No caso da cavitação gasosa, a pressão poderá ficar abaixo da pressão de saturação, no entanto, permanece acima da pressão de vapor do líquido. Ao longo de toda a extensão da tubulação há presença de microbolhas de gás livre, contribuindo para a redução da celeridade da onda de pressão. Devido a essa dependência, o volume de gás oscila durante toda a duração do golpe. Ademais, a compressibilidade incremental do gás reduz a velocidade da mistura resultando em uma dispersão significativa das ondas de pressão (Shu, 2003).

Já na cavidade vaporosa há presença de uma bolsa de ar que poderá ser localizada em pontos altos do sistema de tubulações e nos contornos, como por exemplo, válvula fechada ou extremidade sem saída. Além disso, cavidades intermediárias podem surgir com a interação entre duas ondas de baixa pressão ao longo da tubulação (Shu, 2003).

Diante do que foi exposto, percebe-se que há dois casos de cavitação e cada um possui seu grupo de modelos numéricos a fim de resolver o fenômeno transitório. O primeiro grupo de modelos pertence ao DGCM (*Discrete gas cavity model*) e o segundo grupo, ao DVCM (*Discrete vapor cavity model*). Ambos resolvem problemas relacionados ao golpe de aríete para fluxo bifásico (Soares *et al.*, 2009).

Tais grupos serão abordados com mais profundidade nos próximos tópicos, de forma que essa introdução servirá de base para melhor entendimento do desenvolvimento histórico do fluxo bifásico, que teve seu início em meados da década de 1960, com as pesquisas de Pearsall (1965) e Whiteman e Pearsall (1959).

Esses primeiros estudos dos efeitos do ar no regime transiente mostraram que uma pequena quantidade de ar poderá produzir efeitos significativos no fluxo não permanente. A base das análises foram os ábacos e procedimentos aritméticos. De forma mais avançada, surgiu o trabalho de Lai (1961), passando a utilizar modelagem computacional (Chaudhry, 2014).

Desde as primeiras discussões e análises da cavitação desenvolvidas por Pearsall (1965), constatou-se uma redução na velocidade da onda de até 75% com a presença do ar ou gás livre, provocando variações nas pressões transitórias. Apesar do ar ou gás diminuírem, a velocidade da onda a rejunção da coluna líquida provocada pela separação de coluna poderá provocar altas pressões (Chaudhry, 2014).

Com a consideração do efeito do ar, Provoost (1976) e Provoost e Wylie (1982) fizeram um modelo que aprisiona cavidades de vapor a seções fixas usando a celeridade da onda constante. Os resultados foram satisfatórios para transientes lentos, no entanto, esboçou instabilidade nos eventos de desligamento de bomba (Cannizzaro; Pezzinga, 2005).

Tanahashi e Kasahara (1970) afirmam que na ocorrência de cavidades ao longo de um determinado sistema, o segundo pico de pressão pode ser superior ao primeiro, embora o primeiro pico seja geralmente mais alto. De forma complementar, Soares *et al.* (2012) dizem que, apesar das bolhas de ar diminuírem a velocidade da onda no início do processo transitório, a pressão de pico torna-se maior, principalmente depois do primeiro pico.

Visando descrever o comportamento não adiabático de uma bolha esférica causada por um esforço de cisalhamento Weyler *et al.* (1971), descreveu uma equação (35)

$$\tau_b = \Phi \cdot \varepsilon_v \cdot \rho \cdot g \cdot D \cdot |\Delta H| \cdot \frac{V}{\Delta x \cdot |V|} \quad (35)$$

Em que:

τ_b - Tensão de cisalhamento - [ML⁻¹T⁻²]

ε_v - Fração de vazio disperso em forma de bolha - adimensional

ρ - Massa Específica de um fluido - [ML⁻³]

g - Aceleração da gravidade - [LT⁻²]

D - Diâmetro do tubo - [L]

Δx - Distância ou variação no espaço no eixo x - [L]

ΔH - Variação da carga piezométrica - [L]

V - Velocidade média do fluido na seção transversal do tubo - [LT⁻¹]

Φ - Constante desconhecida, no entanto, dados experimentais de Baltzer (1967), revelaram $\Phi \cdot \varepsilon_v = 225$.

Um estudo realizado por Martin *et al.* (1973), depois complementado por Bergant *et al.* (2006) destacou que, tanto na Europa como nos Estados Unidos, a modelagem da separação de coluna líquida ou da cavitação era um tema objeto de muitos debates.

Anos depois, Wylie (1980) criou um modelo que utiliza um gás livre distribuído por toda tubulação. Para realização dos testes a velocidade da onda tinha que ser variável e dependente da quantidade de ar e pressão local (WYLIE *et al.*, 1993).

Por meio de testes experimentais, Van de Sande e Belde (1981) apresentaram resultados dos valores dos picos de pressão superiores aos picos de pressão calculados pela equação de Joukowsky. Ao referir-se a esse resultado experimental, De Almeida (1983) citou quatro razões possíveis para obter grandes pressões devido ao colapso da cavidade. São elas:

- a) distribuição de velocidade não uniforme;
- b) efeitos de atrito instáveis;
- c) efeito elástico da separação de coluna;
- d) efeitos locais e pontuais ao longo da tubulação.

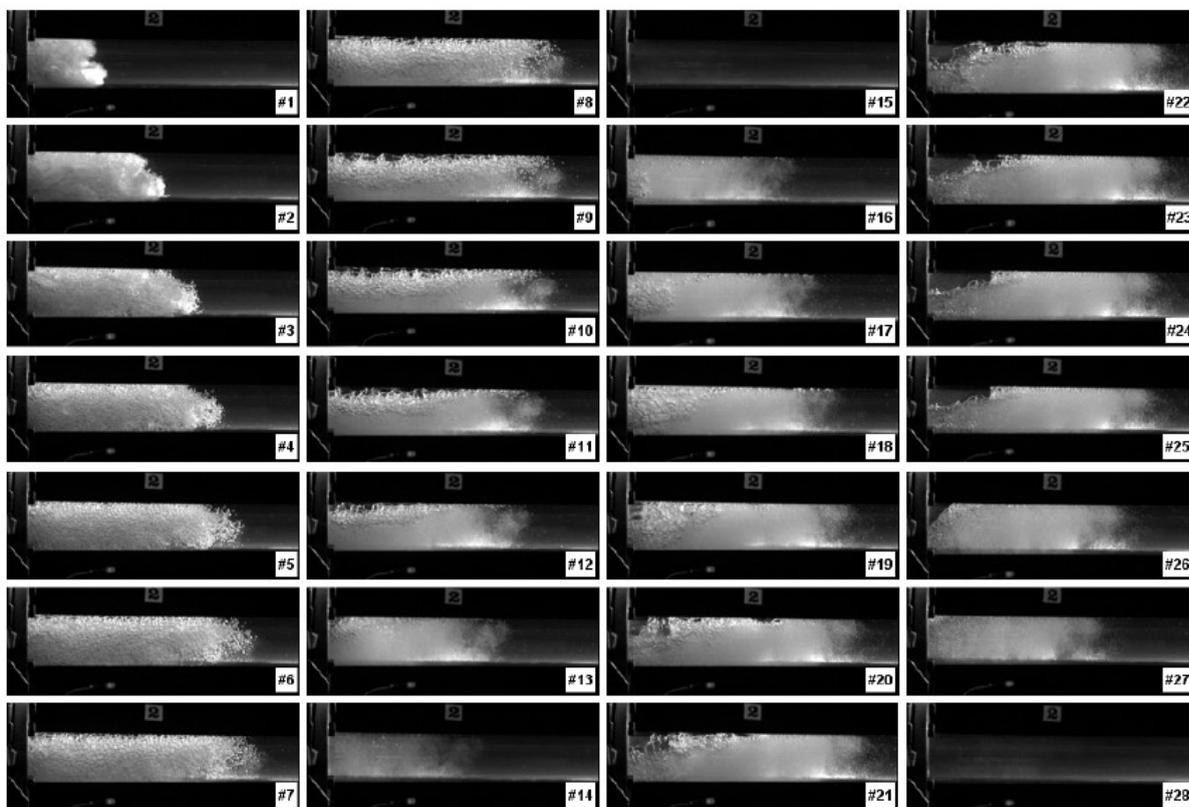
Com novos estudos, Streeter (1983) relatou que a difusão do gás no fluido é um processo relativamente lento. Além disso, esta pesquisa comprovou que pequenas quantidades de gases envolvidos durante o transiente mudam sutilmente a concentração de gás. Contudo a forte influência entre a fração de gás livre e a velocidade das ondas de pressão é provável que tenha uma grande influência no comportamento de baixa pressão nas ondas do transientes.

Estudos da compressão do ar foram realizados por Burrows e Qiu (1995), sendo que o primeiro realizou testes com velocidade constante e o segundo atribuiu uma velocidade variável a cada passo de tempo. Ambos necessitaram de dados de campo ou laboratoriais de alta qualidade.

Na bibliografia de Wylie *et al.* (1993), o regime de cavitação em tubulações é dividido em dois grupos, sendo que a diferença se dá pela magnitude da fração de vazio. Com isso, eles definem a cavitação como a razão entre o volume do vapor e o volume total da mistura líquido/vapor.

Adamkowski e Lewandowski (2014) demonstraram, de forma prática, as zonas de cavitação formadas durante o fenômeno de separação de coluna na tubulação durante o golpe de aríete (Figura 4).

Figura 4 – Quadros da representação das zonas de cavitação formadas durante o fenômeno de separação de coluna na tubulação



Fonte: Adamkowski e Lewandowski (2014).

Os estudos relacionados ao fluxo bifásico estenderam-se com as análises dos cientistas Hadj-Taieb e Lili (1998, 1999), que consideraram o fluxo transitório com partículas homogêneas de misturas bifásicas entre líquido/gasoso em tubulações, levando em conta o efeito de elasticidade do tubo na propagação da onda de pressão. Os modelos desenvolvidos usaram o gás e o fluido, além disso a relação de massa que é assumida como constante.

Dando continuidade, um ano depois, Lai *et al.* (2000) investigaram o golpe de aríete juntamente com as cavidades de vapor. Descobriram que, embora a presença de ar seja geralmente benéfica na redução das cargas de golpe de aríete, isso pode resultar em um aumento no transiente, com excessão do segundo pico de pressão positiva.

Em seus testes experimentais, Covas (2003) citou a existência de dois problemas associados à cavitação em tubulações pressurizadas. Sendo que o primeiro está relacionado ao colapso das cavidades ao atingirem um certo tamanho e o segundo é referente à rejunção das colunas líquidas na ocorrência de separação de coluna.

Em estudos anteriores sobre cavitação, Cannizzaro e Pezzinga (2005) examinaram o efeito da cavitação na troca térmica entre as bolhas de gás e o líquido, fazendo o uso de um modelo 2-D utilizando equações de continuidade para gás, equação de continuidade para a mistura e equações do momento para a solução. O modelo bidimensional foram capazes de prever os dados experimentais apenas no primeiro conjunto de oscilações. Eles descobriram que a incorporação de troca térmica entre as bolhas de gás e o líquido circundante no modelo melhorou o desempenho.

De forma analítica à pesquisa citada anteriormente, Lauchlan *et al.* (2005) mostraram que os modelos expostos podem ser considerados adequados, porém indicam que comportamentos errôneos do transiente ocorrerão, necessitando de um desenvolvimento adicional dos modelos para tornar mais próximo dos dados observados.

Em uma pesquisa bibliográfica sobre cavitação e fluxo bifásico, Bergant *et al.* (2006) observaram que a separação de coluna pode causar efeitos trágicos em um sistema de tubulação. Um exemplo famoso é o acidente na usina hidrelétrica de Oigawa, em 1950, no Japão, onde três trabalhadores morreram. Tal fato ocorreu por um rápido fechamento da válvula, devido à drenagem de um sistema de controle de óleo durante a manutenção, formando uma onda de golpe de ar de alta pressão que dividiu a comporta aberta. Com a liberação resultante da água, gerou-se uma onda de baixa pressão, ocasionando uma separação substancial da coluna líquida que causou o esmagamento de uma porção significativa da tubulação a montante, devido à pressão atmosférica externa.

No mesmo estudo, Bergant *et al.* (2006), citaram alguns dos primeiros estudos de separação de colunas líquidas usando um modelo numérico de simulação computacional, incluem o trabalho de Thibessard (1961) em Liège na Bélgica, Siemons (1967) em Delft, na Holanda e Weyler *et al.* (1971) na Universidade de Michigan.

Conforme Epstein (2008), introduzir um método integral, que leva em conta o movimento entre a mistura e a compressibilidade do líquido, posteriormente substituindo equações diferenciais de balanço parcial e as condições iniciais por um sistema aproximado de primeira ordem utilizando uma variante do método integral, mostra-se um resultado bastante simples e eficiente ao avaliar o impacto da compressibilidade do líquido, quando há um aumento da pressão.

Para Dinh Tam (2009), em um fenômeno transiente, a pressão mínima nunca será abaixo da pressão de vapor, pois se o modelo expuser esse tipo de conceito, apresentará erro considerável. Para pequenos valores de gás, a suposição de mistura de gás-líquido é ainda

aplicável. Entretanto, quando os valores são grandes frações de gás, forma-se um fluxo de espuma que pode separar o fluido do gás formando um escoamento de canal.

Em seu trabalho de cavitação aplicado em tubulações viscoelásticas, Soares *et al.* (2012) afirmam que um sistema cavitante poderá ter 3 regimes:

- a) golpe de aríete: a fração de vazio é pequena, logo a velocidade da onda não depende da pressão;
- b) cavitação: as bolhas de gás estão dispersas em todo o líquido, causando redução da velocidade por efeito termodinâmico. Consequentemente, é dependente da pressão;
- c) separação de coluna: forma-se uma cavidade, que se expande e se contrai dependendo do fluxo.

Segundo Sadafi *et al.* (2012), esses regimes podem ocorrer simultaneamente no mesmo sistema, mas devido à subpressão, forma-se um fluxo com cavitação. Em seguida, por redução adicional da pressão, ou seja, uma subpressão de maior intensidade, origina-se separação de coluna. Que por sua vez, ao aumentar a pressão, se chocam provocando uma sobrepressão, por fim volta-se para a região do golpe de aríete. Essa sequência de eventos entre a redução da pressão e o início da explosão da cavitação ocorre em poucos milésimos de segundos.

A pressão de uma cavidade é a soma das pressões parciais dos vapores dos líquidos e dos gases liberados. No entanto, a pressão dos vapores do líquido é igual em qualquer situação, porém as pressões dos gases oscilam (Chaudhry, 2014).

A análise realizada por Bergant *et al.* (2014) afirmam que a queda das ondas de pressão torna-se geralmente mais rápida devido a efeitos de ar livre, atrito variável e vibração estrutural no sistema. A cavitação ocorre quando a pressão cai até atingir a pressão do vapor do líquido e o fluxo passa de monofásico para bifásico. Assim, as equações clássicas do golpe de aríete não são válidas em regiões de cavitação.

Na mesma linha de pensamento, Adamkowski e Lewandowski (2014), afirmam que existem três objetivos de modelar um sistema com cavitação. O primeiro objetivo de modelar a separação de colunas é prever as pressões que ocorrem quando grandes cavidades de vapor colapsam. O segundo objetivo é prever o tempo dos eventos e o terceiro objetivo pode ser prever a resposta estrutural de tubos e suportes.

Em sua análise dos modelos de fluxo bifásico, Jiang *et al.* (2018) afirmam que o líquido no estado transitório em um sistema de tubulação é dividido em dois regimes de fluxo.

O primeiro é referido como o regime de golpe de aríete, onde a carga está acima da pressão de vapor do líquido e o segundo é o regime de cavitação, onde a carga está na pressão de vapor do líquido.

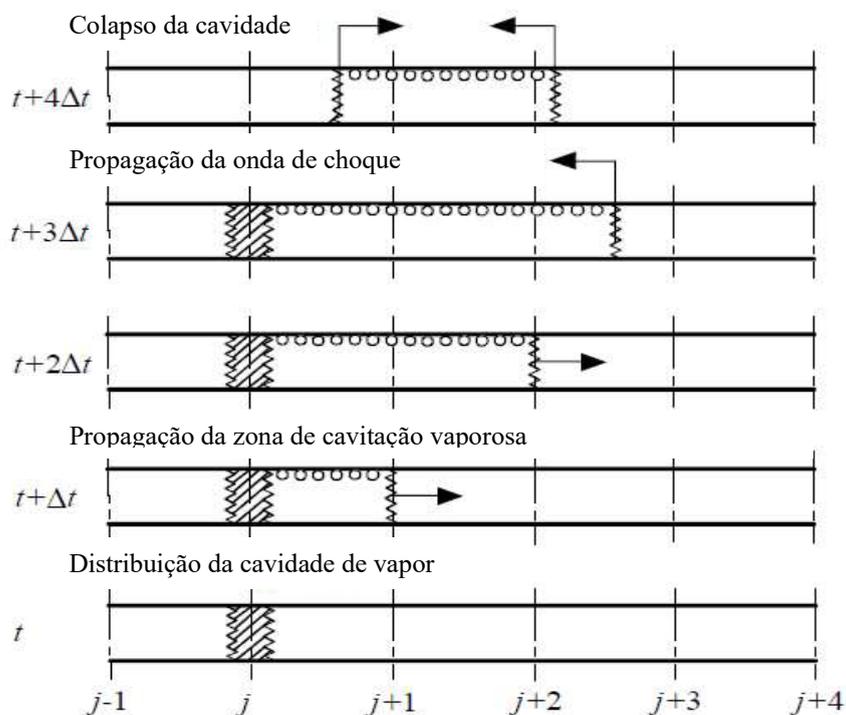
Os modelos com cavitação aplicado a tubos plásticos estudados por Urbanowicz *et al.* (2019) reiteram que as equações unidimensionais podem representar uma etapa do transiente hidráulico chamado de separação de coluna, na qual expõem individualmente cada estado físico particular do líquido.

Ao longo do tempo, modelos numéricos são estudados e desenvolvidos, que por vez, levam em consideração fatores desenvolvidos por cada autor. Um dos principais modelos considera o fluxo unidimensional, incluindo valores médio de velocidades transversais ao longo do sistema de tubulações pressurizadas (Araújo Paiva, 2019).

Considerações e suposições são feitas em todos os modelos, mas a ideia real que mostra a formação da cavitação até seu colapso a cada passo de tempo ao longo do sistema é igual para a maioria dos modelos desenvolvidos (Kim; Kim, 2019 e Tang *et al.*, 2020).

Na Figura 5 expõem-se a cavitação em todas suas etapas ao longo do golpe de aríete.

Figura 5 – Cavitação e formação do colapso em uma tubulação



Fonte: Bergant e Simpson (1992, com adaptações).

Na publicação realizada, Warda *et al.* (2020) ratificam as afirmações realizadas no parágrafo anterior. Vale ressaltar que os estudos foram realizados nos métodos unidimensionais (1D) para atrito semi-estacionário e variável, como também no método CFD 3D.

No trabalho anterior, o estudo CFD 3D foi realizado com abordagem matemática dos volumes finitos. Foram considerados todos os eixos, sendo levados em conta o comprimento da tubulação e a área da seção transversal. De modo geral, o método Computacional Fluid Dynamics (CFD) é resolvido pelas equações de Navier-Stokes e tem como principal *software*, o *Fluent*.

Diante disso, nos próximos tópicos serão abordados os dois principais métodos para a modelagem numérica de um fluxo bifásico, sendo um por cavitação vaporosa e o outro por cavitação gasosa.

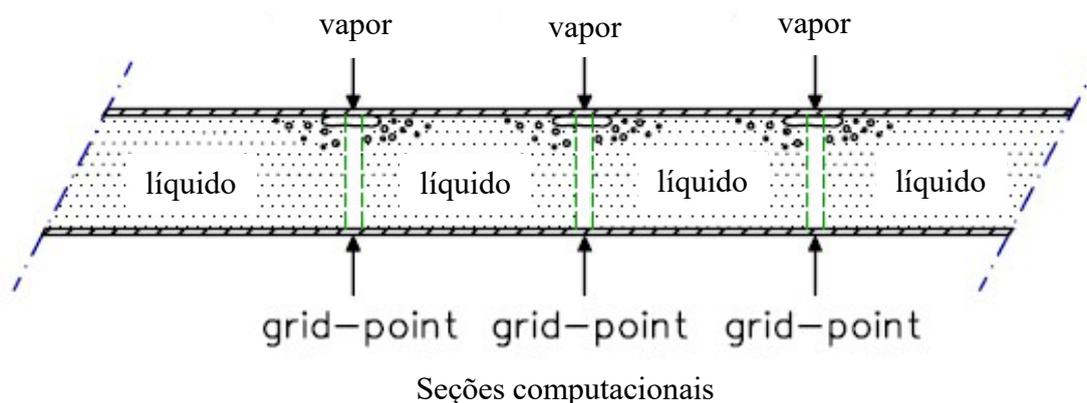
2.3.1 Discrete Vapor Cavity Model - DVCM

O DVCM foi criado a fim de prever o fenômeno de cavitação vaporosa. Segundo Wylie (1993), essa cavitação poderá ser diferenciada pelo valor da fração de vazio. Com isso, verifica-se que uma fração de vazio próximo a 1 (um) acontece separação de coluna, no entanto se for próxima a 0 (zero) há cavitação vaporosa distribuída.

Bergant *et al.* (2006) afirmam que o DVCM é o modelo mais utilizado para simular a cavitação vaporosa distribuída e a separação de colunas. Seu ponto positivo é a facilidade com a qual realiza a implementação computacional, mostrando muitos recursos dos eventos físicos de separação de colunas em tubulações. Isso contribui para encontrá-lo em diversos *softwares*, como o *Alievi* (ITA).

No entanto, o ponto negativo do DVCM é sua dificuldade em diferenciar as cavidades de vapor localizadas das cavidades de vapor distribuídas. A Figura 6 demonstra as cavidades discretas em cada seção computacional.

Figura 6 – Esboço do modelo de cavidade discreta



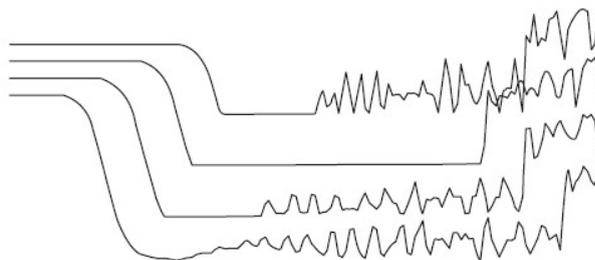
Fonte: Tijsseling *et al.* *apud* Bergant (1996, com adaptações).

Para resolver as equações diferenciais utiliza-se o Método das Características (MOC), de forma que a malha é fixa e as cavidades se formam em qualquer seção computacional. O outro ponto a ser considerado é o fato dessas cavidades de vapor terem velocidade de onda constante. A partir da formação dessas cavidades, uma seção computacional é tratada como uma condição de contorno. Adiante, a pressão será ajustada igual à pressão de vapor do líquido até a cavidade entrar em colapso.

Estudos realizados por Bergant *et al.* (2006) mostraram que o DVCM prevê corretamente a intensidade de pressões. No mesmo trabalho, os autores ressaltam que, apesar do modelo de cavidade vaporosa ter sido formulado corretamente por Tanahashi e Kasahara (1970), estes pesquisadores não aplicaram o modelo a regiões de cavidade distribuída.

Alguns anos depois, aplicou-se o conceito de cavidade distribuída com De Vries (1973), sendo o primeiro a relatar oscilações numéricas (Figura 7) induzidas pelo colapso simulado de uma região de cavitação distribuída. Para suprimir essas oscilações, ele adicionou pequenas quantidades de gás livre às cavidades discretas, permitindo a presença de gás livre no líquido.

Figura 7 – Oscilações numéricas de pressão resultantes do DVCM



Fonte: De Vries *apud* Bergant (1973)

Além do MOC, outras metodologias foram utilizadas para resolver o fenômeno do golpe de aríete, entre elas está a interpolação espacial, desenvolvida por Kot e Youngdahl (1978). Em seguida, Miwa *et al.* (1990) corrigiram artificialmente o intervalo de tempo numérico para $\Delta t = 0,95\Delta x/a$ e, a partir daí, usaram interpolações espaciais, sendo esta a causa do amortecimento numérico.

Com estudos relacionados à tensão de cisalhamento da bolha, Weyler *et al.* (1971) atribuíram essa tensão à expansão não-adiabática e ao colapso das bolhas de gás presentes em todo o fluxo de cavitação de baixa pressão. Anos depois, Alexandrou e Wylie (1986) provaram, de forma analítica, as perdas termodinâmicas durante a separação de coluna, afirmando que elas são significativamente menores do que as perdas por atrito na tubulação.

Kojima *et al.* (1984) implementaram o modelo de atrito variável de Zielke (1968) em um modelo de separação de colunas. Brunone e Golia (1990), Bughazem e Anderson (1996), Shuy e Apelt (1983) e Simpson e Bergant (1994) realizaram a mesma simulação.

A fim de evitar colapso de multicamadas, Safwat e Van den Polder (1973) permitiram a formação de cavidades discretas apenas em locais pré-estabelecidos. Contudo, uma desvantagem deste método seria que o usuário pré-selecionasse os locais potenciais onde as cavidades de vapor localizadas poderiam se formar. Além disso, a média das descargas não tem significado físico.

Anos depois, realizando o mesmo estudo, Brunone e Golia (1990) permitiram que cavidades se formassem em um número selecionado de seções computacionais na tubulação. Em outras seções, a pressão caiu abaixo da pressão do vapor líquido, o que não é fisicamente realista. Por fim, vários autores alternaram o valor do fator de ponderação ψ , resultando em picos de pressão com subpressão significativa.

Em meados da década de 1990, Simpson e Bergant (1994) compararam um número de modelos de separação de colunas de tubos. Com isso, descobriram que dentro do MOC, a grade escalonada é preferida acima da grade retangular, que na verdade compreende duas grades escalonadas independentes. O modelo com grade escalonada (DVCM) apresentou resultados razoavelmente precisos, quando o número de alcances foi restrito com a razão entre o tamanho máximo da cavidade e o volume de alcance inferior a 10%.

Testes experimentais foram elaborados por Adamkowski e Lewandowski (2009, 2012) a fim de entender a cavitação. Além dos experimentos, foi proposto um modelo em que os volumes das cavidades calculadas de várias seções computacionais fossem deslocados para uma única seção que satisfizesse as leis de conservação de massa e energia.

Nesse mesmo período, Soares *et al.* (2012) afirmaram que o DVCM era adequado para um perfil de tubulações com elevações acentuadas, com isso o vapor fica aprisionado em uma bolsa de ar. Nesse trabalho foi reiterado que as cavidades de vapor se formam em qualquer uma das seções computacionais.

Uma modelagem numérica foi realizada por Norooz e Shamloo (2016) visando o entendimento mais profundo da separação de coluna durante um golpe de aríete. Para os cálculos, foram utilizados o modelo DVCM unidimensional (1D) com o termo do atrito variável e o modelo DVCM quasi-bidimensional. Esse último apresentou resultados mais próximos aos dados experimntais em termos da amplitude das ondas de pressão.

Para efeito prático, o modelo DVCM tornou-se bem difundido nas pesquisas acadêmicas, como também nos *softwares* de uso profissional, por ter fácil implementação computacional. Mas segundo Santoro *et al.* (2018), ainda existem questionamentos sobre a interpretação do fenômeno físico e os resultados numéricos.

Recentemente, Rkibi *et al.* (2022) realizaram um estudo de cavitação em tubulações viscoelásticas. Afirmaram que o modelo DVCM unidimensional com o termo de atrito variável aplicado em um experimento de tubulação horizontal apresenta resultados consoante com os relatos da literatura. Vale enfatizar que modelos bidimensionais ou tridimensionais apresentam resultados próximos aos modelos unidimensionais, levando em consideração os picos de sobrepressão e subpressão.

2.3.2 Discrete Gas Cavity Model – DGCM

Cientistas observaram uma característica peculiar dos líquidos, que consiste em sua capacidade de absorver ou expelir gás livre. Tal fato acontece quando a superfície líquida entra em contato com a atmosfera e por consequência dessa investigação sentiu-se a necessidade de propor modelos que considerassem essa característica dos líquidos.

Surgindo o DGCM, que tem como função principal prever fenômenos transitórios em escoamentos subatmosféricos, também pode ser denominado de cavitação gasosa. Com base em Bergant *et al.* (2006), o modelo DGCM está sendo bem difundindo para análise de cavitação gasosa, principalmente nos últimos 30 anos.

Estudos elaborados por Provoost (1976), Provoost e Wylie (1982), De Vries (1973) e Wylie (1984) revelaram que os gases livres contidos dentro de um tubo seriam transformados em um gás livre distribuído ao longo de todo sistema hidráulico de tubulações. Assim, a cada

seção computacional teria uma fração de gás. Na mesma análise foi realizada uma adaptação do DVCM considerando a expansão e a contração do gás.

Os estudos citados anteriormente utilizaram a equação que representa a Lei dos Gases Ideais, respeitando o processo termodinâmico:

$$\alpha = \frac{M_g \cdot R_g \cdot T}{P_g^* \cdot \forall_m} \quad (36)$$

Em que:

M_g - Massa de gás livre – [M]

R_g - Constante do gás – [FLmol⁻¹T⁻¹]

T - Temperatura absoluta – [θ]

\forall_m - Volume da mistura – [L³]

P_g^* - Pressão absoluta do gás - [ML⁻¹T⁻²]

$$\forall_g = \alpha \cdot \forall_m = \frac{P_{g0}^* \cdot \alpha_0 \cdot \forall_m}{P_g^*} = \frac{C}{H_p - z + H_b - \frac{P_v^*}{\gamma}} \quad (37)$$

Em que:

C - Constante desconhecida = $\frac{P_{g0}^* \cdot \alpha_0 \cdot \forall_m}{\gamma}$

z - Elevação da tubulação – [L]

H_p - Carga de pressão em cada seção computacional – [L]

H_b - Carga de pressão barométrica – [L]

Para o cálculo do volume de gás tem-se a seguinte equação:

$$\frac{d\forall_g}{dt} = Q_P - Q_{Pu} \quad (38)$$

Em que Q_P e Q_{Pu} são respectivamente os fluxos a montante e a jusante em cada seção computacional. Para adicionar o volume do gás no cálculo do golpe de aríete, incorporou-se, dentro da celeridade da onda, o conceito de fluxo bifásico, passando de celeridade líquida para celeridade da mistura.

$$a_m = \frac{a_o}{\sqrt{1 + \frac{a_g \rho a_o^2}{P_m^*}}} \quad (39)$$

Em que:

P_m^* - Pressão absoluta da mistura - $[ML^{-1}T^{-2}]$

a_g - Fração do gás livre - adimensional

Estudos realizados por Wylie (1984) mostraram que a regra trapezoidal produziu oscilações de pressão de alta frequência, diferente da grade escalonada. Esses resultados foram obtidos por meio da integração da Equação (40) e, em seguida, introduziu-se uma direção de tempo, fator de ponderação ψ para controlar oscilações numéricas.

A solução escrita para a grade escalonada do MOC é representada a seguir.

$$\nabla_g^t = \nabla_g^{t-2\Delta t} + [\psi \cdot (Q_P^t - Q_{Pu}^t) + (1 - \psi) \cdot (Q_P^{t-2\Delta t} - Q_{Pu}^{t-2\Delta t})] \cdot 2 \cdot \Delta t \quad (40)$$

Em que, ∇_g^t e $\nabla_g^{t-2\Delta t}$ são os volumes de gás atual e no passo de tempo anterior do anterior respectivamente. Já ψ é um adimensional que vai de zero a um, Wylie *et al.* (1993) observaram que a seleção de um valor superior a **0,5** pode evitar oscilações numéricas. De resto, o esquema de integração direta do valor de ψ igual a **1,0** resultou em oscilações numéricas mínimas (Simpson; Bergant, 1994 e Wylie *et al.*, 1993).

Na mesma linha de pensamento, Liou (2000) recomendou um valor de ψ próximo ou igual a **1,0** em combinação com um número suficiente de alcances computacionais. No mesmo estudo foi demonstrado que a velocidade da onda de pressão numérica convergiu com a teórica física.

Na bibliografia de Wylie *et al.* (1993), o desempenho do DGCM foi comparado com os dados experimentais, a qual apenas uma cavidade de vapor se formou adjacente à válvula sem a ocorrência de cavitação distribuída. Os resultados mostram claramente que os pulsos de pressão de curta duração de diferentes magnitudes relativas são evidentes nesse modelo.

No mesmo trabalho, Wylie contrapôs os resultados do DGCM com os resultados experimentais em um sistema de baixa fração de vazios durante eventos transitórios rápidos. O modelo apresentou resultados interessantes, embora um comportamento altamente não linear

tenha sido observado. Além disso, uma variação da velocidade da onda com a pressão em um sistema de tubulações pressurizadas com gás livre foi demonstrada.

Complementando seus estudos, Bergant e Simpson (1999) investigaram a influência da inclinação do tubo através da comparação de ensaios experimentais em um tubo inclinado descendente e ascendente para uma velocidade de fluxo inicial idêntica $V_0 = 0,71 \text{ m/s}$ e pressão estática idêntica na válvula de 20,0 m. Os autores encontraram regiões com colapso ligeiramente diferente da cavidade na válvula e uma intensidade de cavitação levemente alterada ao longo da tubulação para duas situações. As diferenças foram causadas pelas distinções na carga de pressão fixa (linha de grade hidráulica) e pela direção da ação da gravidade.

Além disso, os autores apresentaram uma comparação global entre o DGCM e os resultados experimentais para um número de regimes de fluxo em tubos inclinados descendente e ascendente com 30 diferentes casos. Uma comparação foi feita para a carga máxima na válvula e a duração do volume máximo na cavidade da válvula. A concordância entre os resultados computados e medidos foi aceitável.

Com um estudo sobre a separação de coluna líquida durante o enchimento rápido da tubulação Malekpour e Karney (2014) observaram que o modelo DGCM fornece resultados aceitáveis mesmo em sistemas que simulam o crescimento local da cavidade de vapor e a cavitação distribuída ao longo na tubulação.

Um ano depois, Soares *et al.* (2015) implementaram testes experimentais em tubulações de cobre pressurizadas na Universidade de Lisboa. Os resultados observados foram favoráveis ao modelo DGCM, pois houve menores dispersões e atenuações de pressões, comparados ao modelo DVCM.

Uma modelagem computacional realizada por Jensen (2018) apresentou melhores resultados para o modelo DGCM, porém, em um único teste, o modelo DVCM mostrou resultados mais próximos aos dados experimentais. Vale salientar que os estudos foram realizados com uma modelagem unidimensional e implementada em *Matlab*.

2.4 Método da Celeridade Variável com o Modelo Politrópico Termodinâmico

Em um modelo de cavitação é possível ter variações de velocidade de onda devido a variações de propriedade do fluido. Assim, ignorar a variação da velocidade de onda pode

levar a erros na previsão do transiente. Dinh Tam (2009) introduziu um modelo de velocidade de onda variável, levando em consideração a variação local dessa velocidade devido ao conteúdo de gás local e aos seus respectivos efeitos. Assumiu-se uma massa de controle da mistura entre o gás e o líquido contendo um volume de gás em forma de pequenas bolhas livres:

$$V_l = (1 - \varepsilon) \cdot V_t \quad (41)$$

$$V_g = \varepsilon \cdot V_t \quad (42)$$

Em que:

V_l - Volume total de líquido - [L³]

V_t - Volume total de gás + líquido - [L³]

V_g - Volume total de gás - [L³]

ε - Fração do volume de ar disperso em forma de bolha

Atribui-se um incremento de pressão ΔP no líquido, considerando a partir da equação do módulo de elasticidade K , em que a variação do volume é provocada pela variação da pressão:

$$V_l^* = V_l \cdot (1 + \%V) \quad (43)$$

$$K = - \frac{\Delta P}{\Delta V / V_l} \quad (44)$$

$$\%V = \frac{\Delta V}{V_l} \quad (45)$$

Em que:

V_l^* - Volume total de líquido após um incremento ΔP - [L³]

$\%V$ - Fração de volume adicional de líquido – adimensional

ΔV - Volume adicional de líquido – [L³]

V_l - Volume de líquido – [L³]

ΔP - Variação de pressão na tubulação - [ML⁻¹T⁻²]

K - Módulo de elasticidade volumétrica de um fluido - [ML⁻¹T⁻²]

Substituindo a equação (45) na equação (44), obtém-se a seguinte equação:

$$\%V = - \frac{\Delta P}{K} \quad (46)$$

Substituindo a equação (46) na equação (43), encontra-se a equação do volume do líquido com aditivo de pressão:

$$V_l^* = V_l \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{K}\right) \quad (47)$$

$$V_l^* = \left(1 - \frac{\Delta P}{K}\right) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V_t \quad (48)$$

Considera-se que o volume do gás seja distribuído na forma de pequenas bolhas e que há uma mudança politrópica devido ao calor que está sendo transferido para água. O processo politrópico é definido como qualquer processo reversível que satisfaça a equação:

$$P \cdot (V_g)^n = \text{constante} \quad (49)$$

Os processos isotérmicos, adiabáticos, isocóricos e isobáricos são casos particulares dos politrópicos. Logo, um aditivo de pressão provoca alteração no volume resultando na seguinte equação:

$$P \cdot (V_g)^n = (P + \Delta P) \cdot (V_g^*)^n \quad (50)$$

Em que:

V_g^* - Volume total de gás após um incremento ΔP - [L^3]

P - Pressão de um fluido na tubulação - [$ML^{-1}T^{-2}$]

Isolando a variável do novo volume a equação (50), tem-se:

$$V_g^* = \left(\frac{P}{P + \Delta P}\right)^{1/n} \cdot V_g \quad (51)$$

Sabe-se que o volume total é a soma do volume do gás com o volume do líquido:

$$V_t^* = V_l^* + V_g^* \quad (52)$$

Em que:

V_t^* - Volume total de gás + líquido após um incremento ΔP - [L³]

Substituindo a equação (48) e a equação (51) na equação (52), obtém-se:

$$V_t^* = \left(1 - \frac{\Delta P}{K}\right) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V_t + \left(\frac{P}{P + \Delta P}\right)^{1/n} \cdot \varepsilon \cdot V_t \quad (53)$$

Aplicando o Polinômio de Taylor e considerando um caso particular que $a = 0$ que é chamada Série de Maclaurin, sendo uma expansão de primeira ordem, tem-se a seguinte equação:

$$f(x) = f(0) + f'(0) \cdot x \quad (54)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right)^{-1/n} \approx \left(1 - \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta P}{P}\right) \quad (55)$$

Em que:

n - Constante anisotrópica

Então, substituindo a equação (55) em (53), resulta-se:

$$\frac{V_t^*}{V_t} = 1 - \left(\frac{\varepsilon \Delta P}{n P} + \frac{\Delta P}{K}\right) \quad (56)$$

Assim, o modulo de elasticidade efetivo do fluido com fração de ar incorporado e uma pressão **P**, é exposta como:

$$K^* = \frac{\Delta P}{\left(1 - \frac{V_t^*}{V_t}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K} + \frac{\varepsilon}{nP}\right)} \quad (57)$$

Em que:

K^* - Módulo de elasticidade volumétrica de um fluido após um incremento ΔP - [ML⁻¹T⁻²]

O módulo de elasticidade efetivo da mistura, incluindo efeitos de distensibilidade e condição de restrição da tubulação é dado por:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K} + \frac{\varepsilon}{nP} + \frac{c_l D}{eE} \quad (58)$$

Em que:

K_m - Módulo de elasticidade volumétrica efetivo de uma mistura gás/líquido - [ML⁻¹T⁻²]

Assim, a velocidade da onda com fração de ar adicionado é dada por:

$$a = \left[\frac{K_m}{\rho_m} \right]^{1/2} \quad (59)$$

Em que:

ρ_m - Massa Específica de uma mistura gás/líquido - [ML⁻³]

Substituindo a equação (58) na equação (59), obtém-se:

$$a = \left[\rho_m \cdot \left(\frac{1}{K} + \frac{\varepsilon}{nP} + \frac{c_l D}{eE} \right) \right]^{-1/2} \quad (60)$$

Onde ρ_m é a densidade de massa equivalente da mistura, sendo que se desprezou o peso do gás livre, por ser um valor muito pequeno, como mostra a seguir:

$$\rho_m = \rho_l(1 - \varepsilon) + \rho_g \varepsilon \approx \rho_l(1 - \varepsilon) \quad (61)$$

Em que:

ρ_g - Massa Específica de um gás - [ML⁻³]

ρ_l - Massa Específica de um líquido - [ML⁻³]

Para este modelo, realizou-se uma mudança na variável da fração de vazio, unificando o ar e o gás da mistura bifásica em uma variável adimensional chamada de fração de vazio.

Segue a equação para um sistema de fluido, com o t igual a $k \cdot \Delta t$ e uma localização dada por x igual a $j \cdot \Delta x$, a velocidade da onda é $a_{j,k}$, a pressão absoluta é $P_{j,k-\Delta t}$ e a fração de vazio é $\varepsilon_{j,k-\Delta t}$ (Lee *et al.*, 2008):

$$a_{j,k} = \left[\rho_l (1 - \varepsilon_{j,k-\Delta t}) \cdot \left(\frac{1}{K} + \frac{\varepsilon_{j,k-\Delta t}}{nP_{j,k-\Delta t}} + \frac{c_l D}{eE} \right) \right]^{-1/2} \quad (62)$$

Em que:

$\varepsilon_{j,k-\Delta t}$ - Fração de vazio em um passo de tempo k (anterior) num tubo i e seção j

$P_{j,k-\Delta t}$ - Pressão na tubulação em um passo de tempo k (anterior) num tubo i e seção j - $[ML^{-1}T^{-2}]$

$a_{j,k}$ - Celeridade da onda em um passo de tempo k (atual) num tubo i e seção j - $[LT^{-1}]$

O presente modelo depende da fração de vazio em um determinado nó e passo tempo ao longo da tubulação, somado a uma pressão local transitória, além do índice de vazio de vapor inicial e a pressão de vapor, sendo que, os dois últimos são fixos ao longo da simulação:

Também, a condição de estabilidade numérica de Courant, CLF, foi utilizada para o cálculo do Δx :

$$C_N = \frac{a \Delta t}{\Delta x} \quad (63)$$

Em que:

C_N - Condição de Courant

- **Relação de compressão e expansão dos gases e vapor de água**

O presente modelo depende da fração de vazio em um determinado nó e passo de tempo ao longo da tubulação, somado a uma pressão local transitória. Nesse sentido, a equação da fração de vazio é baseada no processo adiabático da termodinâmica e no desenvolvimento da equação de Laplace-Poisson.

Assim, toda a dilatação dos vazios durante o transiente é respeitada, pois os vazios se expandem e se contraem dependendo da pressão atuante na seção computacional. Como o processo adiabático é um processo de quase-equilíbrio especial do processo politrópico, a equação da energia para uma fase gasosa também inclui a relação politrópica (Fuentes-Miguel *et al*, 2019).

$$\frac{dP}{dt} = -k \cdot \frac{P^*}{V} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{P^*}{V} \cdot \frac{k}{P^*} \frac{dm}{dt} \quad (64)$$

Como o termo $\frac{dm}{dt}$ é zero para um sistema confinado, a forma final da equação de energia para o gás aprisionado pode ser assim escrita (Lee, 2005; Leon *et al*, 2010).

$$\frac{dP}{dt} = -k \cdot \frac{P^*}{V} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{kPAv}{V} \quad (65)$$

1ª Lei da Termodinâmica:

$$Q = \Delta U + W \quad (66)$$

Em que:

Q - Calor;

ΔU - Energia interna;

W - Trabalho.

Relação de Mayer onde o Calor específico molar a pressão constante é ligeiramente maior do que Calor específico molar a volume constante, pois a energia fornecida não deve elevar somente a temperatura do gás, mas também o gás fazer o trabalho.

$$R = C_p - C_v \quad (67)$$

Em que:

C_p - Calor específico molar a pressão constante;

C_v - Calor específico molar a volume constante;

R - Constante universal dos gases.

$$\partial Q = \Delta U + \partial W \quad (68)$$

$$\Delta U = n \cdot C_v \cdot dt \quad (69)$$

$$\partial W = P \cdot dV \quad (70)$$

Como no processo adiabático não há troca de calor, a variável ∂Q é zero, com isso a equação dispõe-se da seguinte forma:

$$0 = n \cdot C_v \cdot dt + P \cdot dV \quad (71)$$

Substituindo P pela equação de Clapeyron:

$$0 = n \cdot C_v \cdot dt + \frac{n \cdot R \cdot t}{V} \cdot dV \quad (72)$$

Com o cancelamento da constante n e a integração da equação

$$constante = \ln t^{C_v} + \ln V^R \quad (73)$$

Através de uma regra matemática, cancela-se o logaritmo natural e utiliza-se a Lei dos Gases Ideais para substituir o tempo t. Por fim aplica-se a equação de Mayer obtendo-se a lei de Boyle.

$$P \cdot V^k = constante \quad (74)$$

Transformando volume em vazios, ou seja, tudo que não é líquido a equação fica explícita da seguinte forma:

Se $P_{j,k} \geq P_v$ então (Pressão atual maior ou igual à pressão de vapor)

$$\varepsilon_{j,k} = \left(\frac{P_{j,k-\Delta t}}{P_{j,k}} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \varepsilon_{j,k-\Delta t} \quad (75)$$

$$P_{j,k} = \left(\frac{\varepsilon_{j,k-\Delta t}}{\varepsilon_{j,k}} \right)^n \cdot P_{j,k-\Delta t} \quad (76)$$

Sendo que $\varepsilon_{j,k} \leq 1$

Em que:

$\varepsilon_{j,k}$ - Fração de vazio em um passo de tempo k (atual) num tubo i e seção j

$P_{j,k}$ - Pressão na tubulação em um passo de tempo k (atual) num tubo i e seção j -
[ML⁻¹T⁻²]

P_v - Pressão de vapor de um líquido - [ML⁻¹T⁻²]

2.5 Fator de atrito: semiestacionário e variável

A dissipação de energia para o cálculo do golpe de aríete em adutoras pressurizadas, na maioria dos modelos numéricos, sempre teve uma consideração semiestacionária, assim as imprecisões e oscilações numéricas ficaram evidentes em estudos realizados por Bergant *et al.* (2006). Além disso, os mesmos estudos revelaram discrepâncias significativas na atenuação e na temporização do histórico de pressão. O embasamento matemático foi comparado com os dados experimentais de Bergant *et al.* (2001b), Brunone e Golia (1990), Bughazem e Anderson (1996), Holmboe e Rouleau (1967), Shu (2003a), Simpson e Bergant (1994), Vardy (1980) e Brunone *et al.* (1995).

Diante disso, modelos de atrito variável foram desenvolvidos ao longo dos anos e o primeiro grupo de modelos foi iniciado em 1968 por Zielke. Em seu modelo, a tensão de cisalhamento da parede da tubulação é a resultante de uma soma semiestacionária acrescido a um termo em que são dadas as mudanças de velocidades anteriores. Vale ressaltar que esse modelo resolve transientes em fluxo laminar.

No modelo inicial de Zielke (1968), assume-se que a pressão p e a densidade ρ são constantes na seção transversal da tubulação e a velocidade está relacionada ao tempo e a distância do eixo do tubo. Este método permitiu alcançar uma dependência funcional entre a transformação da parede da tensão de cisalhamento e a aceleração do tubo. A transformação inversa levou a equação em que a inertância da tubulação pode ser relacionada à aceleração local do fluxo, por meio da ponderação da função $W(t)$.

De forma a ampliar os trabalhos de Zielke para regime turbulento, Vardy *et al.* (1993) desenvolveram um modelo de turbulência bilinear para tubos lisos e rugosos. Já

Urbanowicz e Zarzycki (2012b) derivaram um modelo de convolução (CB) mais avançado para fluxo turbulento, assumindo uma de turbulência de quatro regiões.

Em geral, os modelos mencionados são baseados em dados experimentais na distribuição do coeficiente de viscosidade turbulenta. Vale salientar que os modelos CB são dependentes da convolução histórica de acelerações com uma função de ponderação.

Há outro grupo de modelos que se baseiam na proporcionalidade entre a instabilidade do fluxo e a aceleração variada de fluxo chefiada por Daily *et al.* (1956) e experimentalmente realizada por Carstens e Roller (1959). Atualizações desse modelo foram objetivo de alguns estudos incluindo o de Brunone e Greco (1990), com a inclusão da aceleração instantânea.

Esse Modelo de aceleração instantânea (IAB) sugerido por Brunone e Greco (1990) e posteriormente atualizado por Vitkovsky *et al.* (2000) é dependente da aceleração instantânea, da aceleração convectiva e de um coeficiente de amortecimento. O coeficiente de amortecimento pode ser encontrado empiricamente ou através de valores derivados de alguns trabalhos, como o de Vardy *et al.* (1993). Além disto, a partir do número de Reynolds inicial, o coeficiente de amortecimento pode ser encontrado como um valor fixo e também como um valor com variação local, a qual demonstra melhores resultados.

Além dos grupos de modelos citados anteriormente, existe o modelo termodinâmico irreversível estendido (EIT), que consiste em um método que descreve o amortecimento da onda de forma empírica. O EIT não foi tão difundido na ciência, pelo fato de propriamente empírico, por esse motivo, os modelos de convolução e aceleração instantânea terão maiores aprofundamentos nesse trabalho.

Vários trabalhos tais como, Simpson e Bergant (1994) e Dinh Tam (2009) investigaram o desempenho dos modelos semiestacionários e os três tipos distintos de modelos do fator de atrito variável que são: os de Brunone *et al.* (1991a, 1991b), Hino *et al.* (1977) e Zielke (1968). Os resultados dos cálculos foram comparados com os resultados experimentais para um fechamento de válvula rápido em um sistema simulado por um fechamento de válvula.

Shuy e Apelt (1983) realizaram estudos e analisaram numericamente cinco diferentes modelos de atrito, que são, os modelos de fator de atrito fixo, ou seja, o atrito não varia ao longo do tempo, semiestacionário e três variáveis. Os autores examinaram transientes “lentos” em duas tubulações longas, com respectivos comprimentos de 2,3 km e 9 km. Por consequência, encontraram pequenas diferenças nos resultados dos cinco modelos. Por outro lado, ocorreram grandes discrepâncias entre os resultados, para a situação que ocorre separação

de colunas líquida, pois esta tem uma variação muito rápida na pressão e na velocidade do fluxo, quando os vazios colapsam.

Segundo Trikha (1975), em transientes muito lentos, a aproximação das perdas por atrito mostra resultados satisfatórios, caso de fluxo de massas. De forma complementar, a pesquisa de Lambert *et al.* (2000) revelou que as perdas de cargas provocadas pelo atrito são afetadas pela instabilidade no fluxo, posteriormente causando turbulência.

De forma histórica, numerosos modelos de fator de atrito variável foram propostos até hoje, incluindo modelos de um (1D) e (2D) de Brereton (1995), Gündogdu e Çarpinlioglu (1999) e Stecki e Davis (1986). No entanto, os modelos 1D aproximam o perfil real da velocidade da seção transversal e as correspondentes perdas viscosas de diferentes maneiras.

Segundo Dinh Tam (2009), em transientes mais rápidos, o fator de atrito variável tem maior influência sobre as ondas de pressão. No modelo de Tam foram realizados com inclusão do ar e celeridade variável. Ademais, considerou-se neste modelo as perdas devido à natureza do fluxo e às características do fluido.

Mais recente, Norooz e Shamloo (2016), analisaram e adaptaram os modelos com fator de atrito variável, utilizando como referência Brunone *et al.* (2000), Vardy e Brown (1995) e Vítkovský *et al.* (2000). Para obtenção dos resultados, uniu-se o termo de atrito variável ao modelo de cavidade de vapor discreto bidimensional, por fim comparou o modelo 1D com o 2D.

Em seu estudo sobre modelagem computacional, Jensen *et al.* (2018) analisaram os modelos de convolução e aceleração instantânea implementados no *software Matlab*, além do atrito, nessa modelagem foi abordada a influência do fluxo bifásico na ocorrência de transitório hidráulico.

A dissipação de energia tem sido estudada em diversos trabalhos até os dias atuais, tais como Abdeldayem *et al.* (2021), Araújo Paiva *et al.* (2021), Cao *et al.* (2022), Coronado-Hernández *et al.* (2021), Florêncio *et al.* (2022), Zhou *et al.* (2021a) e Zhou *et al.* (2021b), que revelam a importância da consideração desse termo no cálculo do transiente hidráulico.

O termo de atrito é representado pela soma do atrito semiestacionário com o atrito variável representado pelo J . Assim será a representação dele para cumprimento do objetivo desse estudo.

$$J = J_q + J_u \quad (77)$$

2.5.1 Semiesticionário

Nesses modelos, a dissipação de energia no escoamento ao longo da tubulação é adotada como constante. Com isso, a resistência ao escoamento torna-se permanente a partir da velocidade média na seção. Portanto, métodos “*quasi-steady*” ou semiesticionário são utilizados na análise do golpe de aríete em adutoras, como por exemplo a equação universal de perda de carga (78) (Cao *et al.*, 2022).

Equação Universal da Perda de Carga ou Darcy–Weisbach é a base para a equação do atrito quase-estável.

$$J_q = \frac{fQ|Q|}{2DA^2} \quad (78)$$

O fator de atrito pode ser definido como laminar e turbulento, dependendo do número de Reynolds do fluxo. Com isso expõe-se as equações para cada escoamento:

- Laminar $Re < 2000$ (Hagen-Poiseuille)

$$f = \frac{64}{Re} \quad (79)$$

- Turbulento $Re > 4000$ (Colebrook-White)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (80)$$

2.5.2 Modelos de Convolução

Esses modelos são dependentes da convolução do histórico de acelerações com uma função de ponderação. Primeiro estudo foi realizado por Zielke (1968) para fluxo laminar, posteriormente Vardy *et al.* (1993) ampliaram os trabalhos de Zielke para regime turbulento, desenvolvendo um modelo de turbulencia bilienar para tubos lisos e rugosos (Vardy *et al.*, 1993).

Este método permitiu alcançar uma dependência funcional entre a tensão de cisalhamento e a aceleração do tubo. A transformação inversa levou a equação em que a inertância da tubulação pode ser relacionada à aceleração local do fluxo por meio da ponderação da função $W(t)$ (Vardy e Brown, 2003). Ademais, o modelo de convolução depende da

convolução da velocidade no passo de tempo anterior juntamente com a função de ponderação, como exposto na equação (81):

$$J_u = \frac{16\mu}{\rho D^2 A} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot W(\tau) \right) \quad (81)$$

μ - Viscosidade dinâmica – [M.T⁻¹.L⁻¹]

$W(\tau)$ – Função de ponderação (adimensional)

A função peso W é dependente de um adimensional de tempo τ

$$\tau_{j,k} = \frac{4\mu\Delta t}{\rho D^2} \quad (82)$$

Pesquisas posteriores de Vardy e Brown (2004) estudaram o modelo de viscosidade para Reynolds até 10⁸, com isso verificou-se duas regiões turbulentas nas bordas que variam linearmente até o centro e na faixa central fica constante. Assim possibilita assumir que a viscosidade nas paredes é igual a viscosidade laminar, com isso a função ponderação pode ser expressa para tubulações lisas e rugosas (Zhou *et al*, 2021).

$$W(\tau) = \frac{A^* e^{-\tau B^*}}{\sqrt{\tau}} \quad (83)$$

- Tubulação com paredes lisas:

$$A^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \quad B^* = \frac{Re^k}{12,86} \quad k = \log \frac{15,29}{Re^{0,0567}} \quad (84)$$

- Tubulação com paredes rugosas:

$$A^* = 0,0103 \sqrt{\frac{Re}{\epsilon/D^{0,39}}} \quad B^* = 0,352 \sqrt{\frac{Re}{\epsilon/D^{0,41}}} \quad (85)$$

Em que:

ϵ/D é chamada de rugosidade relativa

Mais recentemente, Urbanowicz e Zarzycki (2012b) atualizaram a função ponderação pela derivação de um modelo de convolução mais avançado para fluxo turbulento assumindo uma turbulência de quatro regiões.

$$W(\tau) = C \frac{1}{\sqrt{t}} Re^n \quad (86)$$

Em que:

$$C = 0,299635$$

$$n = -0,005535$$

Vale ressaltar que trabalhos desenvolvidos por meio do método de Zielke demandam grande esforço computacional. Em vista disso, alguns pesquisadores tais como, Ghidaoui *et al.* (2002), Trikha (1975), Vardy e Brown (2004), Vardy *et al.* (1993) e Vítkovský *et al.* (2004) melhoraram a eficiência computacional através de uma nova formulação para a função peso “W”, isso resultou em uma ampla aplicação, possibilitando a realização de simulações em fluxos turbulentos.

No mesmo estudo, Vardy *et al.* (1993) afirmaram que as variáveis A_m e B_m apresentam resultados próximos aos dados experimentais. Quando sua aproximação fica apenas em segunda ordem, vale enfatizar que os valores dessas variáveis adimensionais dependem do valor de τ . Entretanto, devido à falta de experimento para calibração de A_m e B_m , realiza-se procedimentos estatísticos utilizando a aproximação. Abaixo serão expostas as equações referentes a esses estudos citados anteriormente (Vardy; Brown, 2004; Vardy *et al.*, 2007).

$$Z_{j,k} = \frac{16\mu a \Delta t}{\rho g D^2} \quad (87)$$

$$Y_{m,k} = Y_{m,k-\Delta t} e^{-\tau B_m} + \frac{A_m}{A} (Q_{j,k-\Delta t} - Q_{j,k-2\Delta t}) \quad (88)$$

$$J_u = Z_{j,k} \sum_{m=1}^N Y_{m,k} \quad (89)$$

2.5.3 Modelos de Aceleração Instantânea

O estudo sistemático do modelo de aceleração instantânea foi sugerido por Brunone *et al.* (1991b, 1991a), Brunone e Golia (1990) e Brunone e Greco (1990) assumindo que a aceleração instantânea, a aceleração convectiva e o coeficiente de amortecimento são variáveis fundamentais para descrição do método (Vítkovský *et al.*, 2006).

Nesse modelo as perdas por atrito são baseadas na suposição de que a inertância é proporcional ao local e na convecção derivada da velocidade média do fluxo da tubulação. Já o coeficiente de amortecimento pode ser encontrado empiricamente ou através de valores derivados de alguns autores tal como Vardy e Brown (2003).

Ademais, a partir do número de Reynolds inicial, pode ser encontrado o coeficiente de amortecimento, tanto como um valor fixo e também como um valor com variação local (Adamkowski; Lewandowski, 2006).

Em termos gerais, o modelo de Brunone apresentou resultados menos expressivos do que os modelos de multicamadas, todavia, para valores altos do número de Reynolds, o método fica mais convergente com os resultados experimentais. Porém, em termos de amortecimento é semelhante, além disso, no topo das ondas, a convergência diminui pelo fato do modelo de Brunone apresentar topos mais largos em seus resultados (Adamkowski; Lewandowski, 2006).

A vantagem deste método é a eficiência na utilização em simulações numéricas, pelo fato de os valores calculados de velocidade no tempo anterior da malha não terem a necessidade de armazenamento no histórico de velocidades (Soares, 2007).

Usando essa abordagem, Vitkovsky *et al.* (2000) realizaram estudos do fluxo transitório considerando o atrito variável. Com isso eles propuseram uma correção de sinal do modelo de Brunone em virtude de algumas instabilidades verificadas em testes.

$$J_u = \frac{a_{j,k} k_3 \Delta t}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} - a_{j,k} \cdot \text{sign}(Q) \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \quad (90)$$

k_3 – Coeficiente de Brunone ou amortecimento (adimensional)

$\frac{\partial Q}{\partial t}$ – Aceleração local instantânea – $[L^3 \cdot T^{-1}]$

$\frac{\partial Q}{\partial x}$ – Aceleração convectiva instantânea (movimento das partículas) – $[L^2]$

Segundo a literatura de Zhou *et al.* (2021) o sinal “sign” é positivo quando $V \geq 0$ e negativo quando $V < 0$. Já o coeficiente de atrito de Brunone “ k_3 ” pode ser encontrado empiricamente ou analiticamente pelo coeficiente de decaimento de cisalhamento de Vardy, C^*

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (91)$$

$$C^* = 0,000476, \text{ para fluxo laminar} \quad (92)$$

$$C^* = \frac{7,41}{Re^{\log\left(\frac{14,3}{Re^{0,05}}\right)}}, \text{ para fluxo turbulento} \quad (93)$$

A implementação do modelo de aceleração instantânea foi feita explicitamente por meio das diferenças finitas de primeira ordem com o caráter positivo, como mostrado nas equações (94) e (95), e caráter negativo, diante das equações (96) e (97) (Jensen *et al.*, 2018).

$$\frac{\partial Q^+}{\partial t} = \frac{Q_{j-1,k-\Delta t} - Q_{j-1,k-2\Delta t}}{\Delta t} \quad (94)$$

$$\frac{\partial Q^+}{\partial x} = \frac{Q_{j,k-\Delta t} - Q_{j-1,k-\Delta t}}{\Delta x} \quad (95)$$

$$\frac{\partial Q^-}{\partial t} = \frac{Q_{j+1,k-\Delta t} - Q_{j+1,k-2\Delta t}}{\Delta t} \quad (96)$$

$$\frac{\partial Q^-}{\partial x} = \frac{Q_{j+1,k-\Delta t} - Q_{j,k-\Delta t}}{\Delta x} \quad (97)$$

Embora o atrito variável tenha efeito notório nos transientes hidráulicos, os *softwares* comerciais raramente o utilizam. Mesmo assim, atualmente os pesquisadores estão focando seus trabalhos em atrito variável no golpe de aríete. Assim, os modelos 1D estão sendo associados ao modelo do atrito variável, resultando em uma melhor dispersão das ondas de pressão (Abdeldayem *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será abordado o caminho metodológico para desenvolvimento do modelo numérico, juntamente com as ferramentas estatísticas de modo a obter-se uma análise quantitativo e qualitativo dos resultados.

3.1 Critério de seleção dos dados experimentais

Coletou-se da literatura 6 trabalhos que tivessem os mesmos dispositivos de contorno, que no caso são os reservatórios a montante de nível fixo e uma válvula de fechamento a jusante. Outro critério escolhido foi a topografia do experimento utilizado para obtenção dos dados, para isso, todos possuem geometria linear com variação de comprimento. Por fim, os outros parâmetros, tal como, vazão, pressão inicial e material da tubulação não foram restringidos, a fim de diversificar o nível de análise do modelo numérico.

Todos os experimentos foram numerados por Casos, sendo que no primeiro experimento foi de Chaudhry *et al.* (1990), com 1 caso, o segundo foi Soares *et al.* (2015) com 2 casos sendo um com incidência de cavitação, o terceiro foi Simpson (1986), com 4 casos diferentes, posteriormente foi Traudt *et al.* (2016) com 2 casos que variam vazão e altura manométrica, em sequência foi de Bergant *et al.* (1991) com 2 casos distintos e por último foi de Adamkowski; Lewandowski (2006) com 1 caso, assim totaliza-se 12 casos diferentes com 6 experimentos distintos.

3.2 Método Numérico Proposto

A fim de compreender o transiente hidráulico com a cavitação, buscou-se na literatura acadêmica métodos que pudessem ser implementados computacionalmente. Para isso os principais métodos citados no meio acadêmico foram unidos e adaptados de forma que o fluxo bifásico pudesse ser entendido não somente como gás e o líquido ou o vapor e o líquido, mas de uma maneira que tudo que não fosse líquido seria incluído no cálculo de uma adimensional, mas respeitando o processo termodinâmico.

Primeira compatibilidade estabelecida foi a escolha do método que resolvesse as equações do momento e continuidade, a partir disso todo método complementar seria ligado ao método numérico inicial.

Assim, definiu-se o MOC como o método base para desenvolvimento do trabalho. Com isso os métodos de fluxo bifásico, celeridade variável, fator de atrito variável e processo termodinâmico são resolvidos pelo MOC de forma unidimensional, ou seja, as variáveis só alteram de valor ao longo do comprimento da tubulação.

Além do Método das Características, o DGCM foi selecionado para resolver as equações de forma que o fluxo seja bifásico. Esse método considera uma cavitação gasosa tanto pontual como distribuída, com isso a nova equação da fração de vazão inicial poderá ser implementada. De forma complementar, considera-se a celeridade da onda variável, sendo dependente da pressão e da fração de vazão. Por fim, para o atrito variável, utilizou-se o método de aceleração instantânea e a nova equação do coeficiente de amortecimento. Vale salientar que todos os equacionamentos foram mostrados no Capítulo 2 anterior desse trabalho. E foram implementados computacionalmente no programa UFC7.

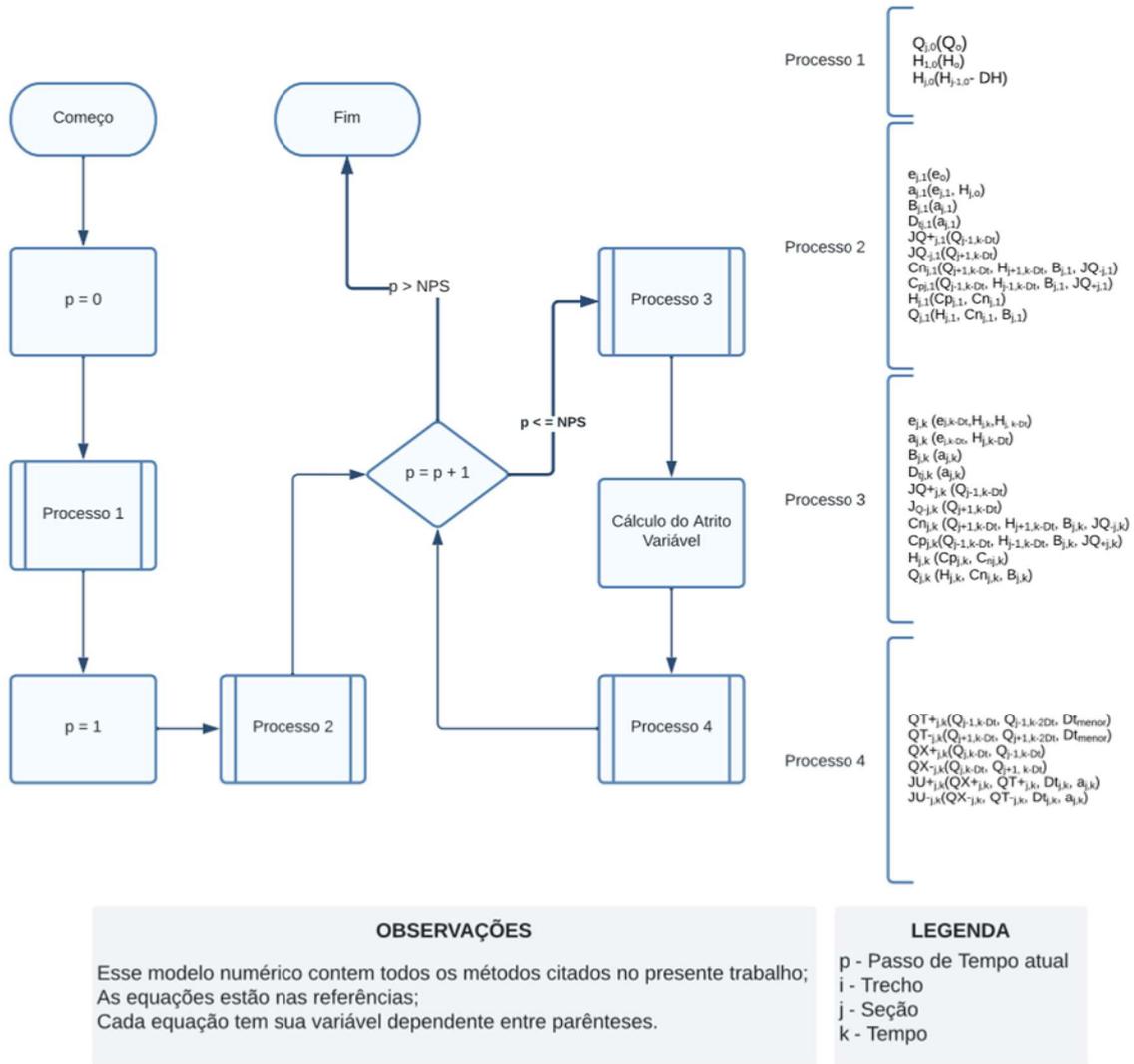
No item 3.3, será apresentado um fluxograma de trabalho para melhor entendimento da interação entre os métodos para criação dos modelos computacionais, desde os dados de entrada até a finalização da simulação. De forma elucidativa as variáveis pertencentes em cada etapa, terão entre parênteses seus termos dependentes.

A simulação inicia no estado permanente (Processo 1) dessa forma o $p = 0$, nesse sentido a variável de vazão (Q) é constante e a variável de carga (H) reduz em cada seção da tubulação com a perda de carga. Posteriormente no (Processo 2) a simulação torna-se transiente, porém o atrito é considerado constante e a celeridade leva como referência a carga no estado permanente. Em seguida no (Processo 3) os métodos tornam-se variáveis contemplando o MOC, DGCM, celeridade variável e atrito semiestacionário (Equação Universal). Por último no (Processo 4) o atrito é variável utilizando as equações de Brunone.

O passo de tempo atual (p) é essencial na simulação, pois ao atingir valor maior que o NPS (número de passo de tempo) a simulação é encerrada. Nesse fluxograma mostra que $p = 0$ o estado da simulação é permanente, $p=1$ o estado é transiente, mas ainda existem variáveis constantes e outras dependentes de valores permanentes, $p=p+1$ o estado é transiente e todas os métodos são variáveis inclusive o atrito e a celeridade.

3.3 Fluxograma de trabalho para modelagem computacional

Fluxograma 1 – Fluxograma simplificado dos métodos adotados



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.4 Ferramentas para modelagem do Método

Desde meados de 1960 até hoje, os métodos aplicados computacionalmente têm dado um grande salto, sendo possível modelar adutoras de água, emissário, rede de distribuição de água, além de dispositivos que atenuam o efeito do golpe de aríete, tais como, ventosas, chaminés de equilíbrio, reservatório hidropneumático entre outros (Chaudhry, 2014; Wylie *et al.*, 1993).

Diante disso, surgiram diversos *softwares* de modelagem, tanto para adutoras como também para redes de distribuição de água. No trabalho de Abdeldayem *et al.* (2021) são mencionados alguns programas, sendo que grande parte deles utiliza o MOC como método para resolver as equações fundamentais.

Os principais *softwares* mencionados na pesquisa de Abdeldayem *et al.* (2021) são: HAMMER (*Bentley Systems, Inc*), ALLIEVI (*University Politecnica de Valencia*), WANDA (*Deltares*), TRANSAM (*University of Toronto*), HYTRAN (*University of Auckland*) e PIPENET (*University of Cambridge*).

Estes *softwares* são frutos de pesquisas acadêmicas ou corporativas, o que demonstra o avanço computacional sobre o estudo transiente. Nesse mesmo contexto, no presente trabalho, foi realizada uma modelagem computacional do transiente hidráulico, levando em consideração todos os objetivos apresentados, tais como, modelar fluxo bifásico, celeridade variável, atrito variável, processo termodinâmico e fração de vazio, inicialmente executadas no Excel e posteriormente no Java dentro do *software* UFC7.

3.4.1 Utilização do Excel

Após a análise bibliométrica e seleção dos métodos a serem utilizados que fizessem parte da resolução dos objetivos do trabalho, iniciou-se o processo de implementação dos modelos no Excel. Vale salientar que esse modelo será composto de uma fração de vazio que inicialmente será arbitrária e, ao longo da simulação, será respeitado o processo termodinâmico de expansão e compressão. Lembrando que a fração de vazio adotada neste trabalho será uma consideração geral para inclusão de tudo que não é líquido dentro da tubulação e, além disso, os termos celeridade e atrito serão variáveis nos modelos finais.

Para desenvolvimento da modelagem no Excel (Apêndice A), entende-se que o experimento realizado por Chaudhry *et al.* (1990) atende as necessidades, pois os contornos se

adequam ao método a ser implementado, que no caso seriam o reservatório a montante e a válvula de fechamento a jusante.

A primeira etapa foi dividir a planilha em 4 abas, sendo a primeira com os dados de entrada e o gráfico dos resultados gerados e as outras 3 serão referentes aos cálculos de cada trecho da tubulação.

Posteriormente, foi escolhido o número de divisões da tubulação para organização das colunas, pois para cada seção haverá uma carga de pressão, vazão, celeridade, variação do tempo e fração de vazio, que por sua vez, são variáveis não constantes, pois dependem da topologia analisada, intensidade da onda e vários outros fatores.

Por fim, foi simulado com os dados utilizados por Dinh Tam (2009) variando alguns fatores, tais como, tempo de fechamento da válvula e fração de vazio inicial até o comportamento permanecer próximo as análises experimentais

3.4.2 Utilização do Java e a implementação no UFC7

A modelagem computacional do método numérico proposto será realizada por meio da linguagem de programação JAVA, que tem como principal virtude sua orientação ao objeto. Assim as etapas de todo o processo podem ser divididas em classes e métodos, facilitando mudanças futuras. A cronologia a ser utilizada no desenvolvimento do programa, será embasada na planilha desenvolvida no Excel (Apêndice A).

De forma mais esclarecedora, o JAVA inicialmente foi desenvolvido pela *Sun Microsystems* e posteriormente adquirida pela *Oracle Corporation*. Essa linguagem pode ser utilizada para criar diversas aplicações e serviços, como, *web*, *desktops*, servidores e dispositivos móveis.

A implementação computacional do modelo numérico, por meio da linguagem JAVA, será realizada no *software* UFC7, que dispõe de uma ampla quantidade de bibliotecas, de fácil interação com o usuário, gerando gráficos que possibilitam exportação para o Excel.

Assim, torna mais amplo a forma de análises, além de sua facilidade de manipulação computacional, sendo pensado com o conceito que possibilita ampliação e melhorias, transcrevendo bem a afinidade do objeto de pesquisa do presente trabalho com as linhas de pesquisas em transiente hidráulico (Barbosa, 2015).

Abaixo na Figura 8 será exposto a parte interna do método implementado juntamente com a organização funcional do *software* UFC7. Essa imagem mostra ao leitor apenas uma pequena fração do código.

Figura 8 – Implementação computacional em linguagem de programação Java

```

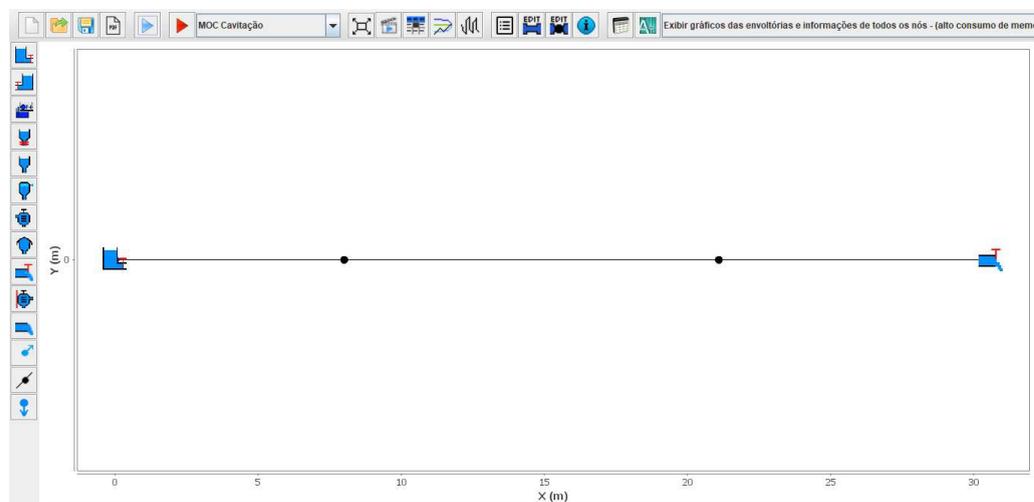
58      CEL[i][j]=cel;
59      vecCEL[i][j]=cel;
60      double passoTempo = getPassoTempo(cel,DXJ[i]);
61      if (menorDT==null) {
62          menorDT=(passoTempo);
63      }else {
64          menorDT=(Math.min(menorDT, passoTempo));
65      }
66      if (ei[i][j]!=0.0) {
67          iseidifzero=true;
68      }
69
70
71
72
73
74      DT=menorDT;
75      newDT=DT;
76
77      if (k>=DTVEC.size()) {
78          DTVEC.add(menorDT);
79          NP++;
80      }else {
81          DTVEC.set(k,menorDT);
82      }
83
84
85      for (String trecho : in.getTrecho()) {
86          i = in.getTrechoInt().get(trecho);
87          double AI = in.getAREA().get(trecho);
88          double G = 9.81;
89          double DI = in.getDI().get(trecho);
90          double f = perm.getf(1);
91          A[i] = AI;
92          int nSecs = sec[i];
93          j = 0;
94          while (j < nSecs) {
95
96

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Do lado esquerdo, na interface da tela inicial do *software* UFC, ficam organizados os dispositivos de contornos e atenuação do transiente. Na parte superior localizam-se os botões de simulação e de geração das planilhas com os dados calculados (Figura 9).

Figura 9 – Interface da tela inicial do *software* UFC7



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.5 Validação do modelo: métodos estatísticos

Conforme Streeter *et al.* (2000), há três soluções diferentes para entender um fenômeno físico. As soluções são as matemáticas exatas, os experimentos ou simulações laboratoriais e as soluções numéricas computacionais. Cada uma depende da forma de construção de um determinado modelo para resolver um problema.

Para alcançar a credibilidade do problema proposto, utiliza-se combinações de soluções observando a consistência das respostas dos diferentes métodos. Entende-se que o processo de comparação de informação laboratorial com um modelo de solução numérica denomina-se como validação. De mais a mais, pode-se utilizar, para estender a validade do problema, soluções anteriores conhecidas. Como de costume elabora-se resultados baseados em modelos numéricos ou simulações laboratoriais.

Há três considerações gerais para saber o tipo de solução a utilizar. A primeira é quando se conhece sobre os processos físicos que governam o campo do fluxo e se as equações governantes estão bem estabelecidas e aceitas. A segunda é a consideração de como a variável é fisicamente no espaço e tempo. A terceira é a consideração que se refere como é complexa ou simples a geometria do fluxo. Em geral, se as equações matemáticas ou funções ainda não tiverem sido estabelecidas para uma determinada geometria ou processo de fluxo, experimentos de laboratório são tradicionalmente realizados.

Dessa forma, visando aumentar o número de análises e obter maior número de soluções, este trabalho utilizará três modelos para a realização da modelagem computacional do golpe de aríete: o Modelo 1, composto apenas pelo MOC; o Modelo 2, utilizando o MOC, incluindo o DGCM; e o Modelo 3, com o MOC, acompanhado do atrito variável, o modelo DGCM com celeridade variável, processo termodinâmico e a fração de vazio.

Além disso, o coeficiente politrópico a ser utilizado será ($n = 1,34$), conforme trabalho experimental realizado por Magalhães *et al.* (2003), admitindo a proposição de Chaudhry (2014) para câmaras de ar de pequeno tamanho e transientes rápidos.

Vale salientar que nas pesquisas de Dinh Tam (2009) utilizou-se nas considerações da fração de vazio, condições separadas para ar e para gás. No novo método proposto neste trabalho, tudo que não é líquido é incorporado em ϵ_0 e esta consideração foi implementada no Modelo 3 (Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas).

Nesse sentido, a equação da fração de vazio (75) implementada no Modelo 3 foi baseada na propriedade adiabática do fluido e no desenvolvimento da equação de Laplace-

Poisson. Assim, toda a dilatação dos vazios durante o transiente é respeitada, pois os vazios se expandem e se contraem, dependendo da pressão atuante na seção computacional.

Entretanto, o valor de ε_0 e K são incógnitas do problema, que deve ser definido inicialmente para a modelagem do golpe de aríete. Nisso, será calibrado valores de ε_0 e K que mais se aproximam dos dados observados para cada teste, em torno de 0,0001, proposto por Chaudhry (2014), posteriormente os valores calibrados referentes a cada caso experimental será adotado como valor de referência.

Para a verificação dos modelos propostos neste trabalho, serão utilizados os resultados experimentais de Chaudhry *et al.* (1990), (Caso 1), Soares *et al.* (2015) (Casos 2 e 3), Simpson (1986) (Caso 4 a 7), Traudt *et al.* (2016) (Caso 8 e 9), Bergant e Simpson (1999) (Caso 10 e 11) e Adamkowski e Lewandowski (2006) (Caso 12). Todos com uma tubulação na posição horizontal, em um sistema Reservatório-Tubulação-Válvula. Cujo transitório será modelado através fechamento de uma válvula a jusante do sistema.

A análise dos resultados dos modelos foi realizada através dos indicadores estatísticos: Erro Relativo (ER) (98), Erro Quadrático Médio (EQM) (99) e Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (100), de acordo com os trabalhos de Martins *et al.* (2014) e Saeml *et al.* (2019).

Com estes indicadores, foram verificados, os resultados experimentais de cada teste, a acurácia entre Modelos 1, 2 e 3 e entre as frações de vazio ε_0 e coeficiente de amortecimento K que foram arbitrados para o Modelo 3. Esses métodos estatísticos possuem uma faixa de aceitação das medidas, para o ER quanto mais próximo de zero melhor o resultado, já o NSE quanto mais próximo de 1 os resultados são mais aceitáveis e por último o EQM quanto menor seu valor melhor é a análise.

$$ER = \frac{|P_{exp} - P_{cal}|}{P_{exp}} \quad (98)$$

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (P_{exp} - P_{cal})^2} \quad (99)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (P_{exp} - P_{cal})^2}{\sum (P_{exp} - P_{Mexp})^2} \quad (100)$$

Em que:

P_{exp} – Carga de Pressão dos dados experimentais;

P_{cal} – Carga de Pressão calculado;

P_{Mexp} – Carga de Pressão Média dos dados experimentais;

N – Número de dados.

Os 3 Modelos serão submetidos a simulações de diferentes diâmetros, vazões e cargas hidráulicas, arbitrando-se três valores de frações de vazios iniciais, buscando-se a mais adequada para cada caso experimental. O golpe de aríete será devidamente simulado, plotando-se os gráficos de variação de carga na seção computacional que representa a válvula de fechamento a jusante do sistema hidráulico para cada caso.

A variação de carga na seção computacional da válvula de fechamento será normalizada em todas as simulações, com a finalidade de padronizar a análise dos resultados. Com isso, no eixo das ordenadas, será utilizada a carga de pressão na seção atual ($H_{j,k}$), a carga hidráulica inicial do trecho (H_o) e a equação de Joukowski (aV/g). No eixo das abscissas será utilizado o tempo computacional na seção e o tempo de viagem da onda ($2L/a$).

3.6 Proposição de uma equação da fração de vazio inicial

O método de cavitação proposto nesse trabalho precisa da fração de vazio no começo do regime transiente. Atualmente os valores são inseridos de forma aleatória até o fenômeno chegar em um comportamento adequado.

Visto isto, observou-se a necessidade do desenvolvimento de uma formulação que envolvesse algumas variáveis, pois com o valor coerente da fração de vazio, o comportamento do modelo tornar-se-á mais próximo aos dados experimentais, possibilitando um entendimento maior sobre o fenômeno físico. Também, o conhecimento das regiões na tubulação em que acontecem o acúmulo de vazios (vapor + gás) permitirá a melhor escolha do equipamento de atenuação do fenômeno ao projetista.

Para produção da equação, entende-se que os dados experimentais são de extrema importância, pois, a partir deles, será possível o desenvolvimento e a validação de métodos numéricos, além da criação de modelos computacionais. Pensa-se que a diversidade de dados experimentais aumenta a eficácia da validação, visto que situações diversas estarão imersas nos dados e influenciarão diretamente no cálculo, por isso selecionou-se 12 casos experimentais.

Portanto, essas informações experimentais, convergidas com a análise numérica (método de cavitação) e análise dimensional Song (2018) (Teorema do π ou Vaschy-Buckingham) resultaram em um modelo de grande relevância, pois integram o método numérico aos dados experimentais, formando um produto de validade que transpõe um entendimento maior do fenômeno transitório.

Para o estudo desse modelo, necessita-se da fração de vazio, sobre a qual não se conhece seu valor real aplicado ao fluido no regime transitório. Por este motivo, propõe-se um estudo dessa variável, uma vez que possibilitará aproximar o fenômeno simulado computacionalmente aos dados experimentais, evidenciando a velocidade da onda de forma congênere e os volumes de vazios ao longo de toda a tubulação, propiciando uma escolha mais eficiente dos equipamentos de atenuação do efeito.

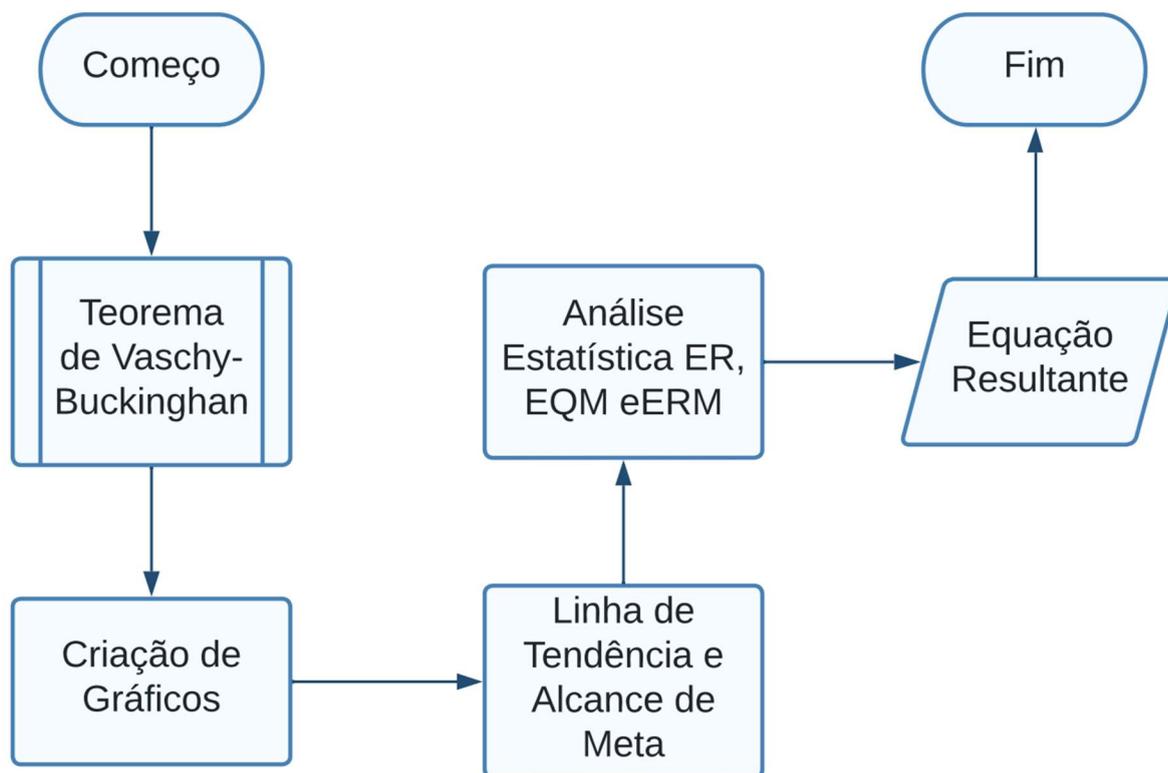
O processo de desenvolvimento desta equação é dividido em duas vertentes, obtenção de dados experimentais por meio da literatura e a análise numérica computacional. A sequência das etapas é crucial para obtenção dos resultados desejados, pois a negligência de algum passo reduzirá ou mostrará valores incompatíveis com o desejado.

Como mencionado na Seção 3.5, cada caso experimental terá três frações de vazios selecionadas mediante análises estatísticas. Assim, cada experimento terá sua fração de vazio inicial que mais converge com o fenômeno transitório. Por fim, através dos valores adquiridos pela variação de aspectos citados anteriormente, formulam-se gráficos que representam cada tipo de variação experimental.

Outrossim, após a coleta dos dados, foi realizada uma análise dimensional, chamada de Teorema do π ou Vaschy-Buckingham que, por sua vez, apresenta números adimensionais que representam o fenômeno estudado, possibilitando a generalização dos dados adquiridos por análises experimentais. Ademais, o teorema necessita da definição das variáveis que compõem o fenômeno, do número de grandezas fundamentais que participam da análise, do número de adimensionais e , por último, das bases adimensionais que participaram do modelo (Bakarji *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2018).

Vale enfatizar que os valores adquiridos de cada caso experimental resultarão em 12 frações de vazio com diferentes situações de vazão, diâmetro e pressão. Isso possibilitará o desenvolvimento da equação, juntamente com o teorema do π e as análises gráficas. De forma elucidativa na Fluxograma 2 será exposto o processo de proposição da equação da fração de vazio inicial.

Fluxograma 2 – Fluxograma do processo de formulação das equações



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4 RESULTADOS

Os resultados foram divididos por cada trabalho experimental obtido na bibliografia, assim pôde-se analisar individualmente os modelos implementados computacionalmente, como também o novo método proposto.

Em seguida, foi proposta uma nova equação da fração de vazio inicial, como também uma nova equação do coeficiente de amortecimento da onda de pressão. O trabalho foi comparado com 12 casos diferentes sendo realizados por 6 autores distintos, com isso será exposto abaixo uma Tabela que compõe as principais informações de cada caso utilizado (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados relevantes de cada caso experimental utilizado neste trabalho

Caso	Carga no Reservatório à Montante (m)	Velocidade Inicial (m/s)	Comprimento da Tubulação (m)	Diâmetro da Tubulação (m)	Espessura da Tubulação (m)	Celeridade da Onda (m/s)
1	8,13	2,420	30,60	0,02600	0,00100	715
2	46,00	0,424	15,22	0,02000	0,00100	1255
3	46,00	0,497	15,22	0,02000	0,00100	1255
4	24,30	0,239	36,00	0,01905	0,00158	1280
5	23,41	0,332	36,00	0,01905	0,00158	1280
6	23,38	0,401	36,00	0,01905	0,00158	1280
7	23,16	0,466	36,00	0,01905	0,00158	1280
8	432,05	2,750	7,67	0,01900	0,00150	1392
9	438,17	2,940	7,83	0,01900	0,00150	1392
10	22,00	0,300	37,23	0,02210	0,00160	1339
11	12,00	0,300	37,23	0,02210	0,00160	1339
12	128,00	0,940	98,11	0,01600	0,00100	1298

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Reforça-se que todos os resultados foram comparados através de uma análise estatística, levando em consideração a concepção física do transiente hidráulico. De forma complementar, implementou-se o teorema de Vaschy-Buckingham garantindo uma adimensionalidade de cada caso testado.

Com a finalidade de padronizar a análise dos resultados, a variação de carga na seção computacional da válvula de fechamento foi normalizada em todas as simulações. Com isso, no eixo das ordenadas, utilizou-se a carga de pressão na seção atual (H_k), a carga hidráulica

inicial do trecho (H_0) e a equação de Joukowski (aV/g). No eixo das abscissas utilizou-se o tempo computacional na seção e o tempo de viagem da onda ($2L/a$).

Salienta-se que após a calibração dos valores da fração de vazio inicial e do coeficiente de amortecimento de cada caso experimental aplicados no Modelo 3, variou-se o e_0 e o K , a fim de observar o comportamento dessas variáveis no fenômeno transitório. Sendo que, ao analisar uma dessas variáveis as outras permanecem fixas (Tabela 2).

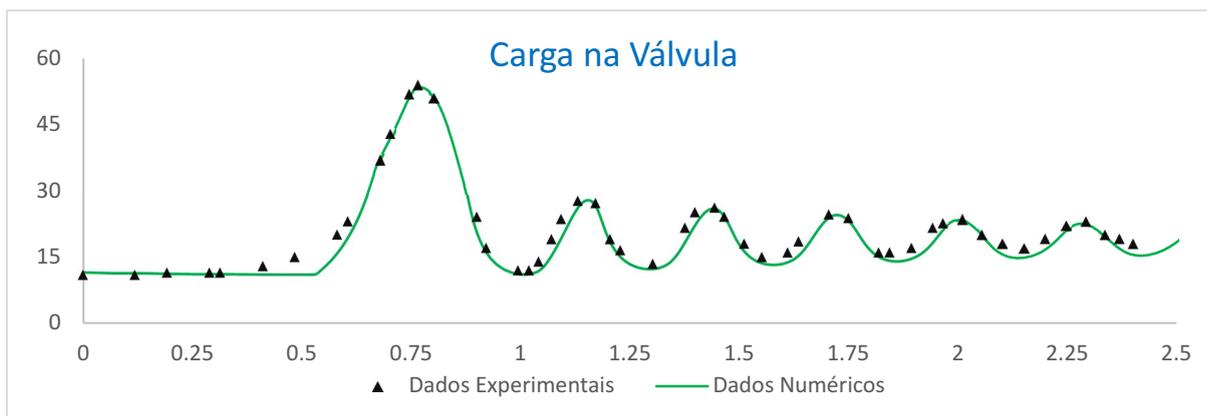
Para a fração de vazio inicial, verificou-se suas influências em fluxos cavitantes e não cavitantes como também o comportamento dos picos de sobrepressão e subpressão. Ademais, no coeficiente de amortecimento da onda de pressão, estudou-se sua importância em fluxos diversos aplicados a experimentos com pouco tempo de simulação. Por fim, o tempo de fechamento foi estudado para salientar a importância do fechamento nas ondas de pressão desde o primeiro até o último pico.

Tabela 2 – Valores utilizados na simulação do Modelo 3

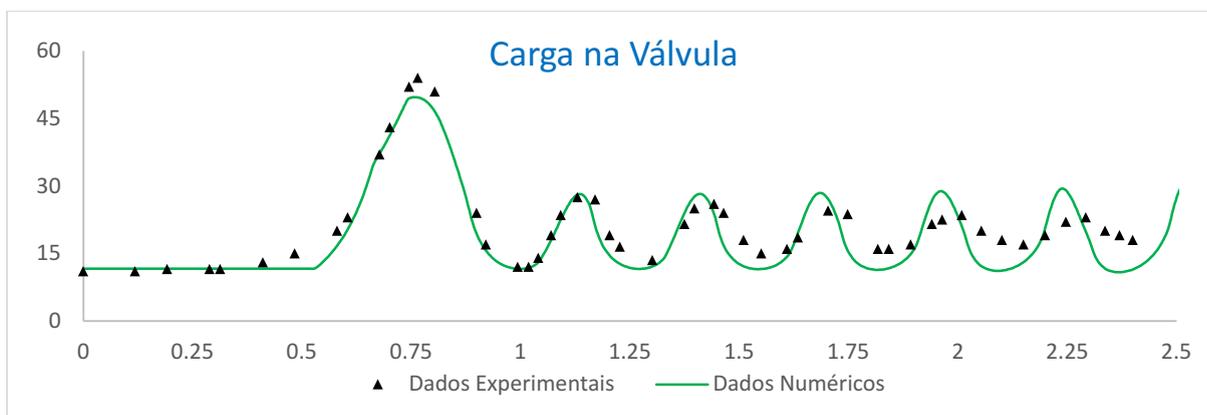
Caso	Fração de vazio inicial	Coefficiente de amortecimento	Tempo de fechamento
1	0,001320	0,090	0,600
2	0,000037	0,020	0,012
3	0,000001	0,050	0,012
4	0,000043	0,020	0,030
5	0,000050	0,100	0,010
6	0,000120	0,050	0,010
7	0,000200	0,020	0,010
8	0,000200	0,035	0,009
9	0,000010	0,070	0,009
10	0,000040	0,060	0,012
11	0,000150	0,010	0,012
12	0,000050	0,035	0,120

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os gráficos resultantes de uma modelagem realizada no Excel serviram como base para a elaboração de uma programação mais aguçada em linguagem de programação JAVA, implementada no *software* UFC7 (Gráfico 5 e Gráfico 6).

Gráfico 5 – Testes executados em planilha do *software* Excel, aplicando o Método de Atrito Variável de Brunone

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 6 – Testes executados em planilha do *software* Excel, aplicando um modelo de atrito semiestacionário

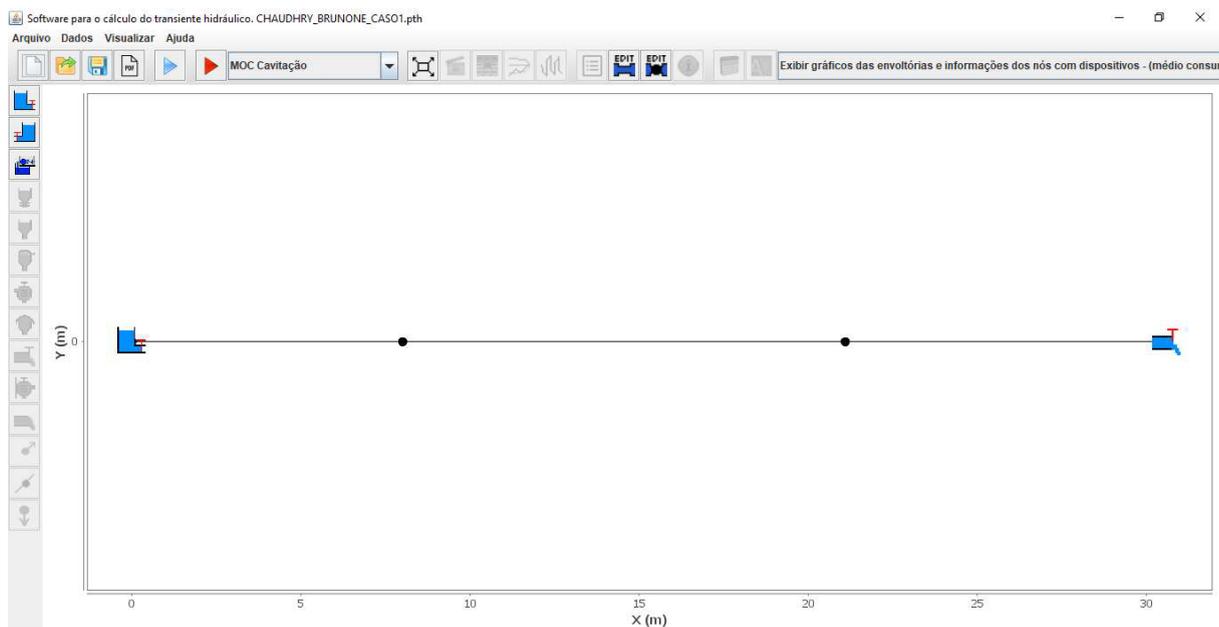
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados gerados neste trabalho foram frutos de uma combinação de métodos ainda não estudados na literatura, com a consideração de um fluxo bifásico, celeridade variável, atrito variável, processo termodinâmico e fração de vazio, tudo isso foi resolvido pelo MOC e comparado aos dados experimentais do trabalho de Chaudhry *et al.* (1990).

4.1 Experimento de Chaudhry (1990)

O experimento realizado por Chaudhry em 1990 no laboratório de hidráulica do Instituto tecnológico de Georgia possui uma tubulação de mesmo nível em relação ao solo, com comprimento total de 30,6 m, diâmetro de 26 mm e espessura de 1 mm. Além disso, o esquema proposto simulou um sistema com reservatório – tubulação – válvula, utilizando tanques de ar comprimido (Figura 10).

Figura 10 – *Layout* do experimento de Chaudhry (1990) no *software* UFC7



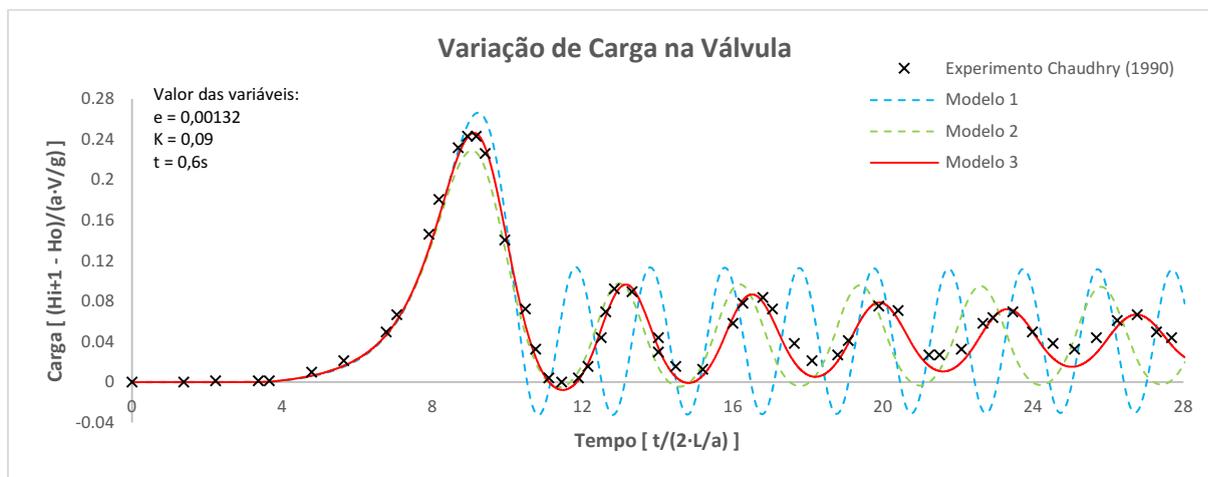
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.1.1 Análise dos resultados obtidos do Caso 1

O Caso 1 foi caracterizado por um fluxo com bolhas de ar, pois Chaudhry (1990), ao realizar o experimento, injetou ar a montante da tubulação do sistema. Nesse contexto, o Modelo 3 apresentou comportamento próximo aos dados experimentais, principalmente nos picos de sobrepressão.

Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Figura 7). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 7 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 1)



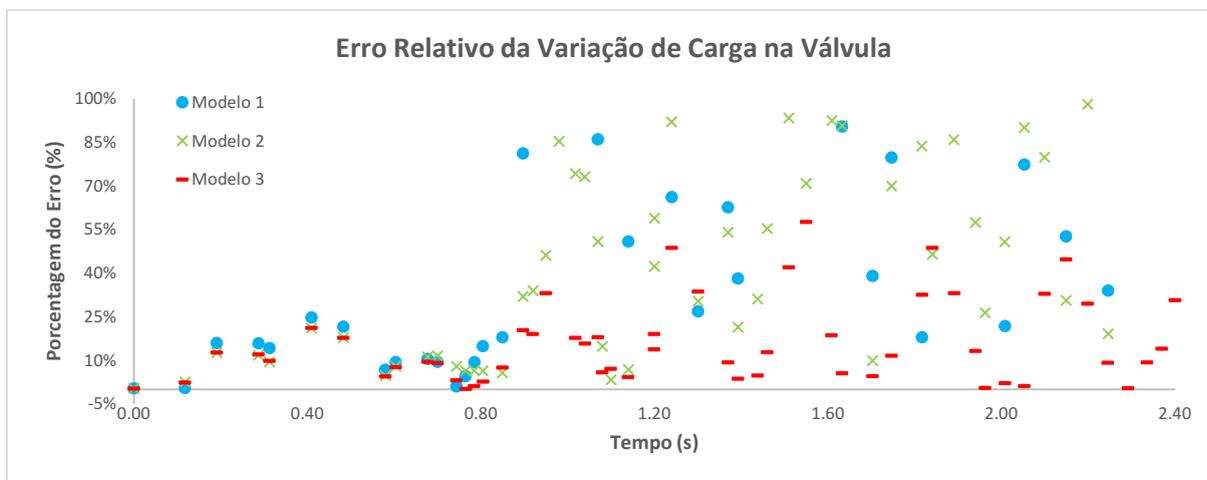
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Neste gráfico, o Modelo 1 é representado pelo Método das Características (MOC); o Modelo 2 é o MOC incluindo o *Discrete Gas Cavity Model* (DGCM) e o Modelo 3 é o Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas (CMVWD), desenvolvido neste trabalho.

Não houve a atenuação dos picos de carga de hidráulica ao longo do Regime Transiente nos Modelos 1 e 2 e os picos gerados pelo Modelo 3 mantiveram a fase em relação aos dados observados (Figura 7).

Apesar da injeção de bolhas de ar, não ocorreu separação de coluna, devido ao fechamento não instantâneo da válvula a jusante. No entanto, apesar da não atenuação dos picos de carga hidráulica, o Modelo 2 apresentou indicadores melhores em relação aos do Modelo 1, pois a quantidade de picos de pressão é mais próxima aos dados observados. O Modelo 3 mostrou resultados estatísticos superiores aos demais modelos, com 0,98 do coeficiente de Nash-Sutcliffe, pois quanto mais próximo de 1, melhor é a correlação entre os dados experimentais e o modelo numérico. Além de que, reproduz menor erro relativo, principalmente nos picos altos (Gráfico 8 e Tabela 3).

Gráfico 8 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

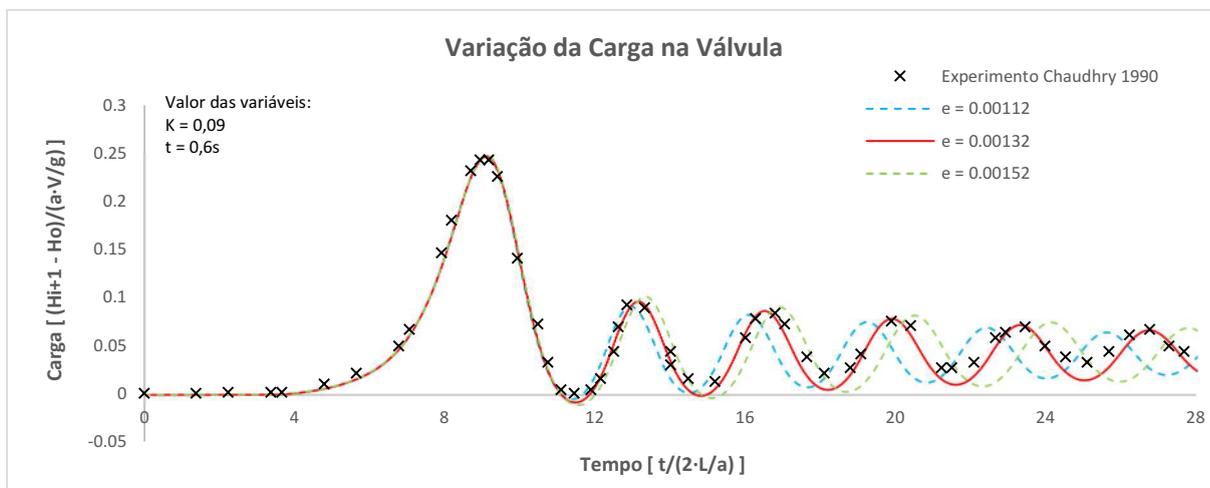
Tabela 3 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para Modelos 1, 2 e 3, com base em dados experimentais (Caso 1)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	9,252	0,256
Modelo 2	4,441	0,829
Modelo 3	1,507	0,980

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

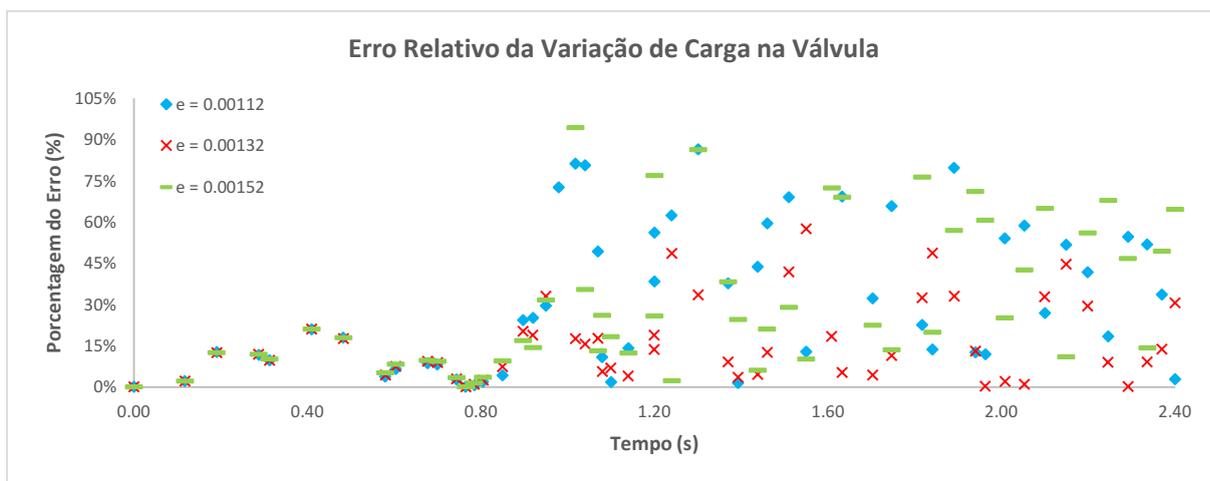
Para realizar a análise da sensibilidade da fração de vazio, escolheu-se dois valores, um superior (0,00112) e outro inferior (0,00152) ao parâmetro calibrado (0,00132). O valor de $\varepsilon_0 = 0,00132$ apresentou resultados mais ajustados aos observados (Gráfico 9, Gráfico 10 e Tabela 4).

Gráfico 9 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 10 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 4 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 1)

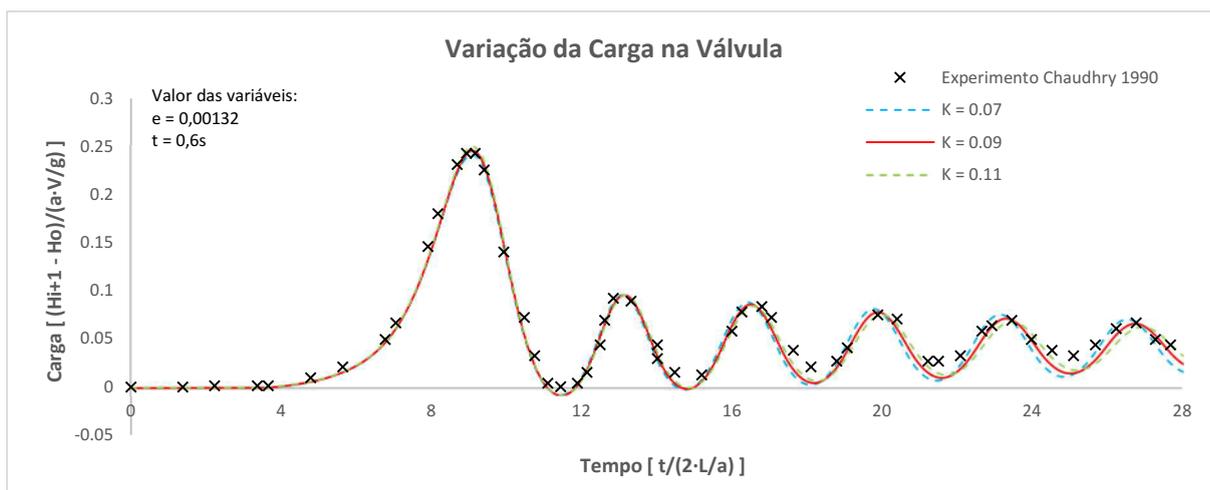
Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
e = 0,00112	3,499	0,894
e = 0,00132	1,507	0,980
e = 0,00152	3,271	0,907

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para realizar a análise da sensibilidade do coeficiente de amortecimento (K), comparou-se os dados experimentais aos resultados gerados a partir da alteração do gráfico da

carga, gerado por três coeficientes de amortecimentos. Escolheu-se dois valores, um superior (0,09) e outro inferior (0,07) ao parâmetro calibrado (0,11). Destaca-se que, ao variar o K, as outras variáveis permaneceram inalteradas (Tabela 2).

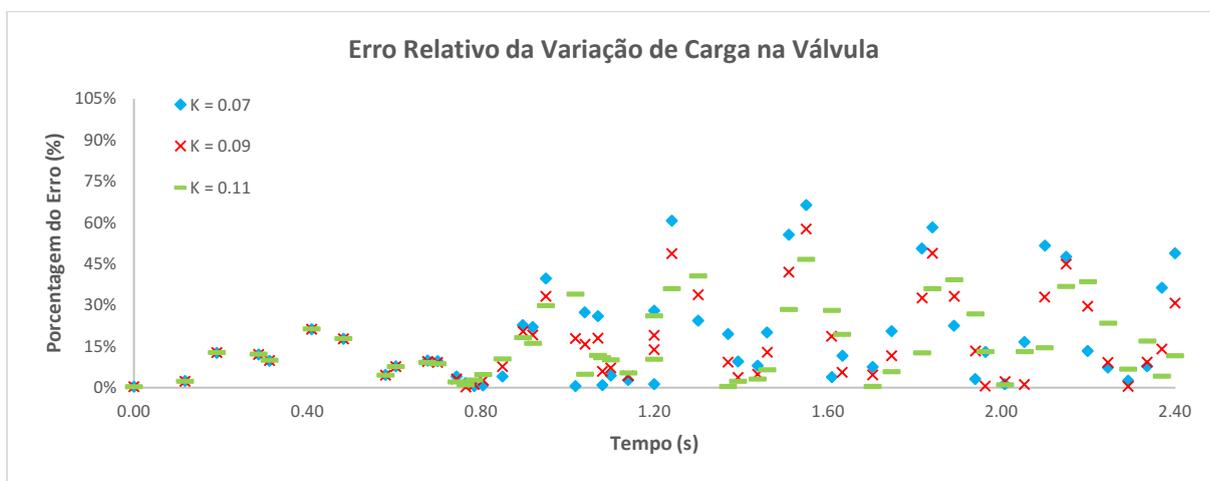
Gráfico 11 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o intervalo escolhido, todos os resultados do transiente hidráulico gerados pelas alterações de K, apresentaram valores próximos aos observados. Assim, percebe-se que em uma escala de 0,02 o resultado permanece quase inalterado (Gráfico 11, Gráfico 12 e Tabela 5).

Gráfico 12 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

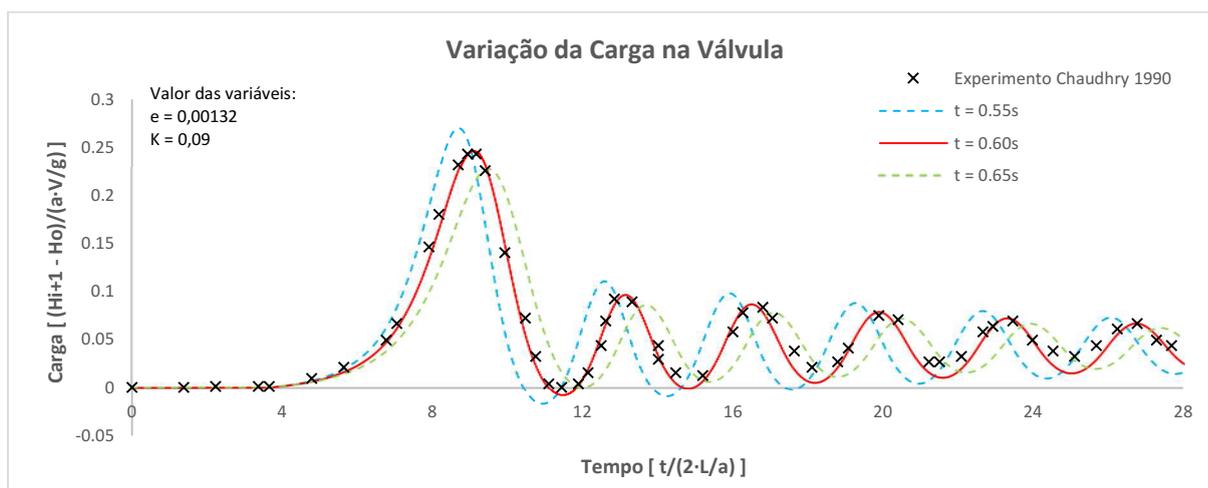
Tabela 5 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 1)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,07	1,844	0,970
K = 0,09	1,507	0,980
K = 0,11	1,499	0,980

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

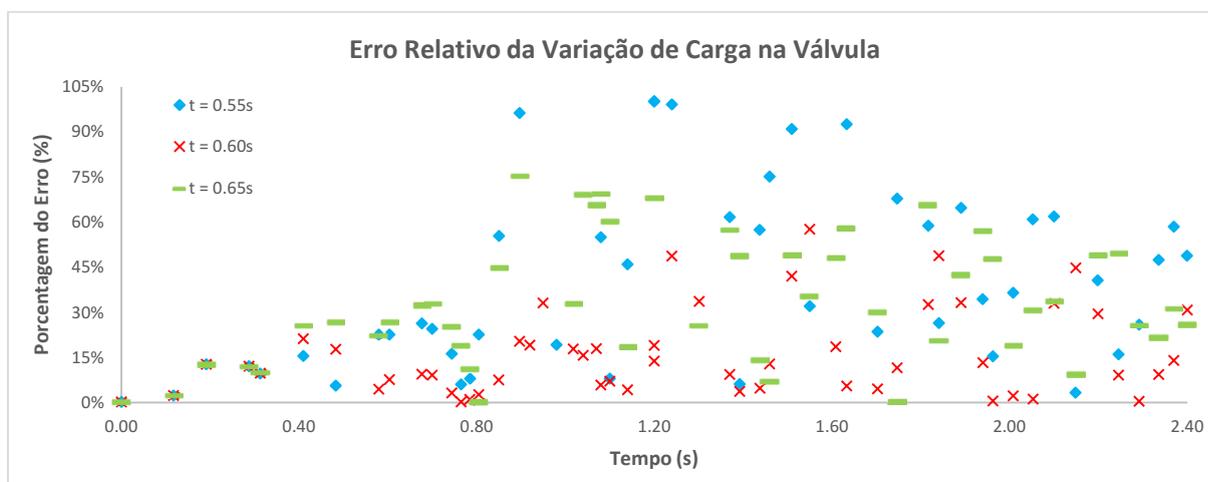
Percebeu-se que o tempo de fechamento da válvula influenciou diretamente na intensidade do golpe de aríete, pois quanto mais rapidamente acontece a interrupção do fluxo, maior é a sobrepressão do primeiro pico. Em termos comparativos aos dados experimentais o $t = 0,60$ s conservou a amplitude das ondas, consequentemente apresentando maior precisão (Gráfico 13).

Gráfico 13 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 14 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 6 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 1)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,55s$	6,073	0,680
$t = 0,60s$	1,507	0,980
$t = 0,65s$	5,300	0,756

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

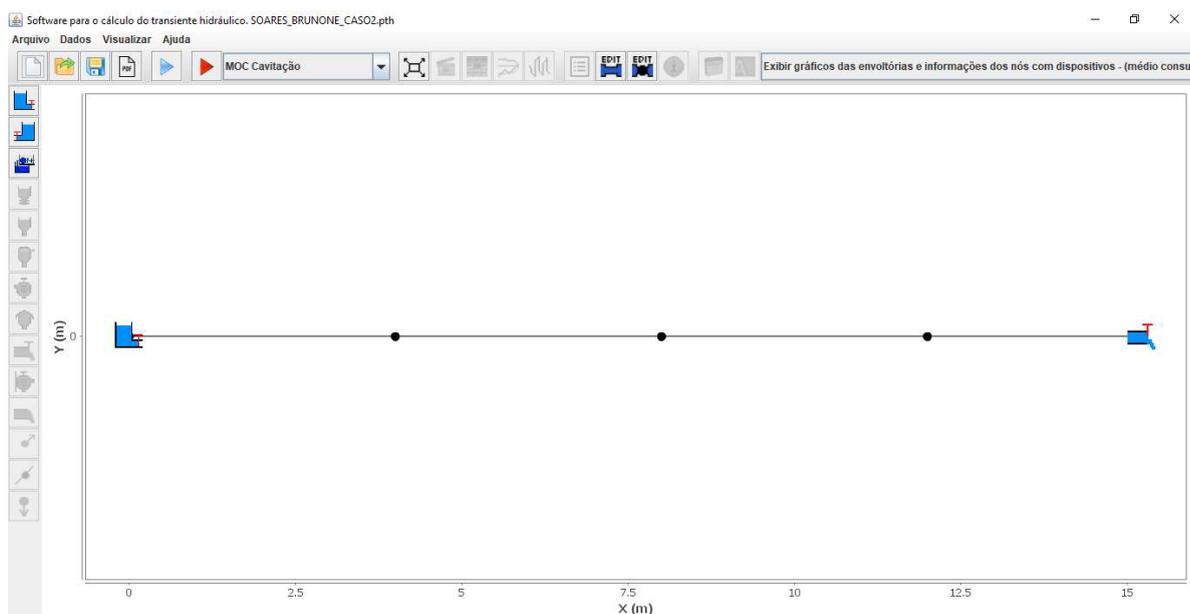
Entendeu-se que apesar do valor de fechamento da válvula ser padrão para cada experimento e caso, testes com valores menores e maiores são pertinentes, pois possibilitam um entendimento maior sobre a sensibilidade dessa variável e sua importância em operações de adutoras.

4.2 Experimento de Soares *et al.* (2015)

O experimento realizado por Soares em 2015 no Instituto superior técnico de Lisboa possuía uma tubulação de mesmo nível em relação ao solo com comprimento total de 15,22 m, diâmetro de 20 mm e espessura de 1 mm.

Além disso, o esquema proposto simulou um sistema reservatório – tubulação – válvula, utilizando um tanque de ar comprimido para simular um reservatório de nível constante (Figura 11).

Figura 11 – *Layout* do experimento de Soares *et al.* (2015) no *software* UFC7



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

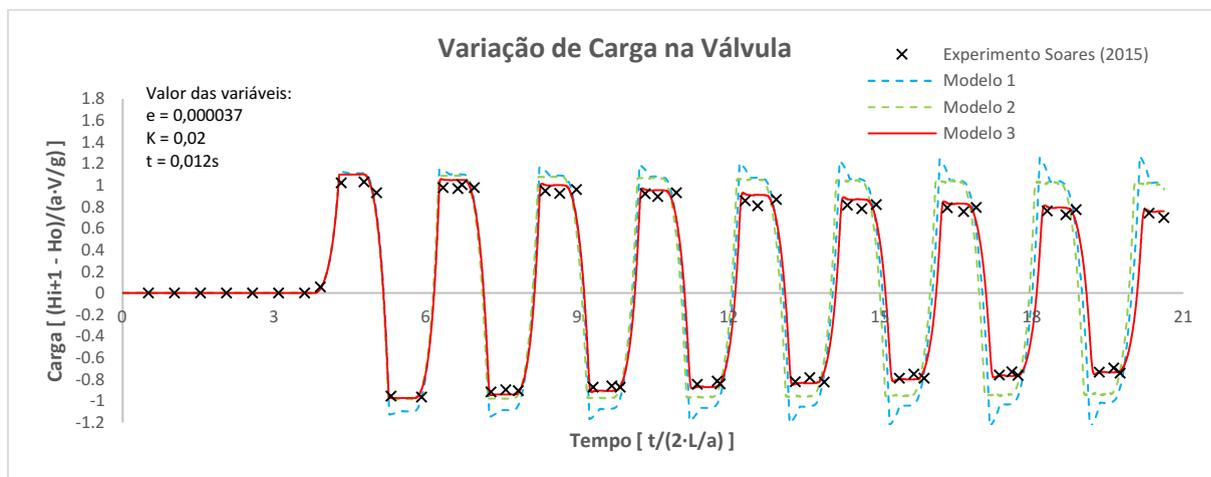
4.2.1 *Análise dos resultados obtidos do Caso 2*

Diferentemente do Caso anterior, neste não foi injetado ar no sistema. Desta maneira, a quantidade de ar e ou gás existente na tubulação é padrão do experimento realizado e suas variáveis de influência, como por exemplo, a vazão e a carga.

Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 15). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Os Modelos 1 e 2 reproduziram bem o primeiro pico de carga hidráulica, porém, ao longo do tempo, não houve atenuação desses picos em relação aos dados experimentais, pois esses modelos utilizam o atrito semiestacionário, além disso o tempo de simulação é curto. Por outro lado, o Modelo 3 mostrou melhor ajuste aos dados observados, tanto em relação aos picos de carga, quanto na fase entre os resultados, revelando uma melhor aproximação devido à nova consideração da fração de vazios, juntamente com o fator de atrito e celeridade variável (Gráfico 15).

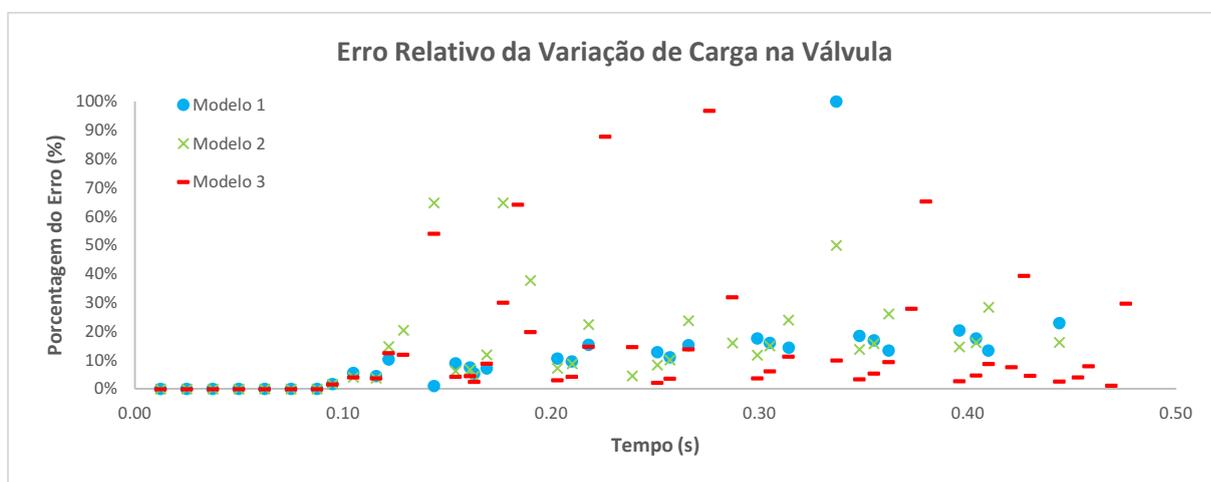
Gráfico 15 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por meio da análise do Erro Relativo (ER), conclui-se que o Modelo 3 apresenta menor percentual de erros que os Modelos 1 e 2 ao longo da simulação (Gráfico 16).

Gráfico 16 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nos indicadores do Erro Quadrático Médio (EQM) e do Coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE), entre os três modelos, o Modelo 3 apresenta resultados mais relevantes, pois quanto mais próximo de zero for o EQM, melhor é o resultado e o NSE se aproximou mais do valor 1 (Tabela 7).

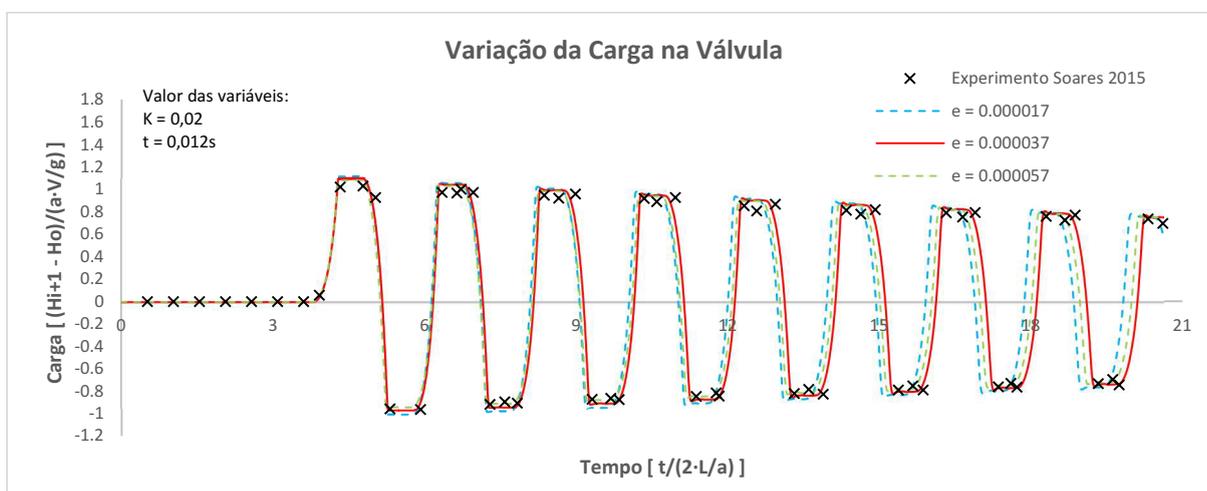
Tabela 7 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para os Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 2)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	11,530	0,927
Modelo 2	10,984	0,934
Modelo 3	4,574	0,989

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Também pôde-se constatar que, ao diminuir a quantidade de vazios, o intervalo entre os picos das ondas de pressão tendeu a reduzir (Gráfico 17).

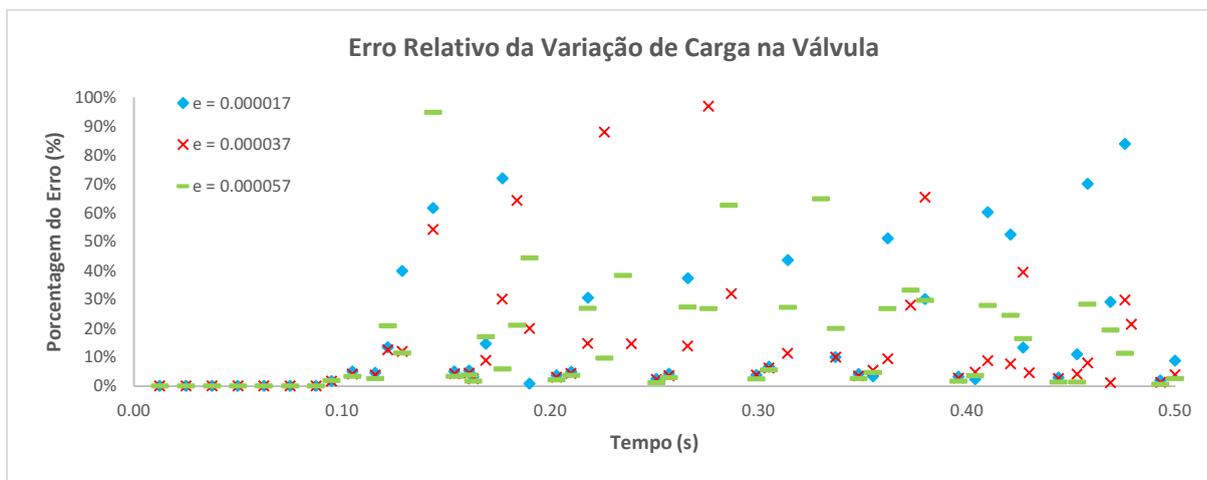
Gráfico 17 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Constata-se que o valor $\varepsilon_0 = 0,000037$ resulta em valores de carga mais próximos aos dados experimentais, analisando os indicadores de ER (Gráfico 18), EQM e NSE (Tabela 8).

Gráfico 18 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

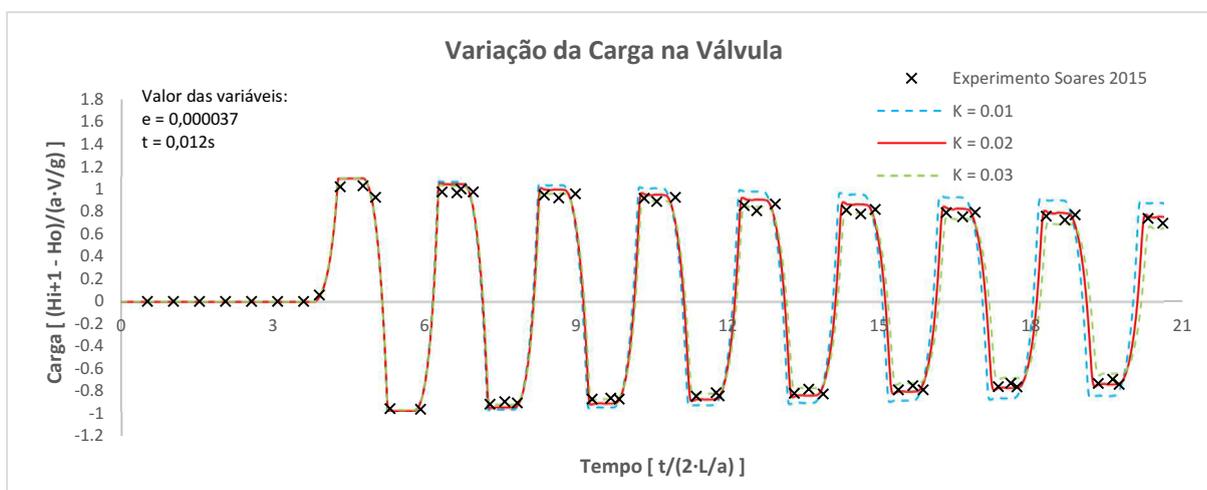
Tabela 8 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 2)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
e = 0,000017	16,326	0,854
e = 0,000037	4,574	0,989
e = 0,000057	9,171	0,954

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

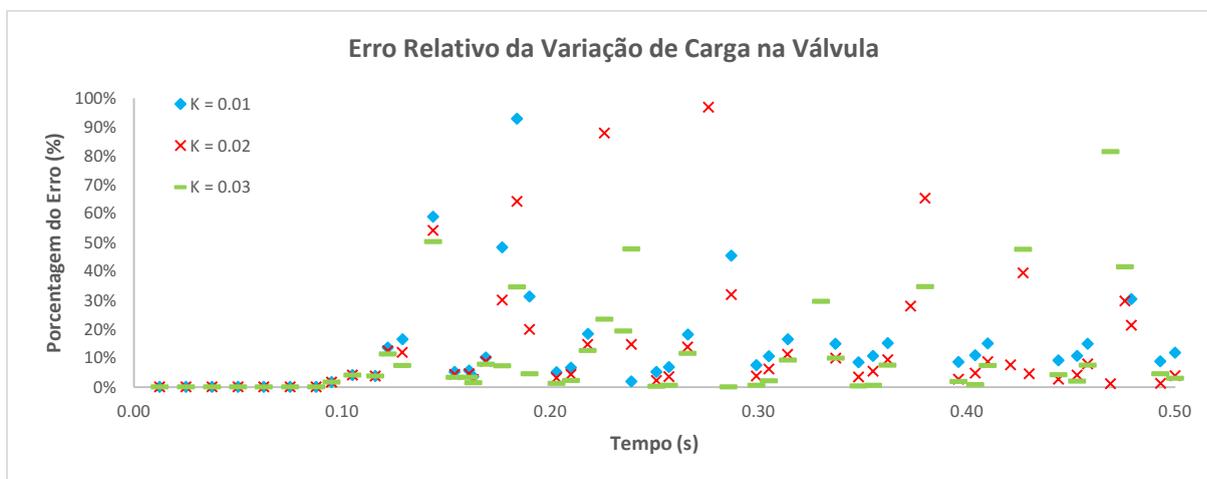
Notou-se que quanto menor o valor de K, menor o amortecimento da onda. Assim, quando k foi 0,03 os resultados obtidos foram mais próximos aos dados observados (Gráfico 19, Gráfico 20 e Tabela 9).

Gráfico 19 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 20 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

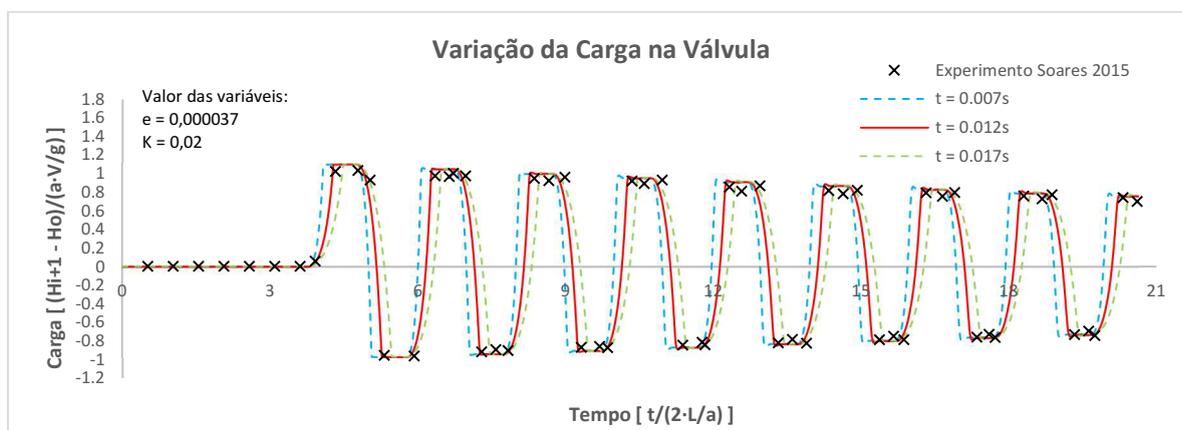
Tabela 9 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 2)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,01	7,237	0,971
K = 0,02	4,574	0,989
K = 0,03	3,983	0,991

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

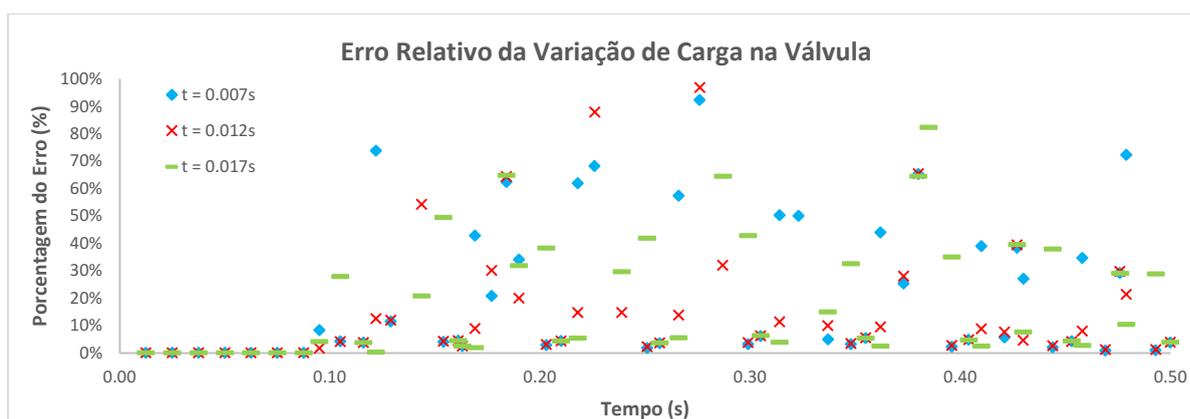
Percebeu-se que o tempo de fechamento interferiu diretamente na fase das ondas de pressão. Logo, o tempo igual a 0,012s retornou menores erros relativos e maiores valores do coeficiente Nash-Sutcliffe (Gráfico 21, Gráfico 22 e Tabela 10).

Gráfico 21 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 22 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 10 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 2)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
t = 0,007s	18,497	0,812
t = 0,012s	4,574	0,989
t = 0,017s	18,882	0,804

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2.2 Análise dos resultados obtidos do Caso 3

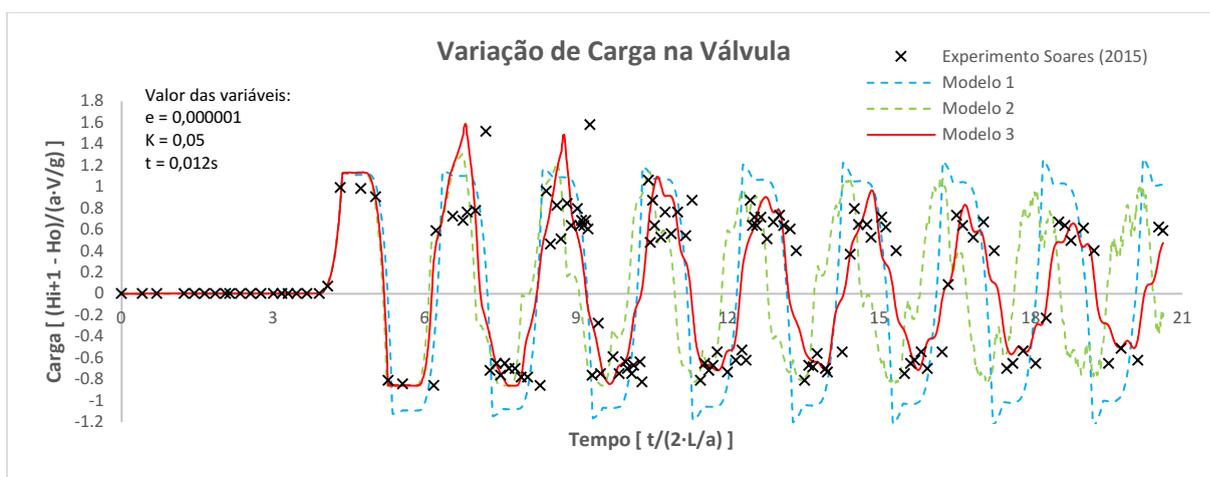
Ressalta-se que somente no Caso 1 foi injetado ar no sistemas.

Nessa simulação ocorreu a separação de coluna líquida devido a um acréscimo na velocidade inicial do fluido como mostrado no Gráfico 23. Apesar disso, no Modelo 1 não

houve um aumento de carga no segundo pico de pressão como descrito por Soares *et al.* (2015). No entanto, o Modelo 3 apresentou uma atenuação considerável dos picos de pressão (Gráfico 23).

Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 23). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

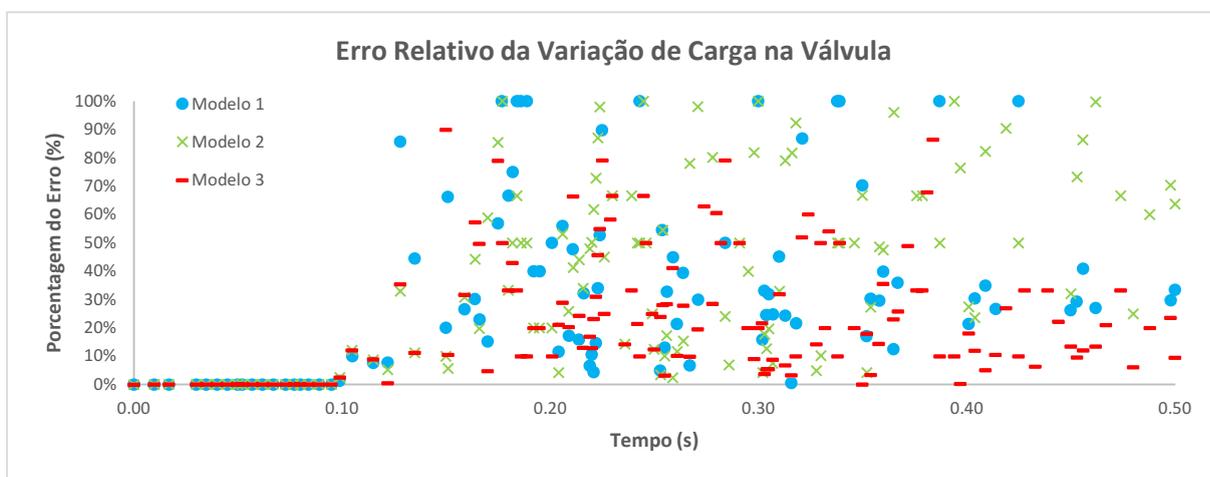
Gráfico 23 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Percebeu-se resultados mais ajustados aos dados observados no Modelo 3, porém, em termos estatísticos a precisão foi menor em relação ao Caso 2 (Gráfico 24 e Tabela 11).

Gráfico 24 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 11 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 3)

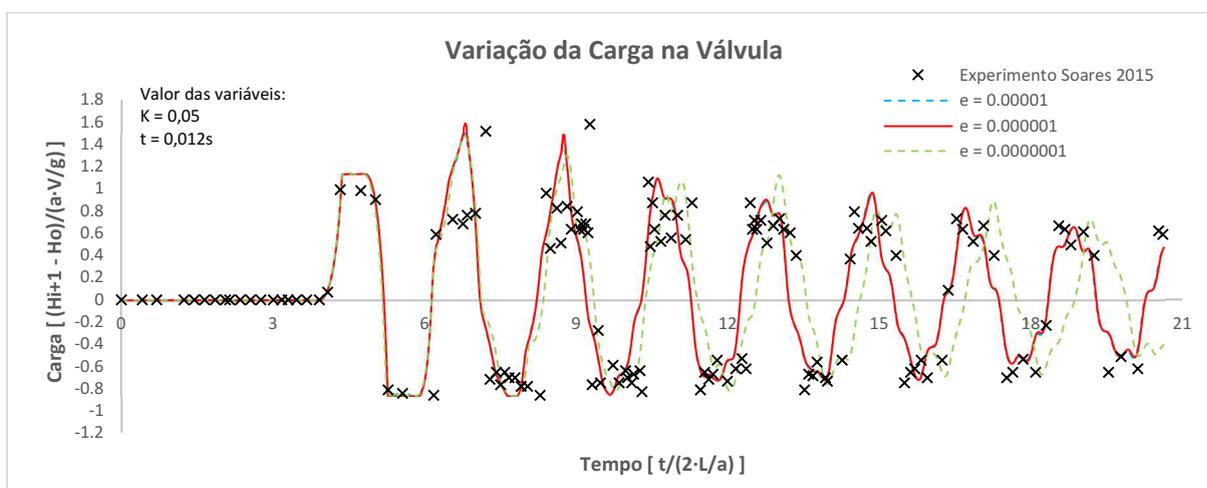
Método	EQM	NSE
Modelo 1	38,464	0,129
Modelo 2	39,657	0,074
Modelo 3	20,973	0,741

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Vale salientar que a subpressão de -10 mca não é respeitada pelo Modelo 1, que utiliza o Método das Características sem nenhuma consideração de celeridade variável e fluxo bifásico como no Modelo 2, Além do processo termodinâmico e atrito variável do Modelo 3.

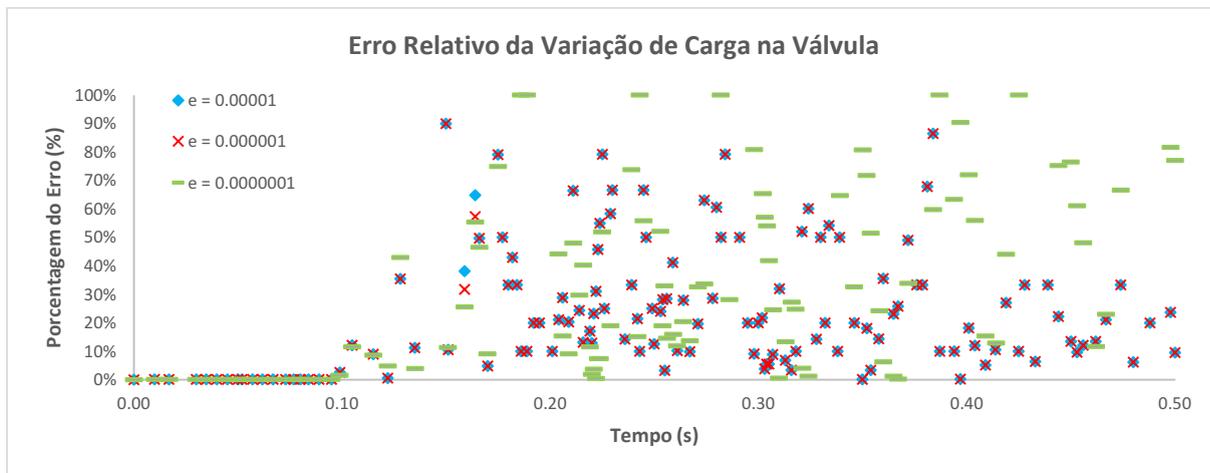
O valor $\varepsilon_0 = 0,000001$ apresentou descrição mais ajustada aos dados modelados em relação ao observado. Isso é refletido pela correlação entre a pressão e a fração de vazio próximo à válvula. As oscilações observadas nos segundo e terceiro picos de carga experimentais podem estar ligadas à vibração da válvula, que não foi levada em consideração no Modelo 1 (Gráfico 25, Gráfico 26 e Tabela 12).

Gráfico 25 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 26 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

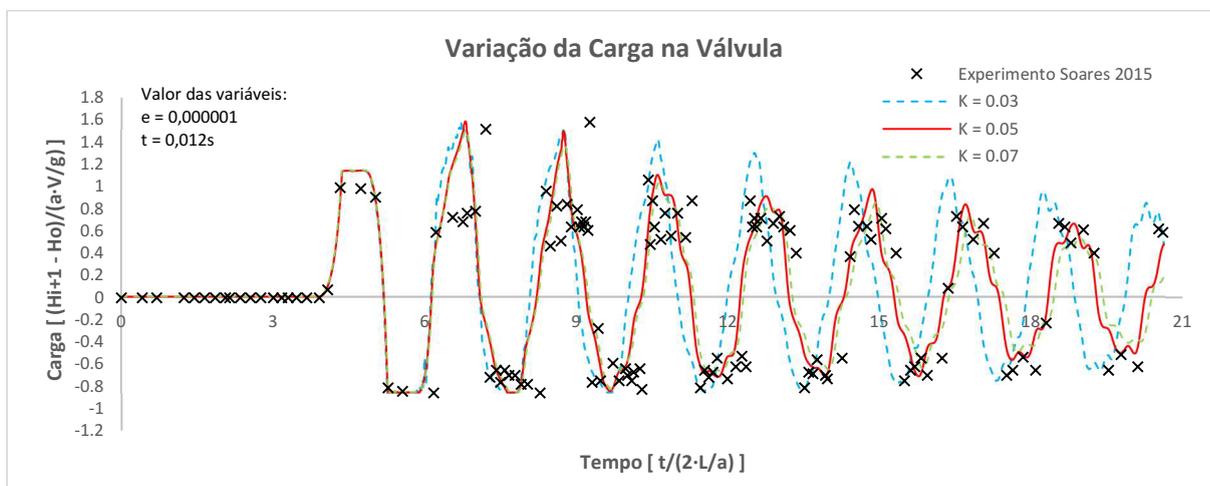
Tabela 12 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 3)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,0000100$	21,159	0,736
$e = 0,0000010$	20,973	0,741
$e = 0,0000001$	29,915	0,473

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

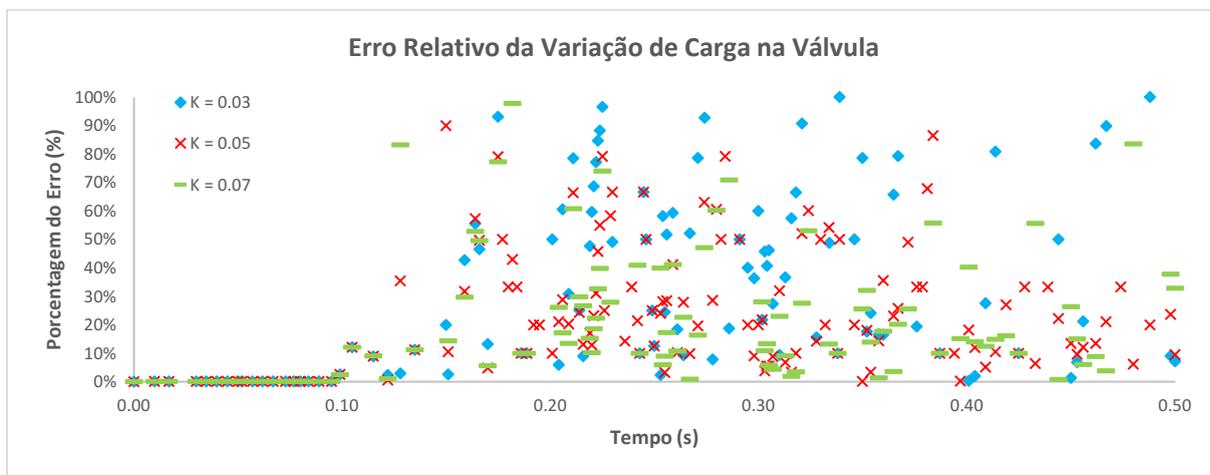
Conforme vimos no Caso 2, valores mais baixos de K reproduziram menor amortecimento das ondas de pressão. Dessa maneira o valor de 0,05 mostrou-se mais ajustado para o Caso 3 (Gráfico 27, Gráfico 28 e Tabela 13).

Gráfico 27 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 28 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

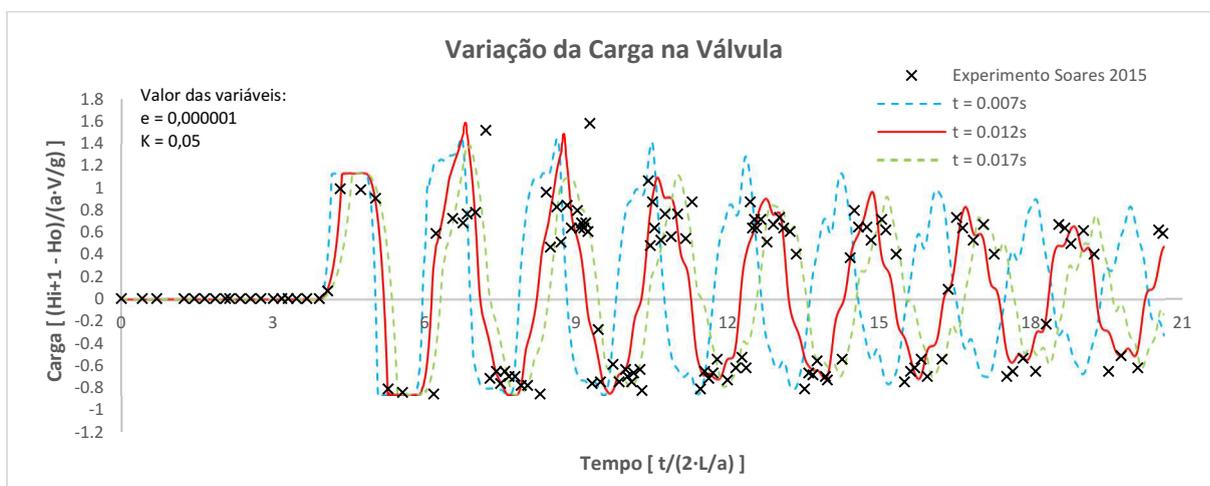
Tabela 13 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 3)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,03	35,897	0,242
K = 0,05	20,973	0,741
K = 0,07	23,784	0,667

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

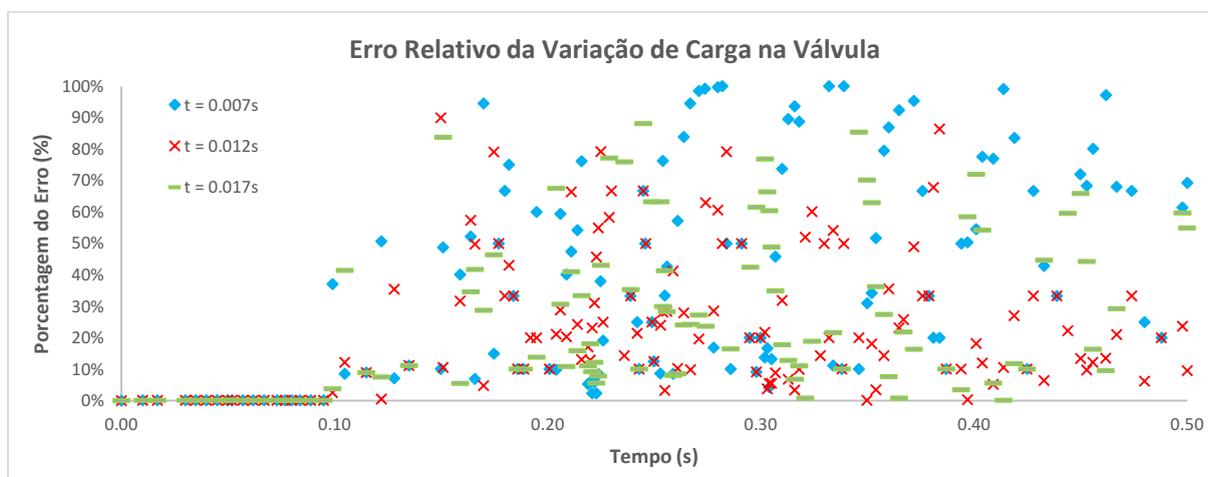
No Caso 3, o menor tempo de fechamento não aumentou a sobrepressão no primeiro pico, porém interferiu em cada fase da onda, aumentando a quantidade de picos com a diminuição do tempo de fechamento (Gráfico 29, Gráfico 30 e Tabela 14).

Gráfico 29 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 30 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 14 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 3)

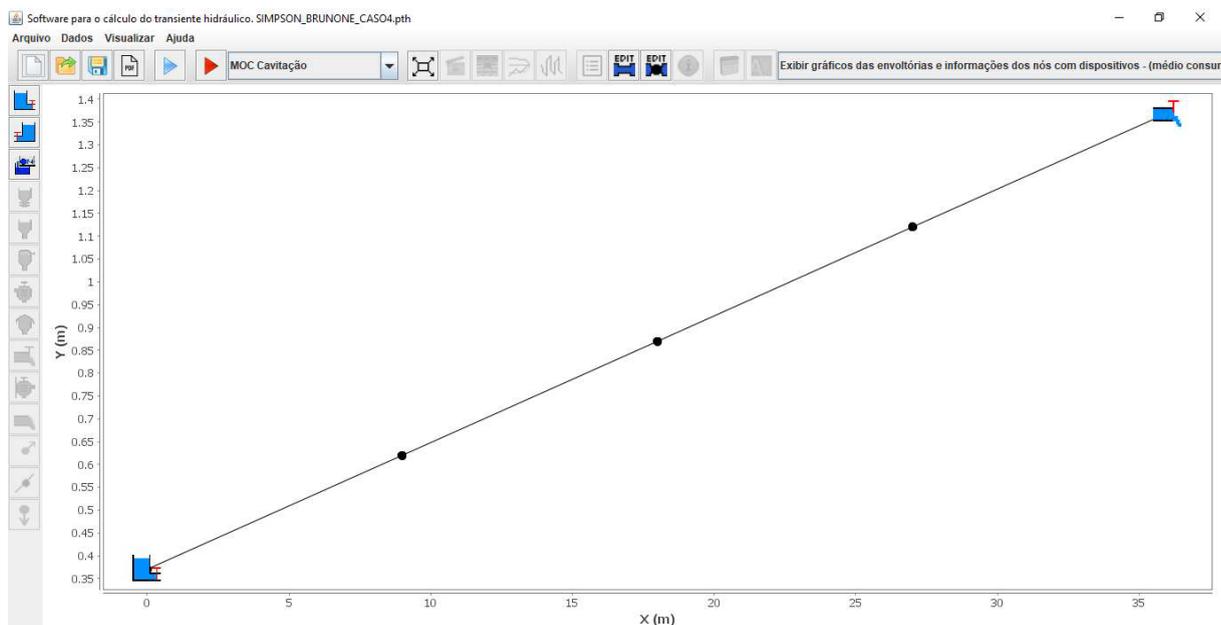
Tempo de Fechamento	EQM	NSE
t = 0,007s	37,246	0,183
t = 0,012s	20,973	0,741
t = 0,017s	29,734	0,480

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3 Experimento de Simpson (1986)

O experimento realizado por Simpson em 1986 no laboratório de hidráulica de Brown no Campus norte da Universidade de Michigan possuía uma tubulação de 1,37 m de desnível em relação ao solo com um comprimento total de 36 m, diâmetro de 19,05 mm e espessura de 1,588 mm. Além disso, o esquema proposto simulou um sistema reservatório – tubulação – válvula, utilizando tanques de ar comprimido (Figura 12).

Figura 12 – *Layout* do experimento de Simpson (1986) no software UFC7



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

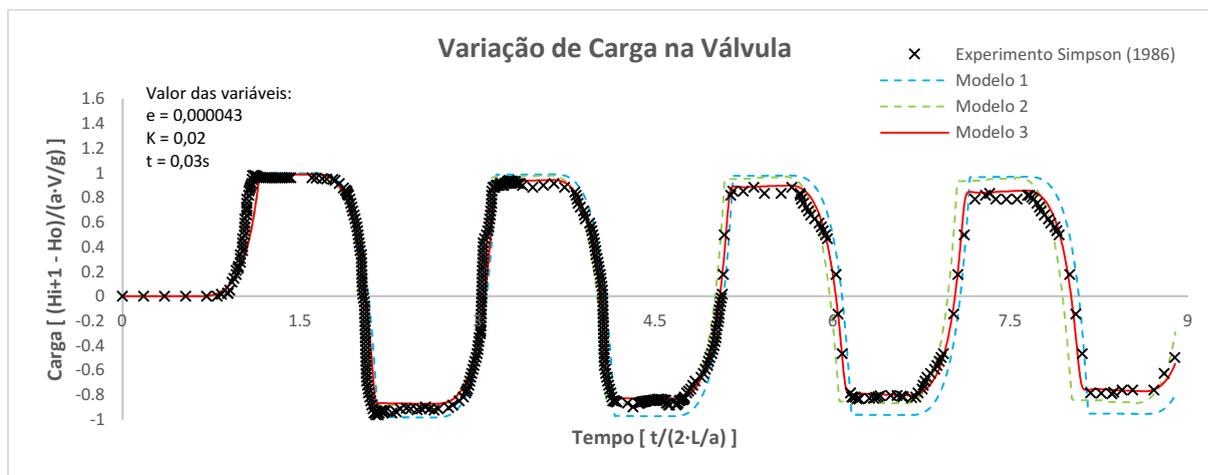
4.3.1 Análise dos resultados obtidos do Caso 4

Neste Caso 4, a pressão relativa mínima não atingiu o valor de -10 mca, logo esse fluxo não é cavitante.

Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 31). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

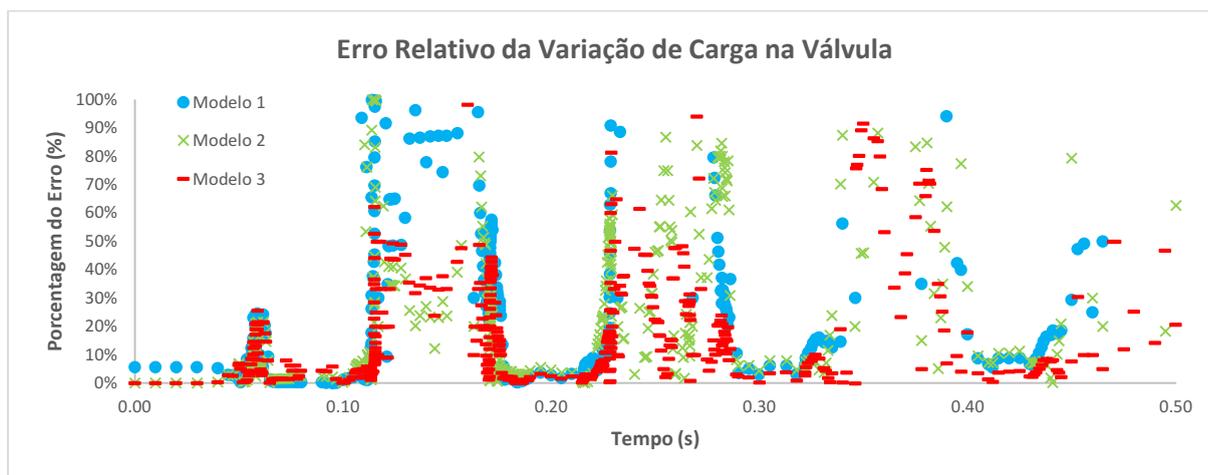
O primeiro pico de todos os Modelos apresentou resultado promissor em relação aos dados observados, no entanto, ao longo do tempo, o Modelo 3 se sobressaiu (Gráfico 31). Esse desempenho do último método é confirmado com um valor de 0,97 (Gráfico 32 e Tabela 15).

Gráfico 31 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 32 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 15 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 4)

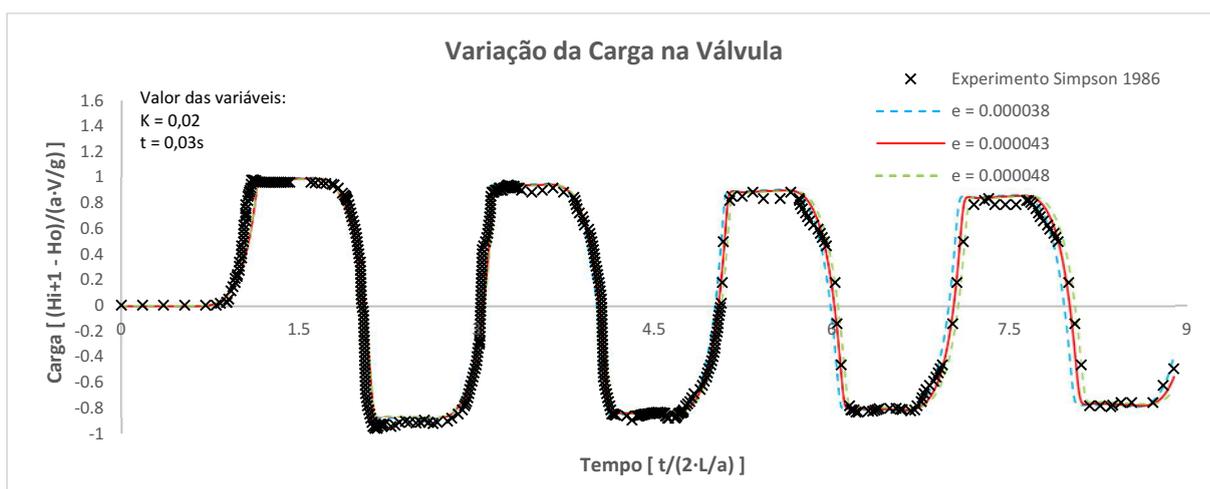
Método	EQM	NSE
Modelo 1	9,540	0,798
Modelo 2	8,167	0,852
Modelo 3	3,697	0,970

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A variação da fração de vazio esboçou uma relação proporcional ao comprimento da onda, pois quanto menor valor dos vazios, mais curto é o tamanho da onda e vice-versa.

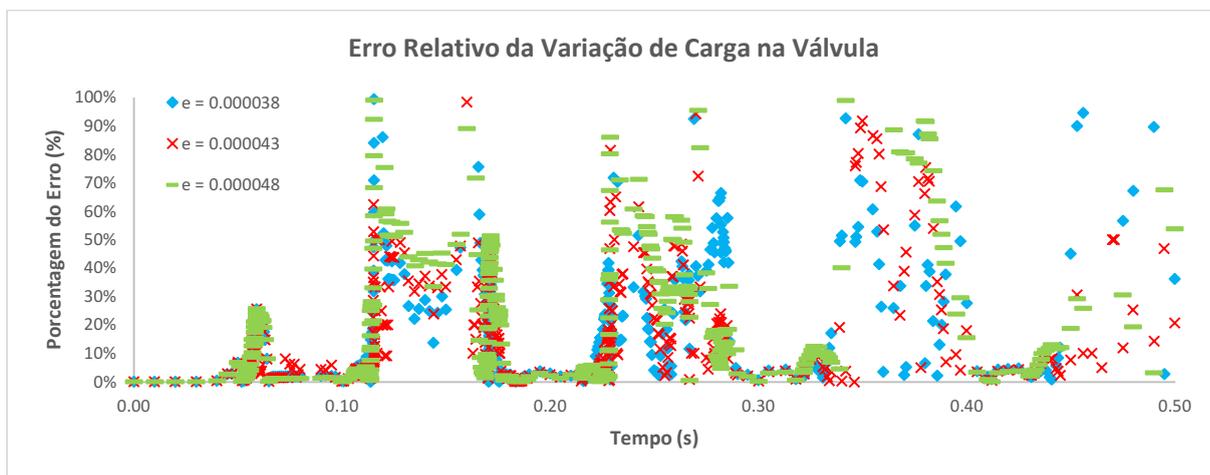
Quando comparadas as simulações aos dados experimentais, constatou-se que, quando $e = 0,000043$, os resultados foram mais precisos, porém as demais simulações também apresentaram bons resultados (Gráfico 33, Gráfico 34 e Tabela 16).

Gráfico 33 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 34 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

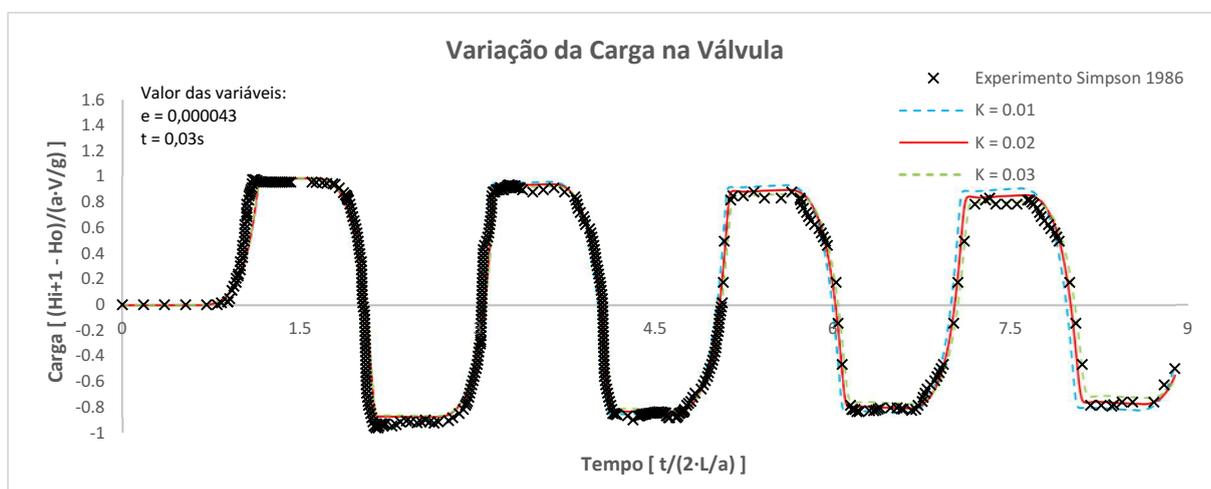
Tabela 16 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 4)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,000038$	5,449	0,934
$e = 0,000043$	3,697	0,970
$e = 0,000048$	6,353	0,911

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

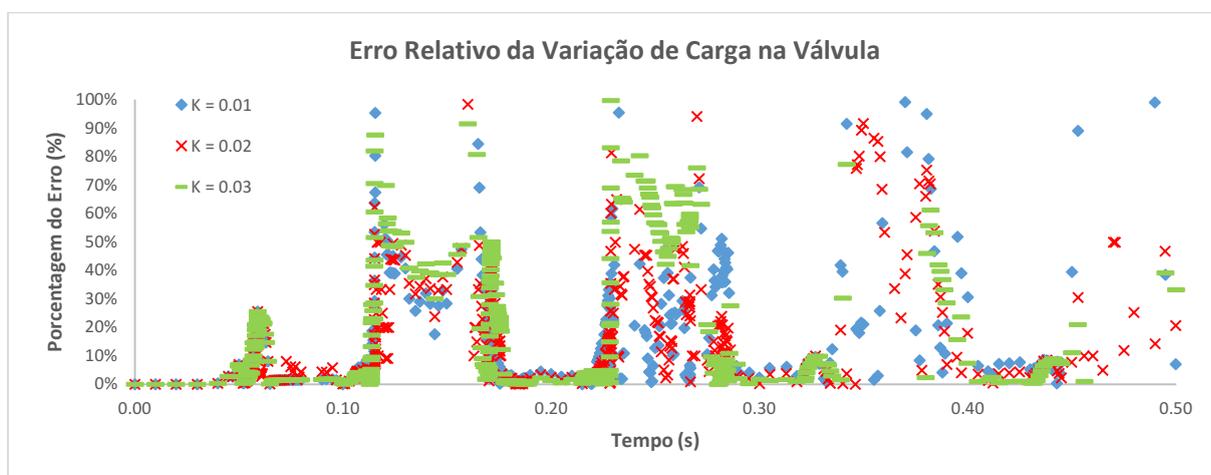
Notou-se que o $K = 0,02$ resultou em valores mais precisos comparados aos dados experimentais (Gráfico 35, Gráfico 36 e Tabela 17).

Gráfico 35 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 36 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

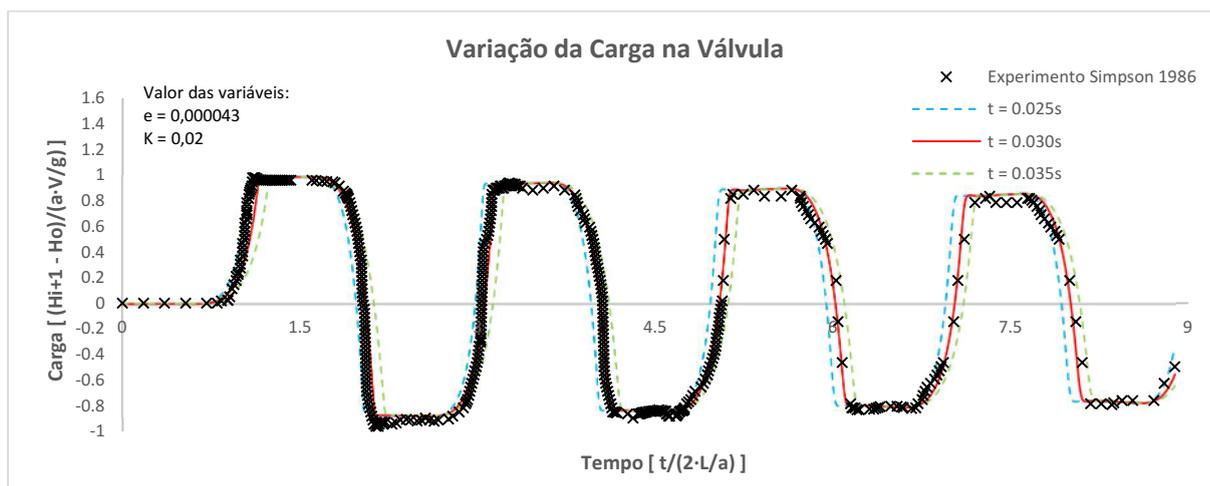
Tabela 17 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 4)

Coefficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,01	5,302	0,938
K = 0,02	3,697	0,970
K = 0,03	6,086	0,918

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

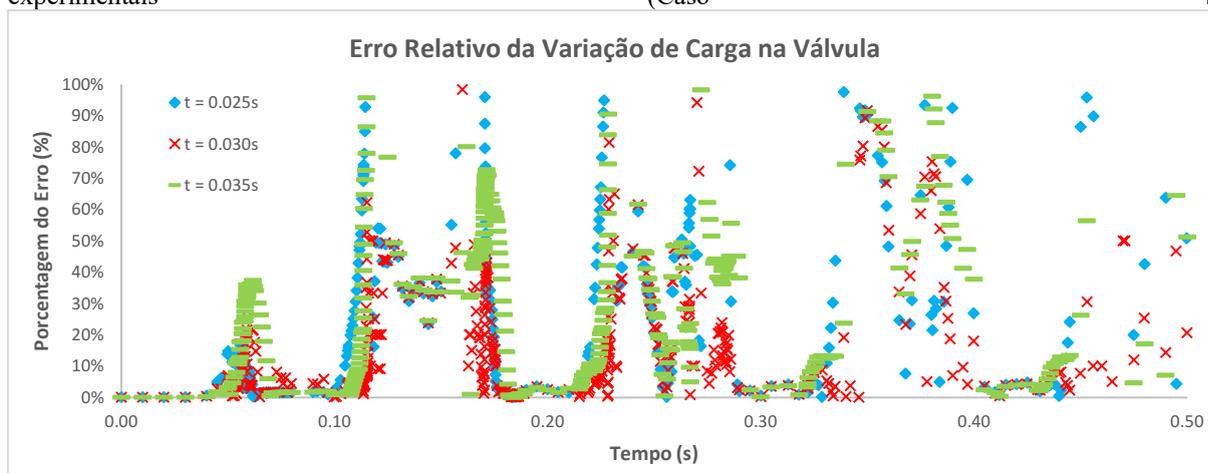
Diferente da fração de vazio tempo de fechamento provocou alterações no comprimento da onda desde o primeiro pico alterando toda a configuração da onda. Neste caso, o $t = 0,03s$ teve 0,97 de NSE e 3,697 de EQM (Gráfico 37, Gráfico 38 e Tabela 18).

Gráfico 37 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 38 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 18 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 4)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
t = 0,025s	11,891	0,687
t = 0,030s	3,697	0,970
t = 0,035s	13,074	0,621

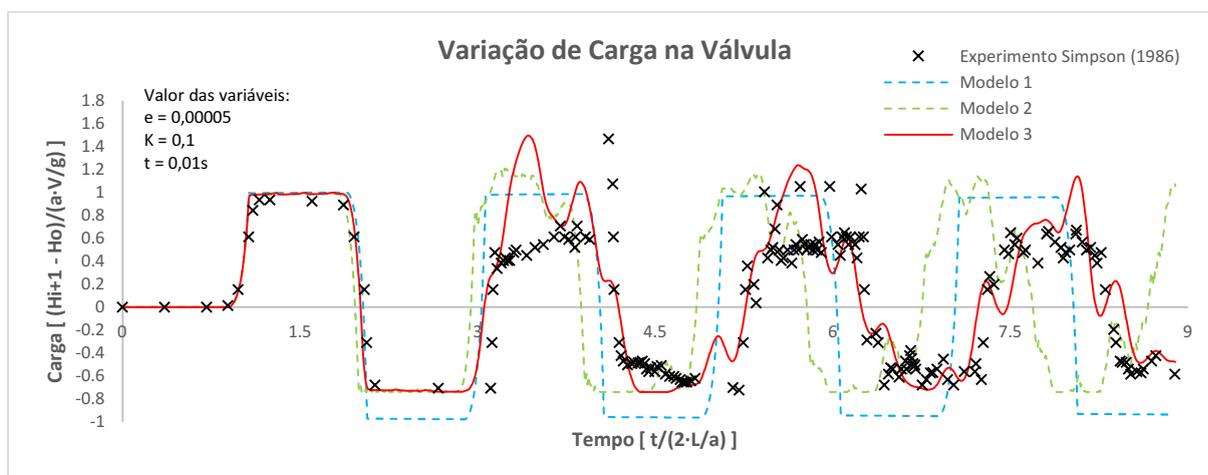
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.2 Análise dos resultados obtidos do Caso 5

Para o Caso 5, o autor aumentou a velocidade do fluxo, provocando uma cavitação. Como ocorreu no Caso 3, o Modelo 1 não desempenhou bons resultados resultando em onda fora de fase. Em contrapartida, o Modelo 3 apresentou resultados mais promissores, porém com precisão mais baixa do que nos Casos anteriores (Gráfico 39, Gráfico 40 e Tabela 19).

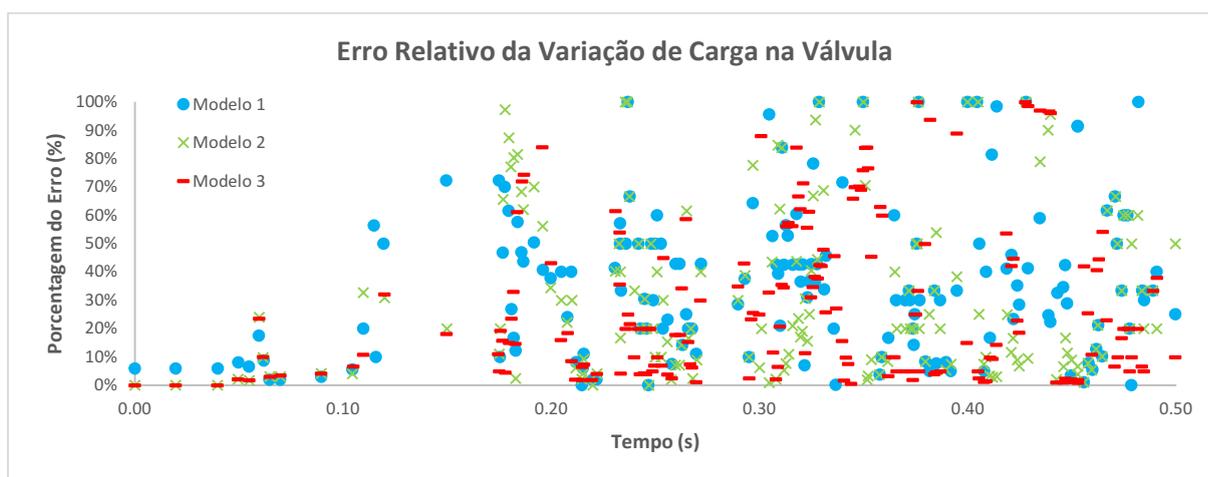
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 39). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 39 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 40 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

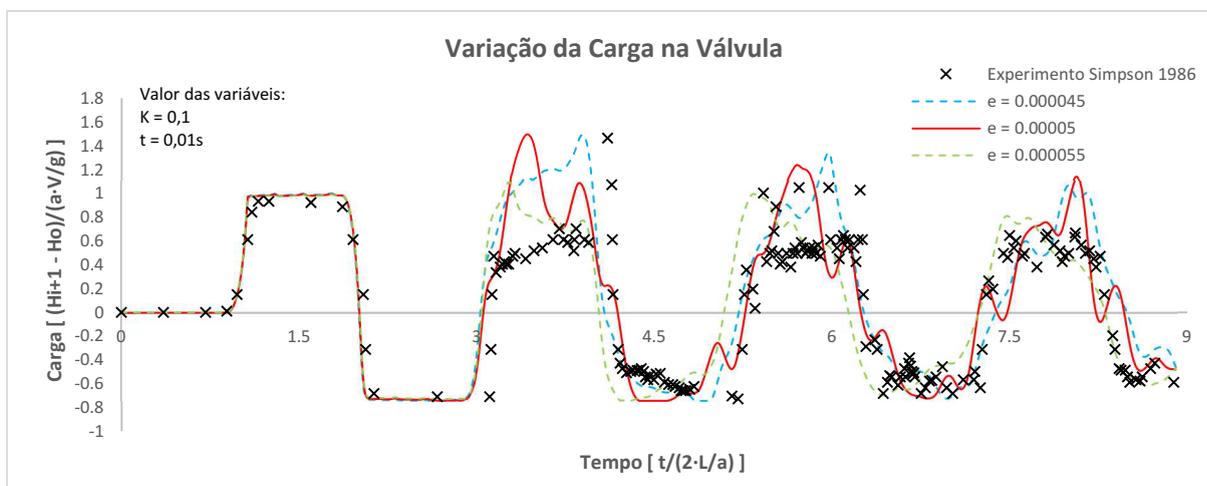
Tabela 19 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 5)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	23,085	0,066
Modelo 2	21,566	0,185
Modelo 3	16,614	0,516

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

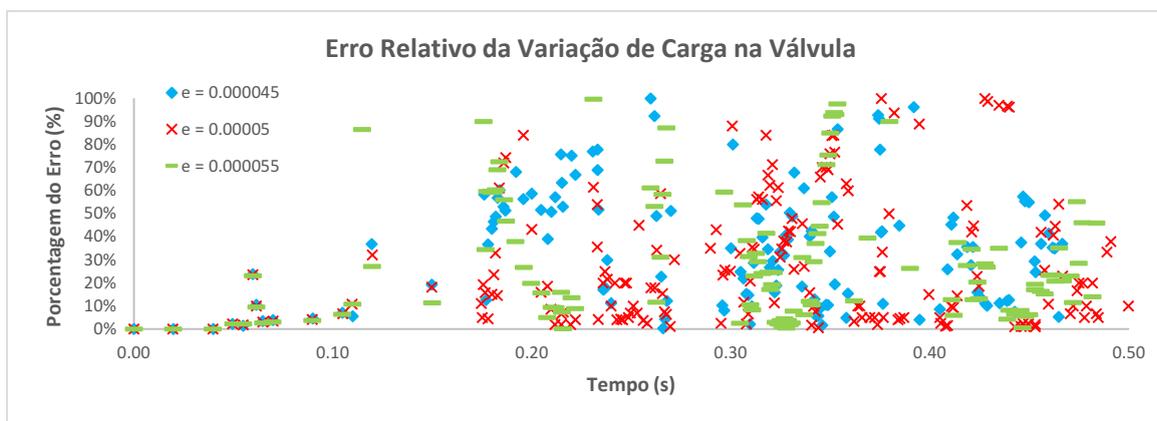
A fração de vazio 0,00005 apresentou melhores resultados, no entanto o valor de 0,000045 mostrou-se melhor distribuído nos dois primeiros picos (Gráfico 41, Gráfico 42 e Tabela 20).

Gráfico 41 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 42 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

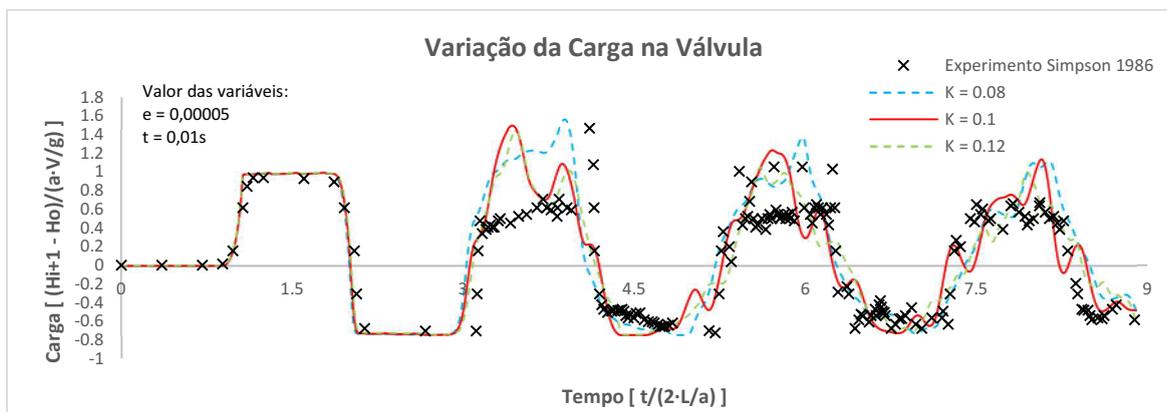
Tabela 20 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 5)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,000045$	10,788	0,508
$e = 0,000050$	10,691	0,516
$e = 0,000055$	12,106	0,380

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

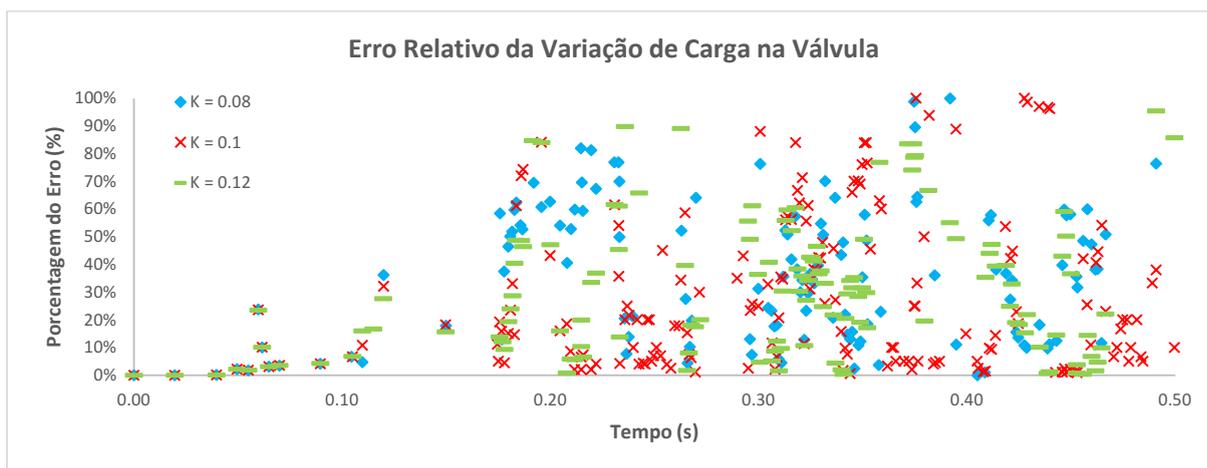
A variação do valor de K indicou uma melhora nos resultados, aumentando a precisão para 0,661 de NSE em um $K = 0,12$ (Gráfico 43, Gráfico 44 e Tabela 21).

Gráfico 43 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 44 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 21 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 5)

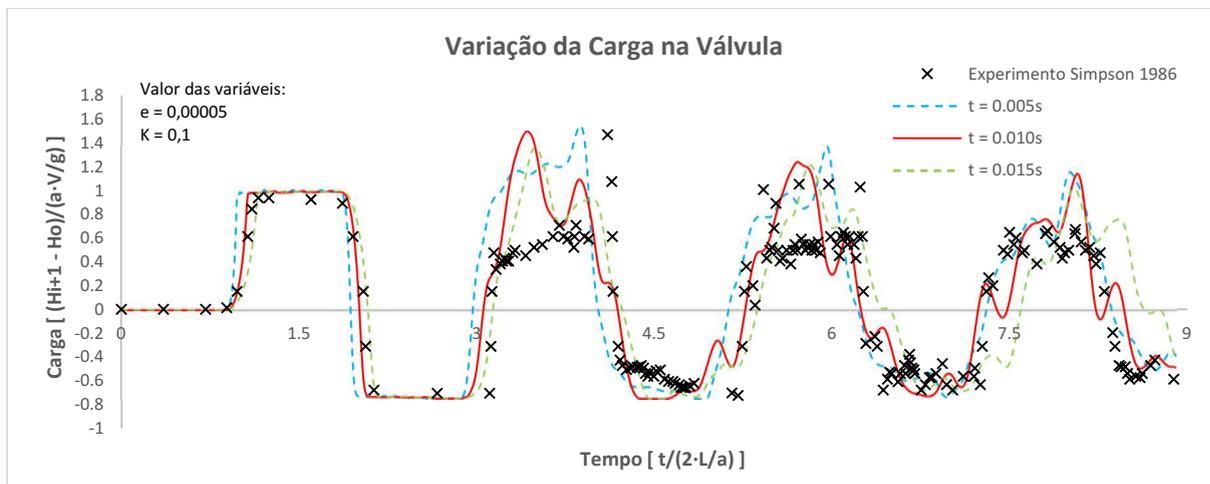
Coefficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,08	17,573	0,459
K = 0,10	16,614	0,516
K = 0,12	13,902	0,661

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A sensibilidade numérica ao tempo de fechamento tornou-se visível não somente neste Caso, mas também nos anteriores, podendo ter mudanças desde o primeiro pico de pressão até

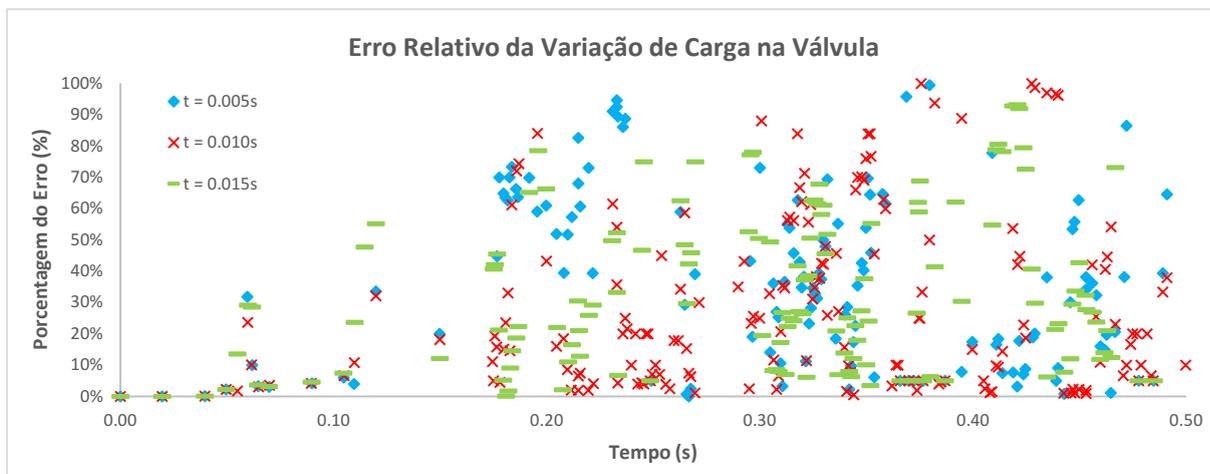
o final da simulação. Se comparar aos dados observados o valor de $t = 0,01$ s apresentou resultados numéricos pertinentes (Gráfico 45, Gráfico 46 e Tabela 22).

Gráfico 45 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 46 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 22 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 5)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,005s$	19,134	0,359
$t = 0,010s$	16,614	0,516
$t = 0,015s$	17,836	0,443

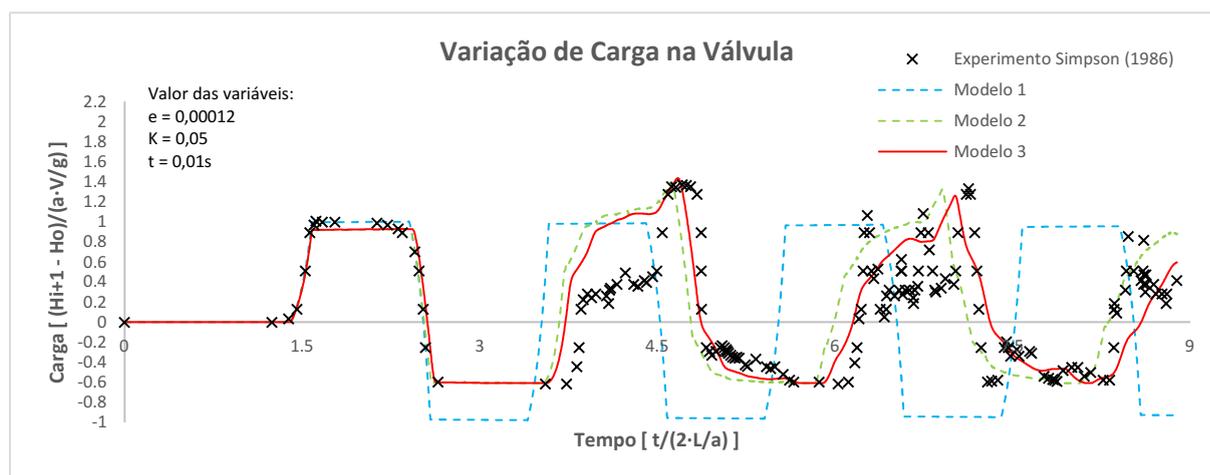
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.3 Análise dos resultados obtidos do Caso 6

Neste Caso o primeiro pico foi mais bem resolvido pelo Modelo 1, porém na sequência das ondas o Modelo 3 respondeu melhor em comparação aos dados observados. Outro fator interessante é a conservação das subpressões que ocorrem no Modelo 3. Por fim, em termos estatísticos a precisão foi parecida em relação ao Caso 5 (Gráfico 47, Gráfico 48 e Tabela 23).

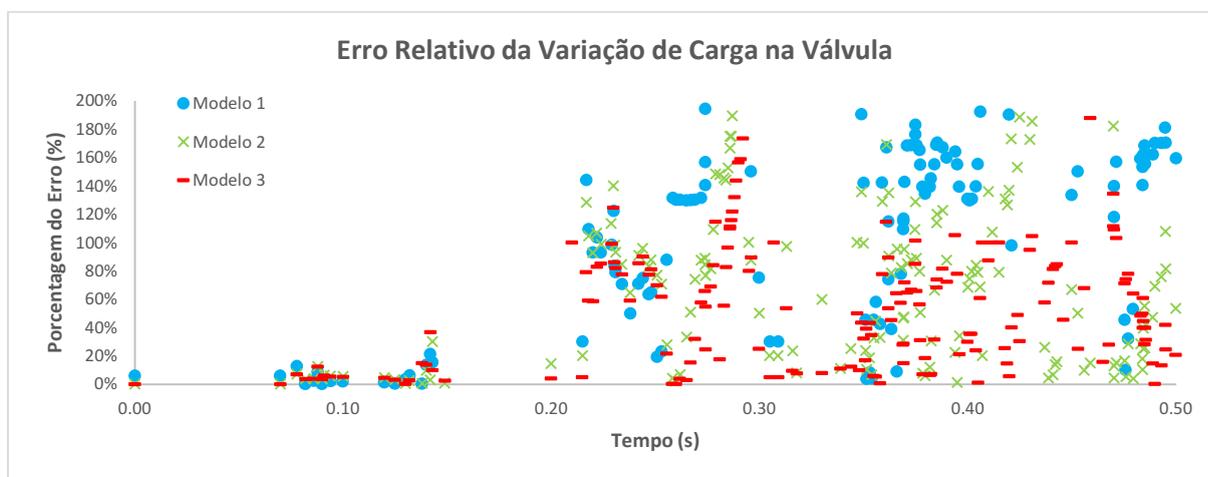
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 47). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 47 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 48 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

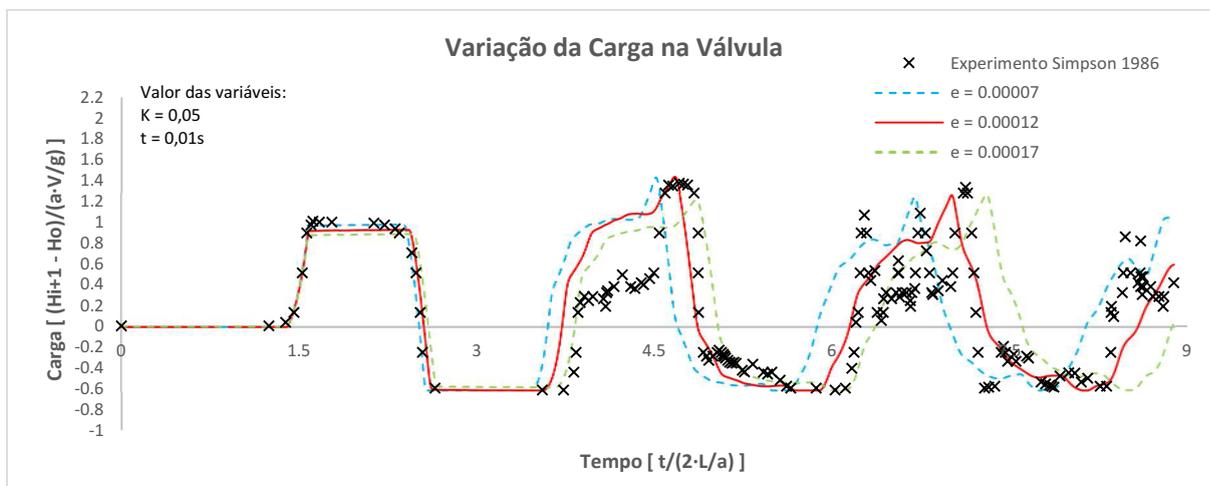
Tabela 23 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 6)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	58,279	-3,126
Modelo 2	26,635	0,138
Modelo 3	19,798	0,524

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

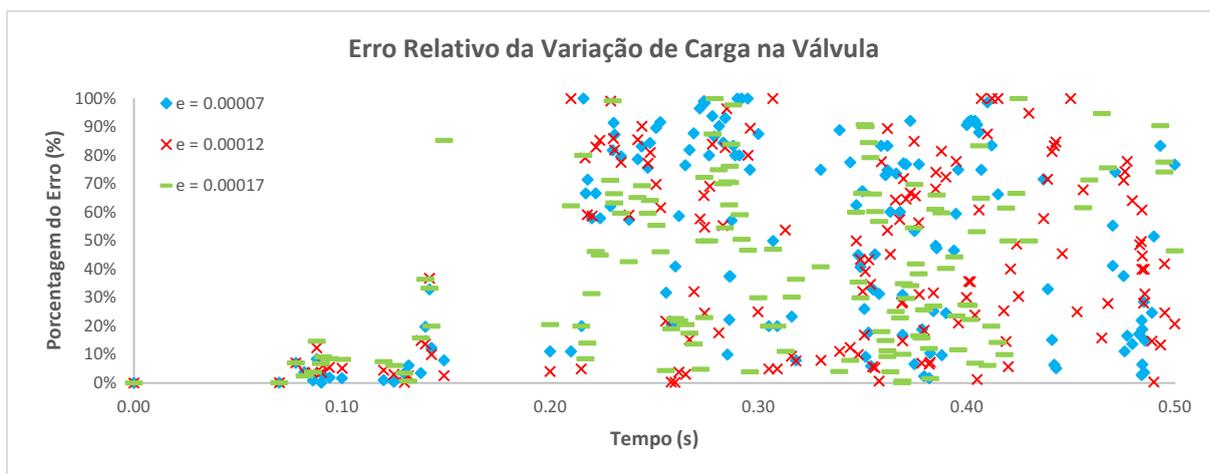
Conservou-se a ideia de que quanto maior for o número de vazios, maior o comprimento de onda. Vale ressaltar que umas das formas de medir o comprimento de onda é pelos picos entre duas ondas que pode ser de sobrepressão ou subpressão. No Caso 6, o valor de 0,00012 para a fração de vazios apresentou resultados mais próximos aos observados (Gráfico 49, Gráfico 50 e Tabela 24).

Gráfico 49 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 50 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

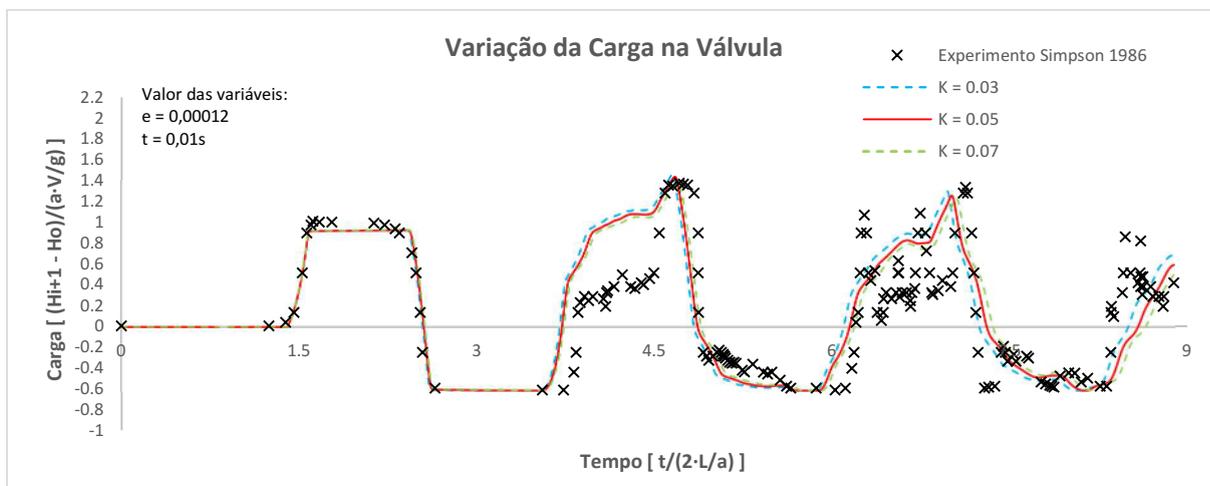
Tabela 24 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 6)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,00007$	26,642	0,138
$e = 0,00012$	19,798	0,524
$e = 0,00017$	22,834	0,367

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

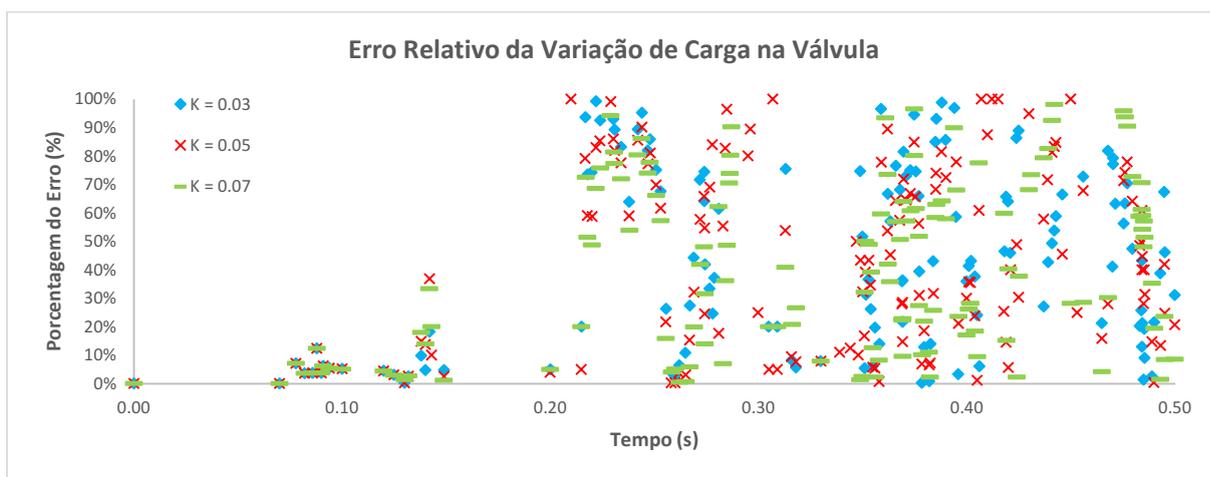
Neste Caso houve poucas variações entre os valores testados. Destaca-se que o $K = 0,05$ ficou mais próximo aos dados observados (Gráfico 51, Gráfico 52 e Tabela 25).

Gráfico 51 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 52 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

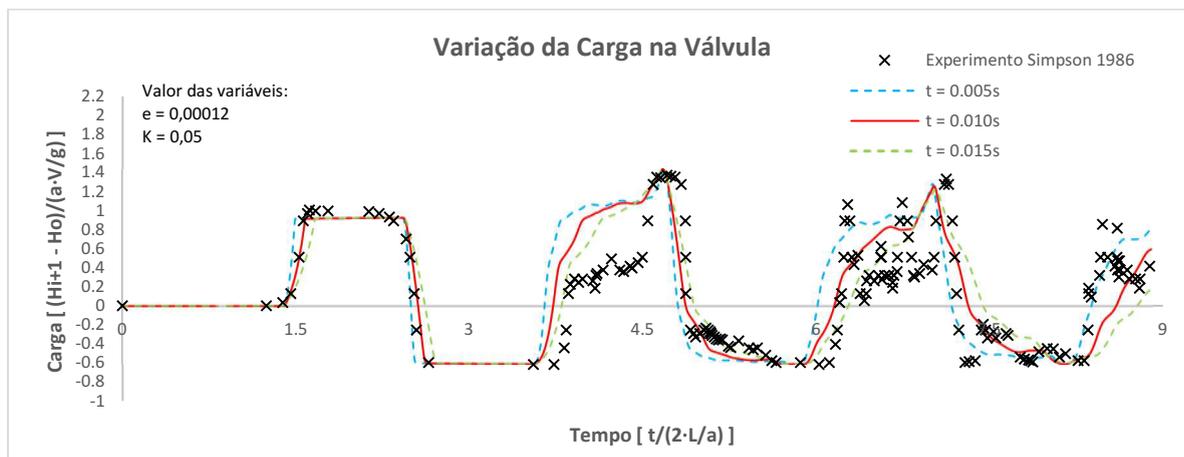
Tabela 25 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 6)

Coefficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,03	22,056	0,409
K = 0,05	19,798	0,524
K = 0,07	20,212	0,504

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

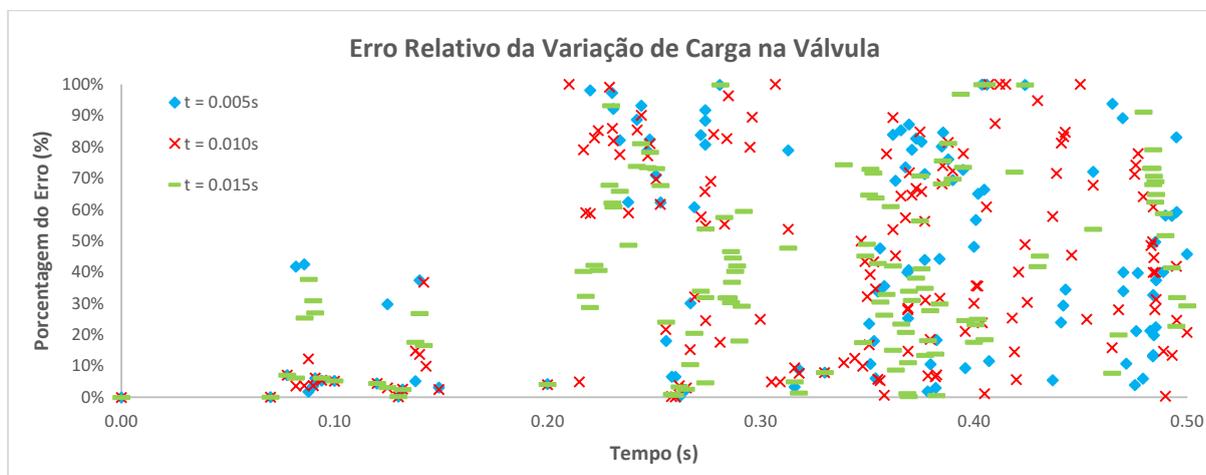
Quando $t = 0,010$ s ficou mais coerente em comparação aos dados experimentais (Gráfico 53, Gráfico 54 e Tabela 26).

Gráfico 53 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 54 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 26 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 6)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,005$ s	26,711	0,133
$t = 0,010$ s	19,798	0,524
$t = 0,015$ s	22,207	0,401

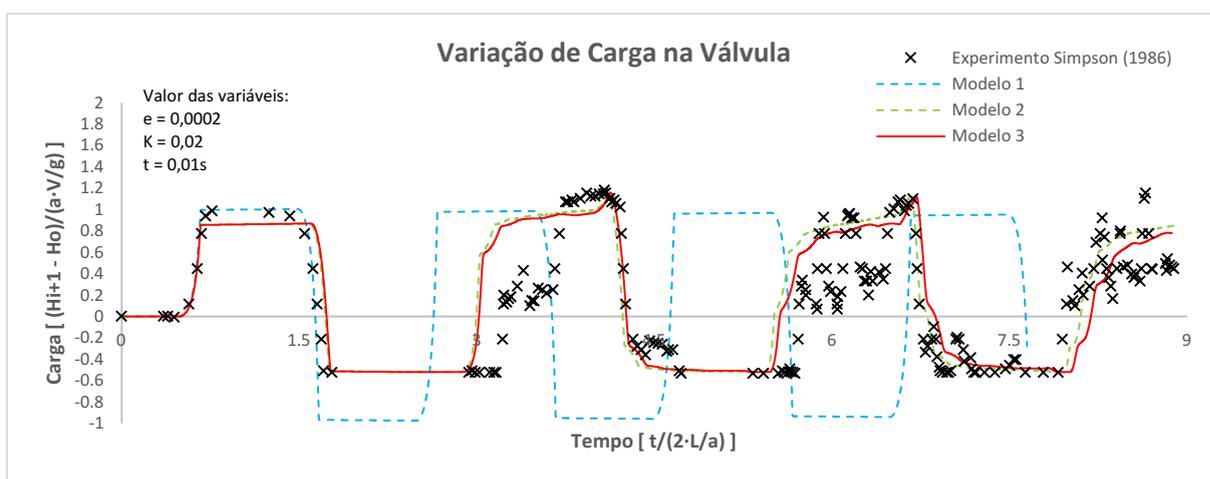
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.4 Análise dos resultados obtidos do Caso 7

No Caso 7, o primeiro pico foi melhor representado pelo Modelo 1, porém os demais picos ficaram fora de fase. O Modelo 2 mostrou resultados próximos ao Modelo 3, porém os dados estatísticos revelam que o último Modelo apresenta dados mais correlatos aos dados observados (Gráfico 55, Gráfico 56 e Tabela 27).

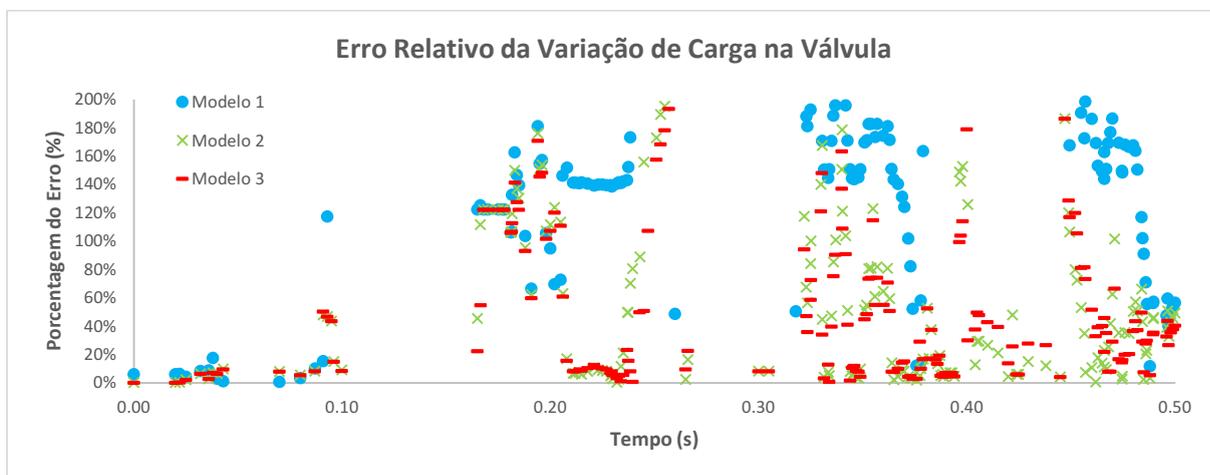
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 55). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 55 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 56 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

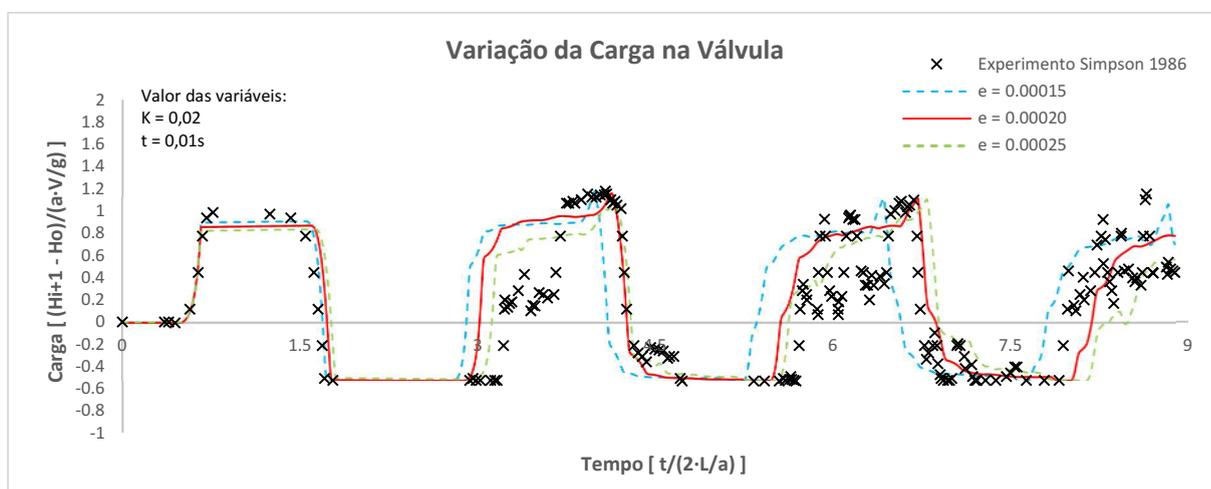
Tabela 27 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 7)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	75,276	-4,147
Modelo 2	24,195	0,468
Modelo 3	21,435	0,583

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

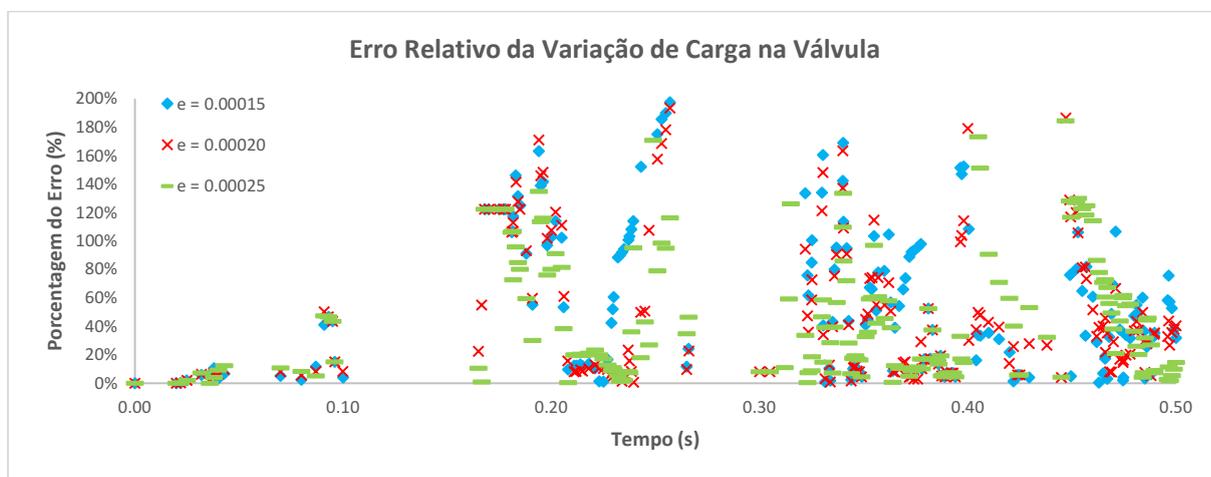
O valor de 0,00025 exibiu resultados mais análogos aos dados observados (Gráfico 57 e Gráfico 58 e Tabela 28).

Gráfico 57 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 58 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

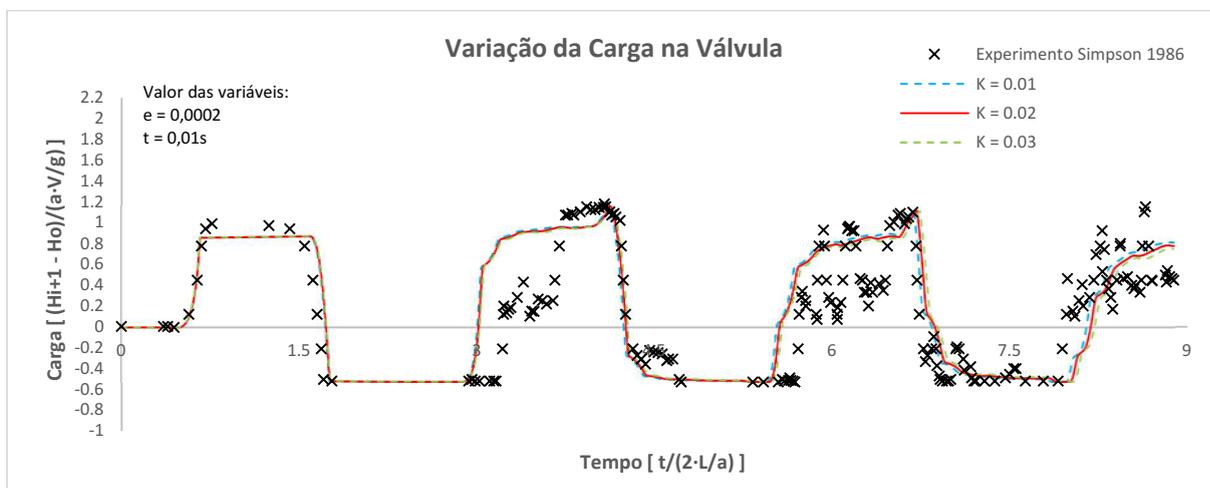
Tabela 28 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 7)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,00015$	33,608	-0,026
$e = 0,00020$	21,435	0,583
$e = 0,00025$	20,960	0,601

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

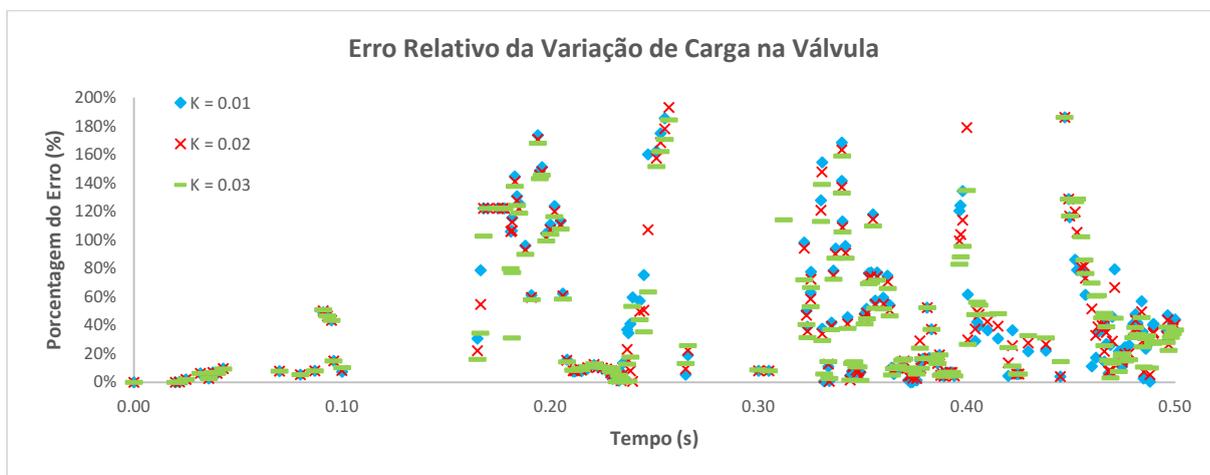
A sensibilidade da variação do K foi menor do que nos Casos anteriores. Ademais, $K = 0,03$ apresentou valor de 0,611 de NSE (Gráfico 59, Gráfico 60 e Tabela 29).

Gráfico 59 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 60 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

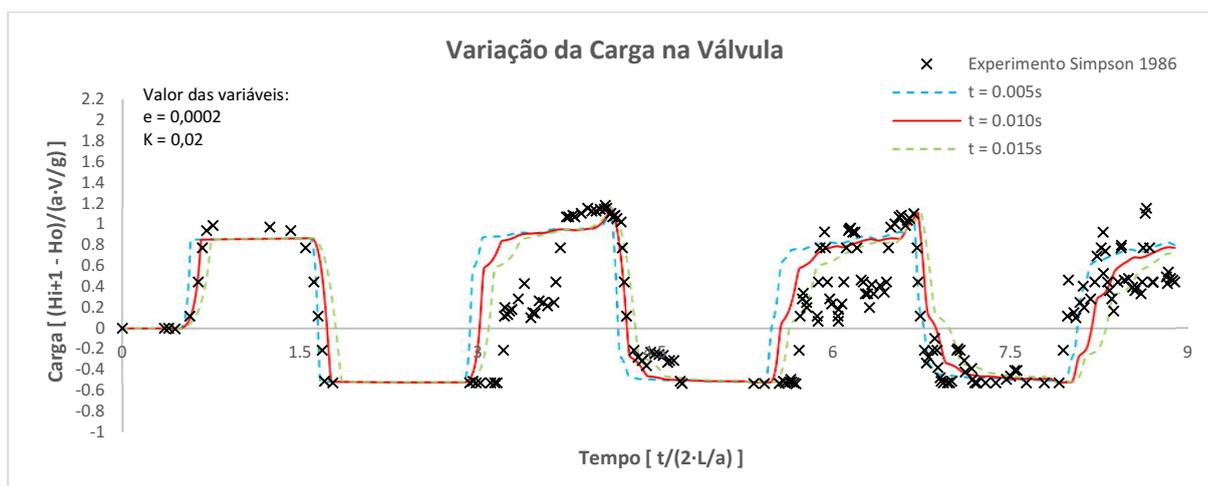
Tabela 29 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 7)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,01	22,379	0,545
K = 0,02	21,435	0,583
K = 0,03	20,707	0,611

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

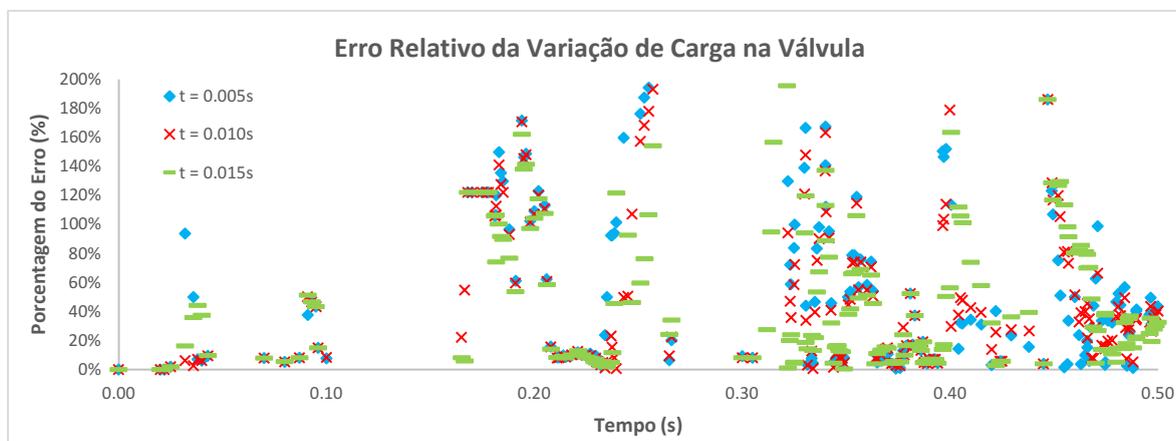
Este Caso apresentou melhor desempenho com um fechamento mais lento da válvula, porém em todos os valores de tempo, o primeiro pico ficou menor do que os dados experimentais (Gráfico 61, Gráfico 62 e Tabela 30).

Gráfico 61 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 62 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 7)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 30 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 7)

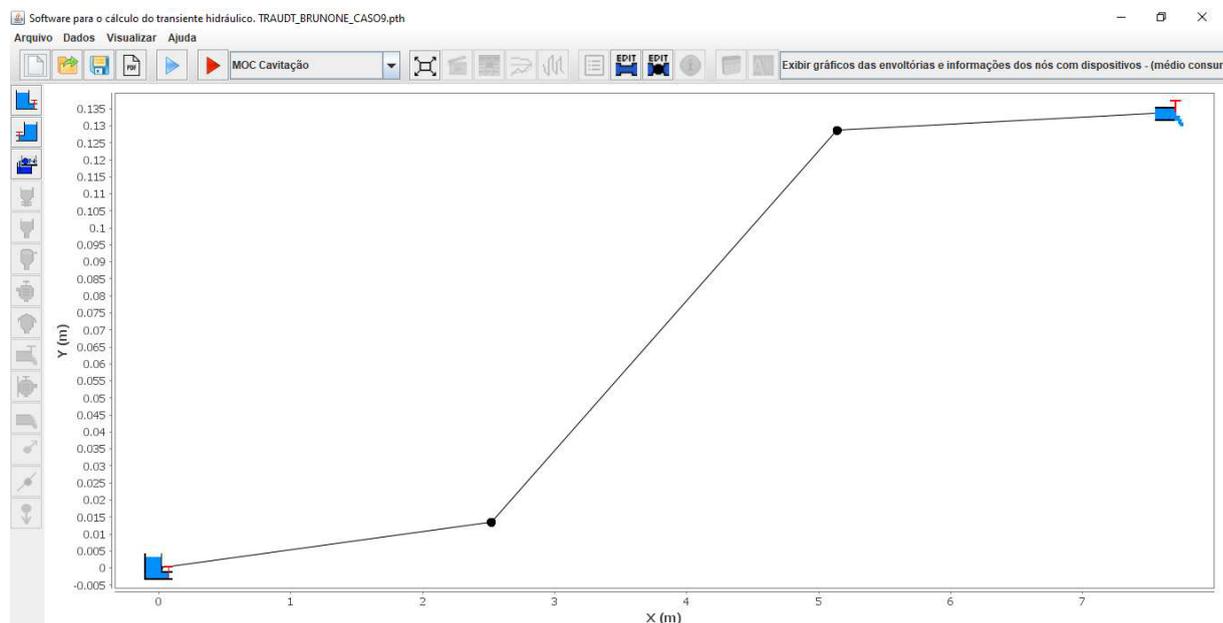
Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,005s$	26,802	0,348
$t = 0,010s$	23,401	0,583
$t = 0,015s$	23,070	0,594

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4 Experimento de Traudt *et al.* (2016)

O experimento realizado por Traudt em 2016 na cidade de Hardthausen na Alemanha possuía uma tubulação de 0,1339 m de nível em relação ao reservatório a montante, com comprimento total de 7,671 m para o Caso 8 e 7,836 m para o Caso 9, diâmetro de 19 mm e espessura de 1,5 mm. Além disso, o esquema proposto simulou um sistema com reservatório – tubulação – válvula, utilizando tanques de ar comprimido (Figura 13).

Figura 13 – *Layout* do experimento de Traudt (2016) no *software* UFC7



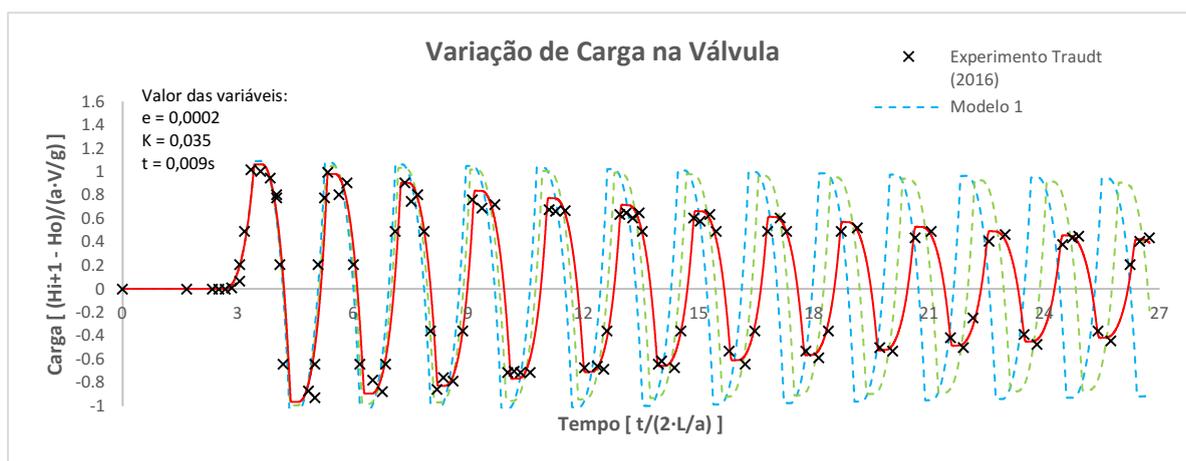
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4.1 Análise dos resultados obtidos do Caso 8

O Modelo 3 destoou dos demais e convergiu aos dados experimentais a partir do terceiro pico de onda. Isso mostra a importância de métodos complementares de forma que essa composição reflita maior atribuição de fatores físicos que muitas vezes não são levados em consideração, mesmo em situações que não acontece cavitação (Gráfico 63, Gráfico 64 e Tabela 31).

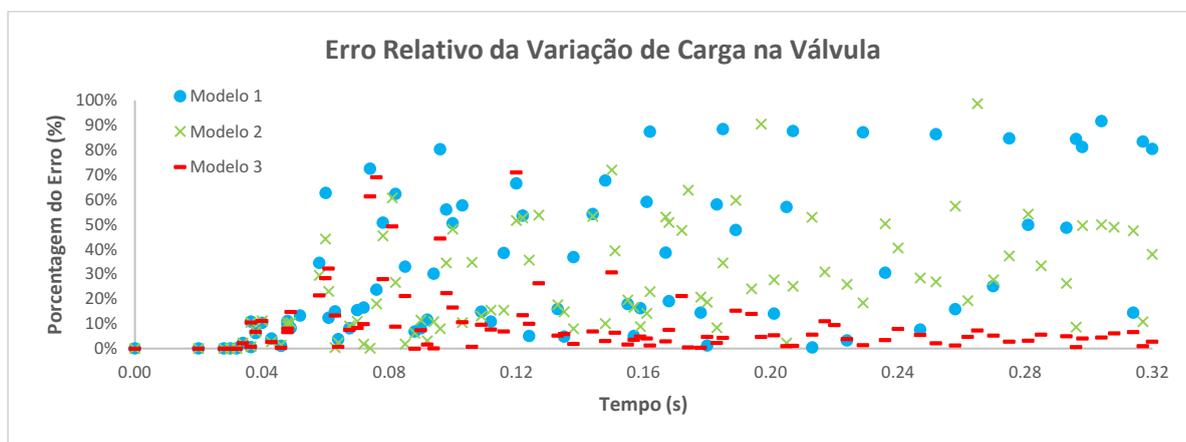
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 63). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 63 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 64 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

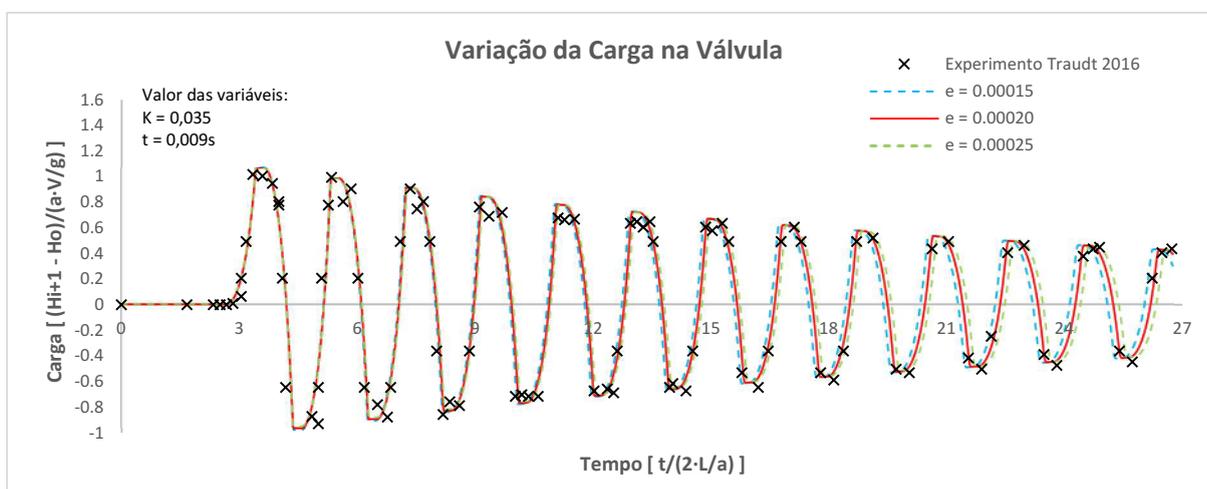
Tabela 31 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 8)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	266,648	-0,484
Modelo 2	120,693	0,696
Modelo 3	54,478	0,938

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

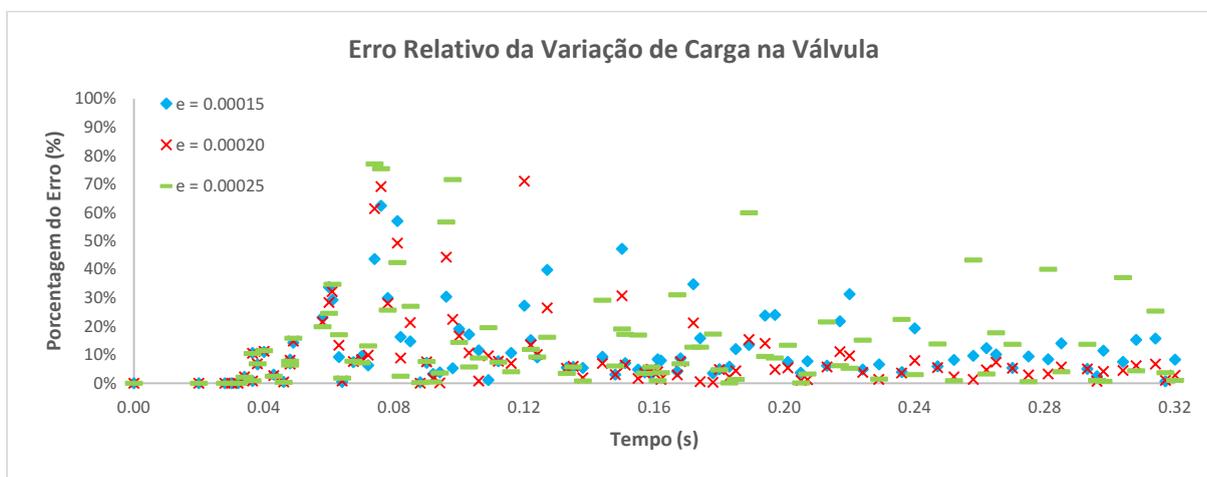
Neste Caso a variação da fração de vazio mostrou pouca sensibilidade, expondo resultados similares, porém o valor de 0,0002 ficou mais próximos aos dados observados (Gráfico 65, Gráfico 66 e Tabela 32).

Gráfico 65 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 66 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

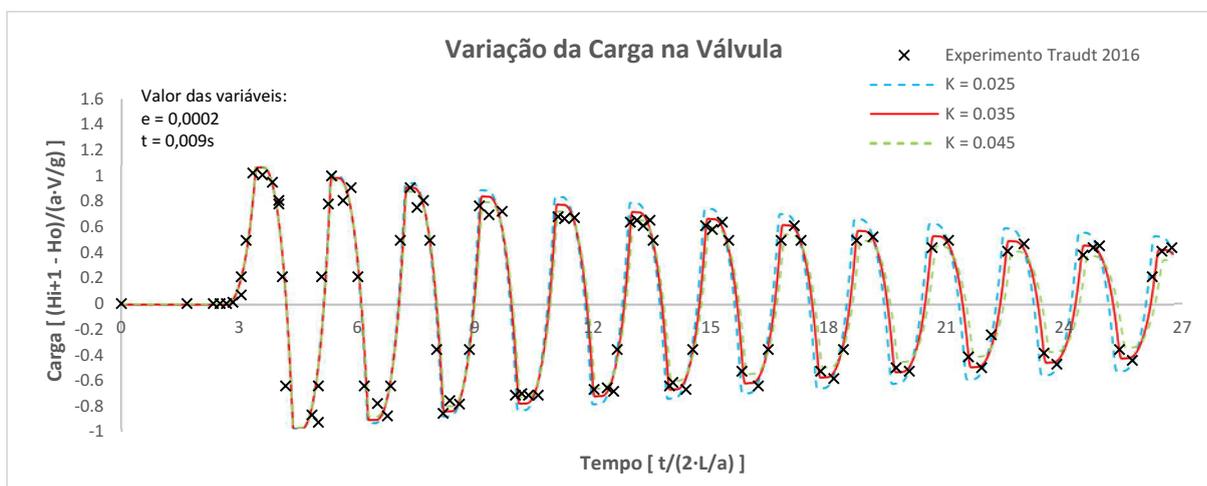
Tabela 32 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 8)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,00015$	56,475	0,933
$e = 0,00020$	54,478	0,938
$e = 0,00025$	72,139	0,891

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

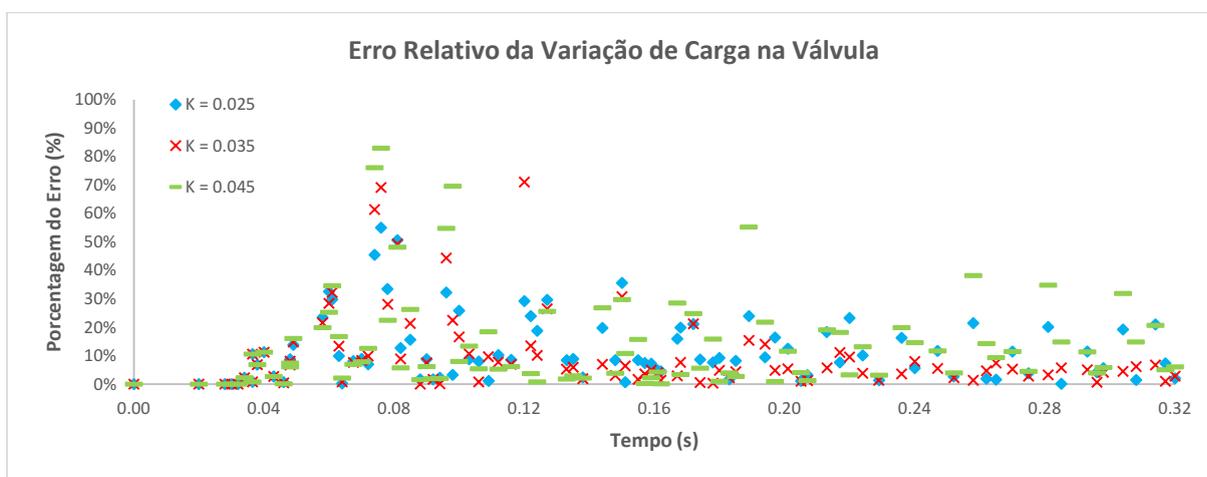
Ocorreu a mesma situação da variação anterior, porém o $K = 0,035$ apresentou resultados próximos aos dados experimentais com 0,938 de NSE (Gráfico 67, Gráfico 68 e Tabela 33).

Gráfico 67 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 68 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

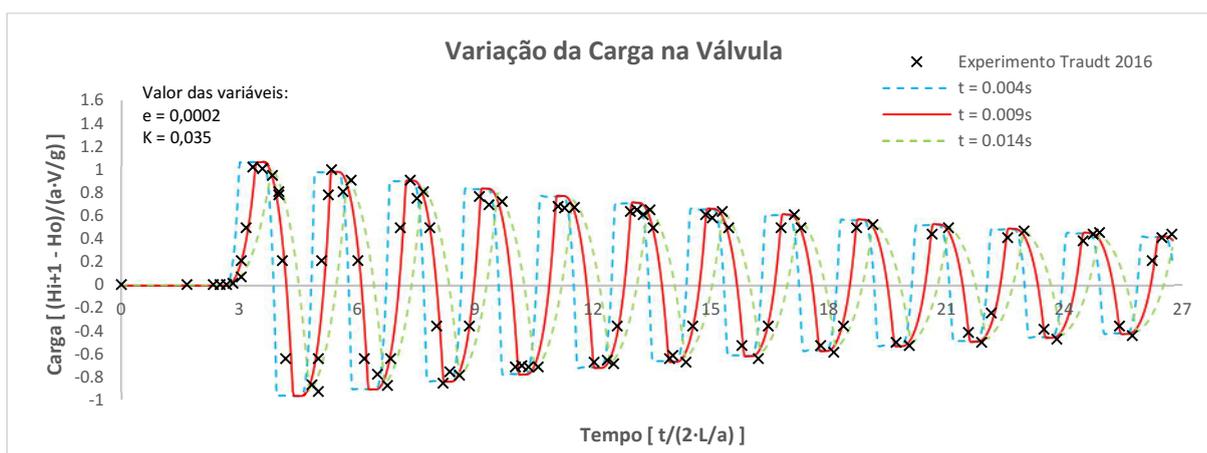
Tabela 33 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 8)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,025	57,216	0,932
K = 0,035	54,478	0,938
K = 0,045	69,577	0,899

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

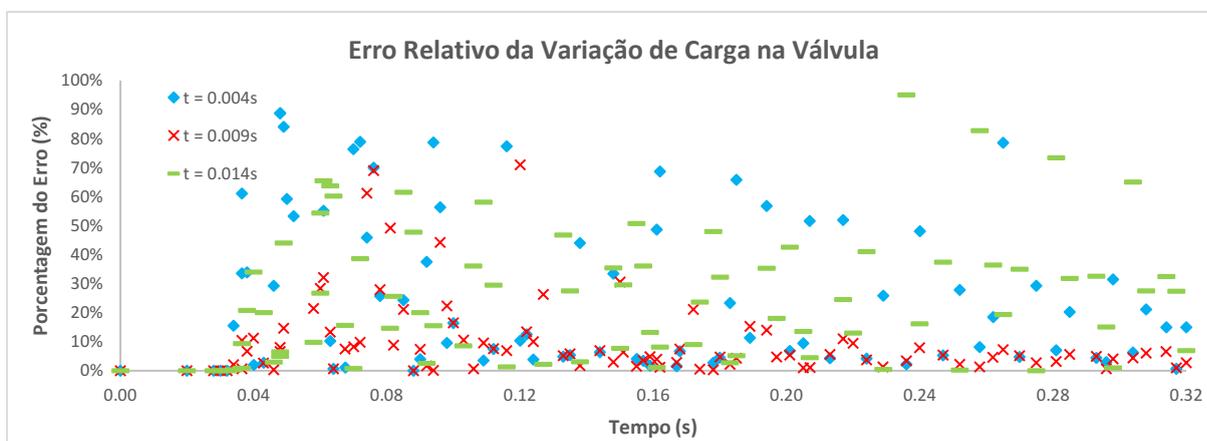
Esse caso apresentou variações próximas aos casos anteriores, com encurtamento e alongamento do comprimento da onda de pressão ao variar o tempo de fechamento (Gráfico 69, Gráfico 70 e Tabela 34).

Gráfico 69 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 70 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 34 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 8)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,004s$	244,349	-0,246
$t = 0,009s$	54,478	0,938
$t = 0,014s$	209,307	0,085

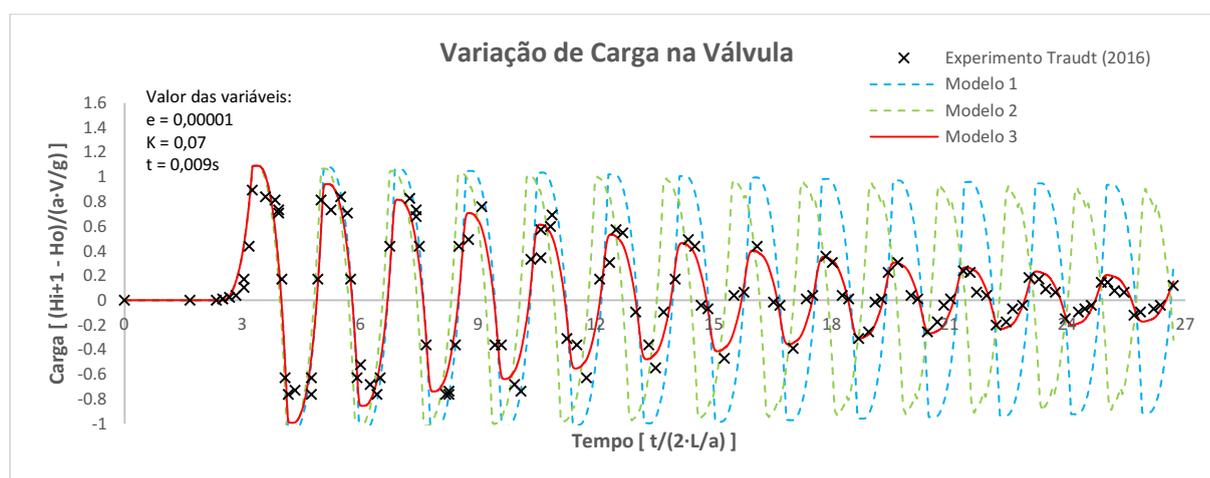
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4.2 Análise dos resultados obtidos do Caso 9

Apesar das alterações de carga e vazão realizadas pelo autor, os resultados evidenciaram índices próximos ao Caso 8, mostrando que o Modelo 3 é o mais adequado para esse sistema. Vale ressaltar que a sobrepressão e a subpressão ficaram acima dos dados observados, fato que não se repetiu a partir do terceiro pico de pressão (Gráfico 71, Gráfico 72 e Tabela 35).

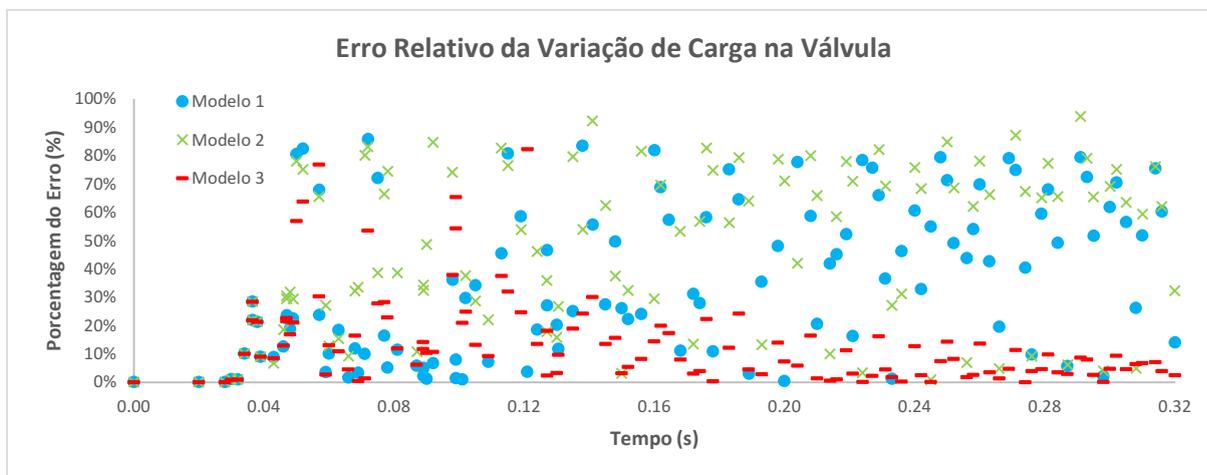
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 71). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 71 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 72 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

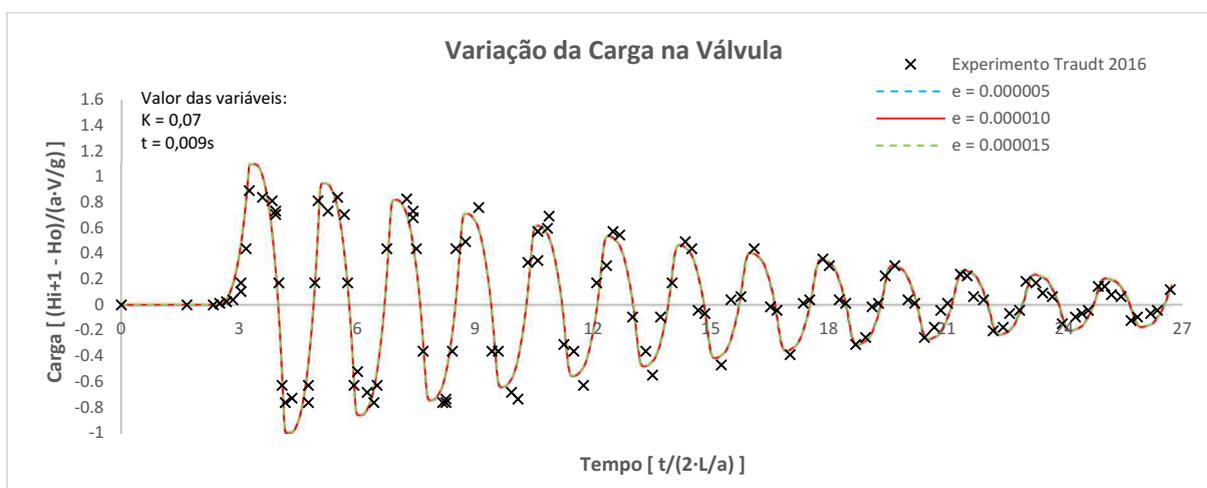
Tabela 35 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 9)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	175,405	-0,143
Modelo 2	232,714	-1,012
Modelo 3	62,233	0,856

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

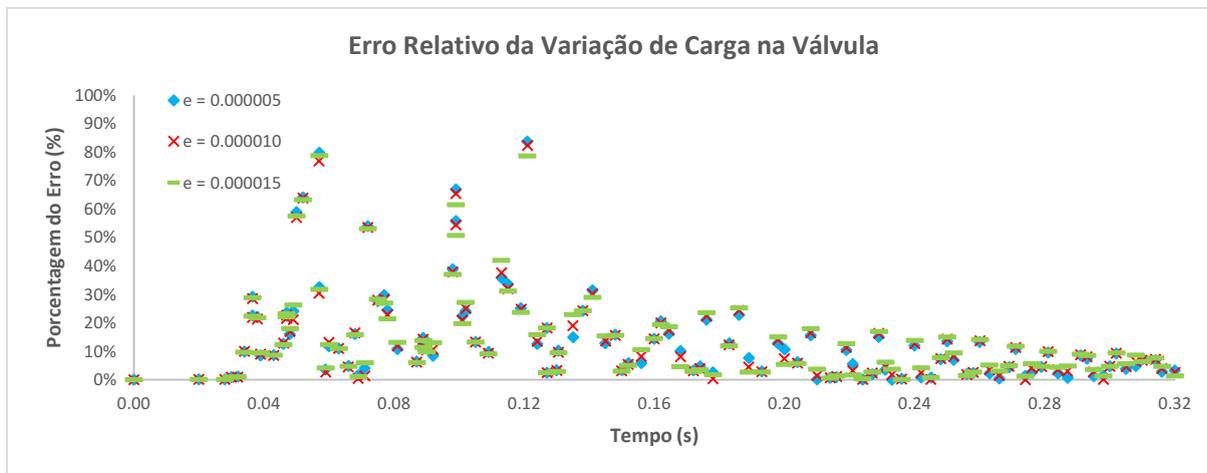
Nessa configuração feita por Traudt et al. (2016) observou-se pouca variabilidade e sensibilidade nos valores testados (Gráfico 73, Gráfico 74 e Tabela 36).

Gráfico 73 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 74 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

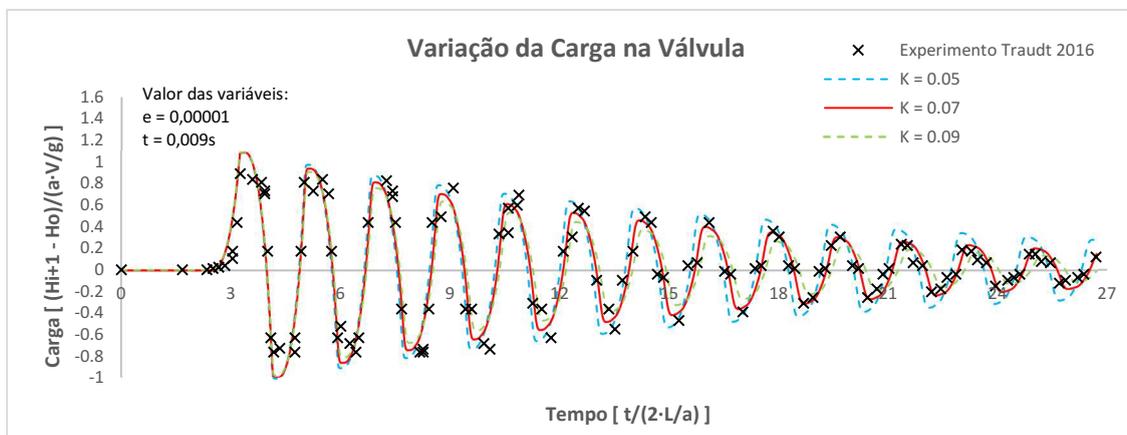
Tabela 36 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 9)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,000005$	62,249	0,856
$e = 0,000010$	62,233	0,856
$e = 0,000015$	63,550	0,850

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

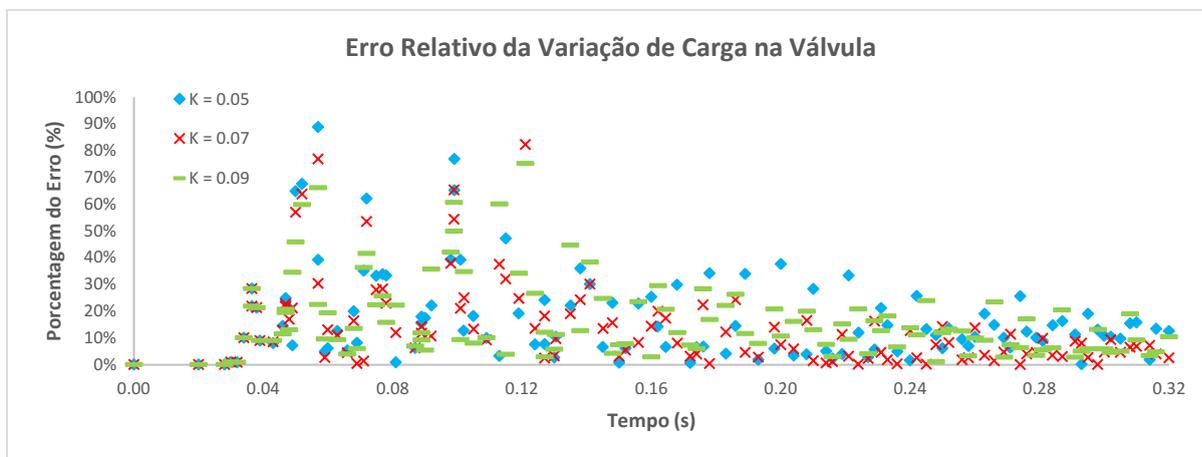
Notou-se que quanto menor o valor de K, maior o tempo de duração da onda. Isso deveu-se ao fato da diminuição do atrito entre o fluido e a tubulação (Gráfico 75, Gráfico 76 e Tabela 37).

Gráfico 75 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 76 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

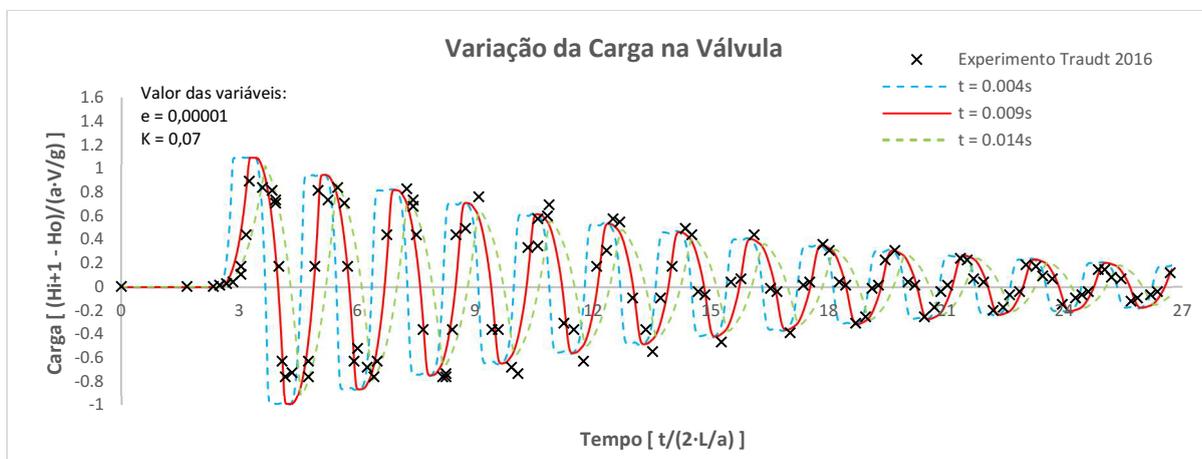
Tabela 37 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 9)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,05	78,866	0,769
K = 0,07	62,233	0,856
K = 0,09	72,713	0,804

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

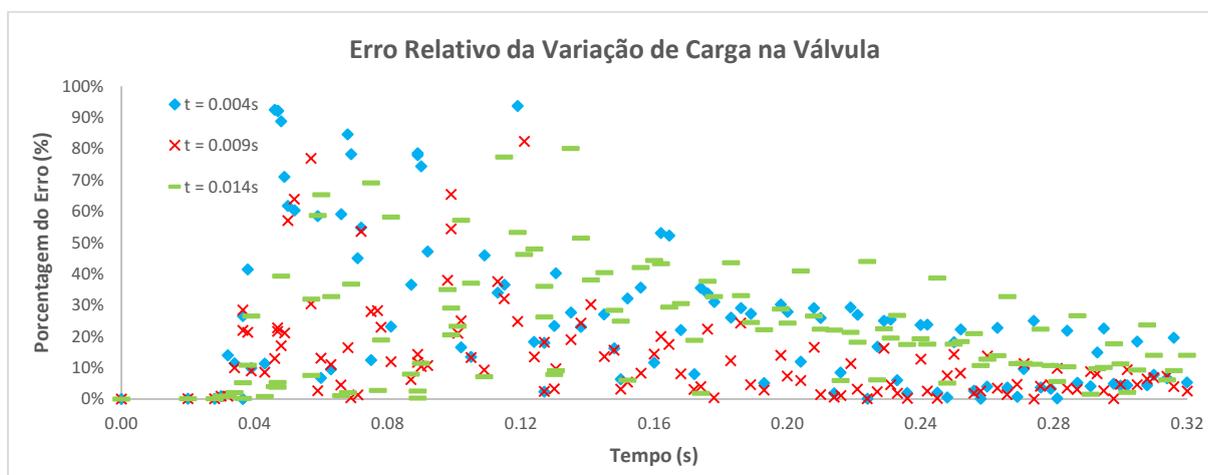
Neste Caso as oscilações de pressão foram compatíveis com os casos anteriores, ou seja, a sensibilidade ocorreu desde o primeiro grupo. O melhor tempo de fechamento foi 0,009s (Gráfico 77, Gráfico 78 e Tabela 38).

Gráfico 77 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 78 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 9)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 38 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 9)

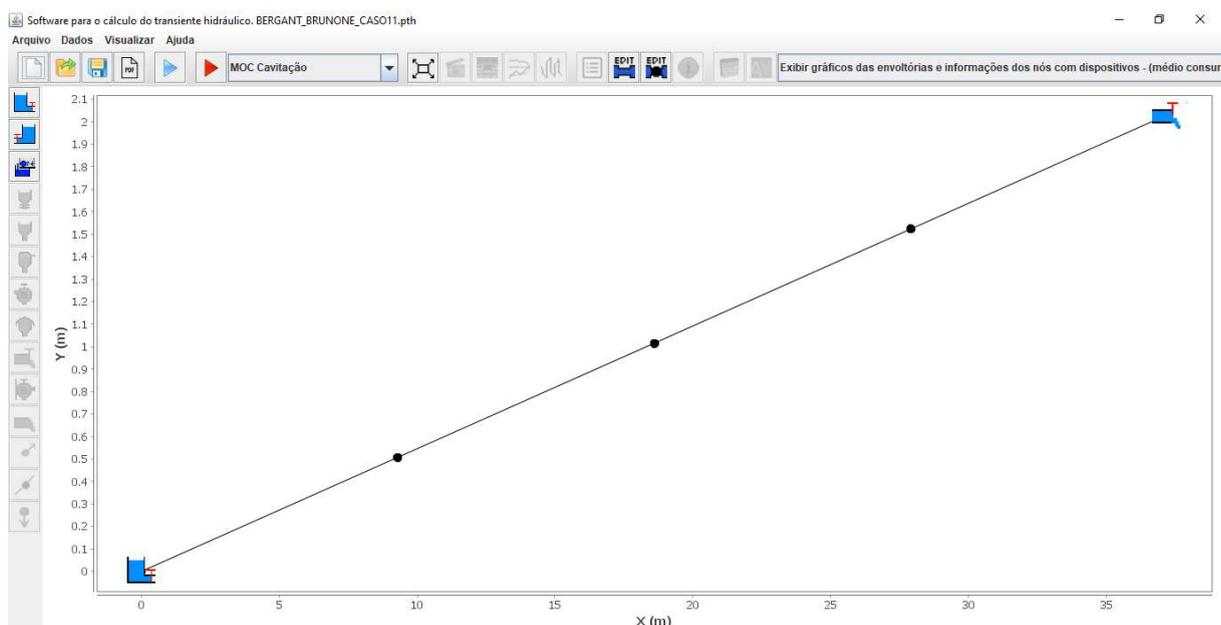
Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,004s$	235,218	-1,056
$t = 0,009s$	62,233	0,856
$t = 0,014s$	147,189	0,183

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.5 Experimento de Bergant e Simpson (1999)

O experimento realizado por Bergant e Simpson em 1999 na Universidade da Ljubljana na Eslovênia possuía uma tubulação de nível 2,03 m em relação ao solo com um comprimento total de 37,23 m, diâmetro de 22,1 mm e espessura de 1,6 mm. Além disso, o esquema proposto simulou um sistema com reservatório – tubulação – válvula, utilizando tanques de ar comprimido (Figura 14).

Figura 14 – *Layout* do experimento de Bergant e Simpson (1999) no *software* UFC7



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

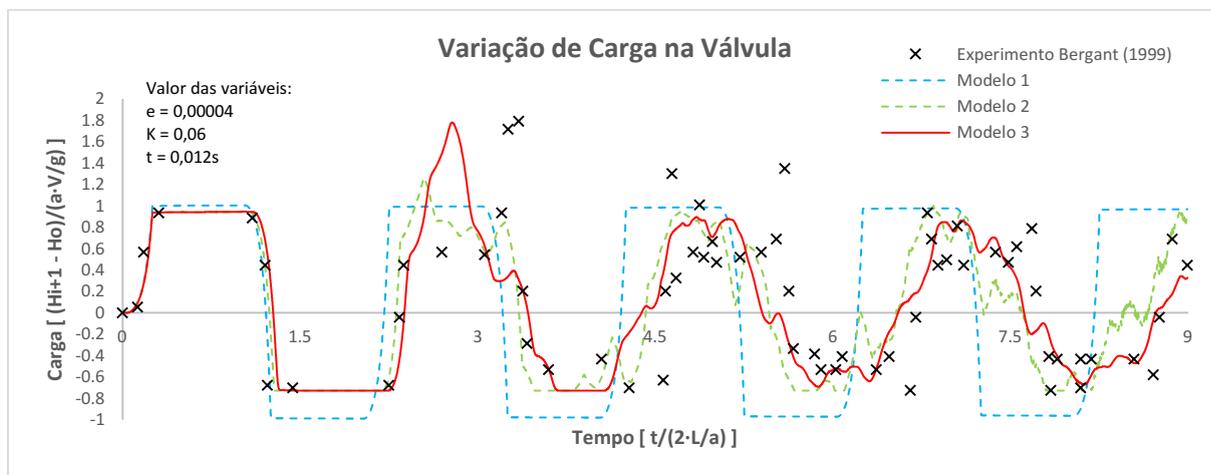
4.5.1 *Análise dos resultados obtidos do Caso 10*

Nos Casos 10 e 11, o autor simulou o experimento mudando o valor da carga a montante deixando a vazão para ambos os Casos.

Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 79). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

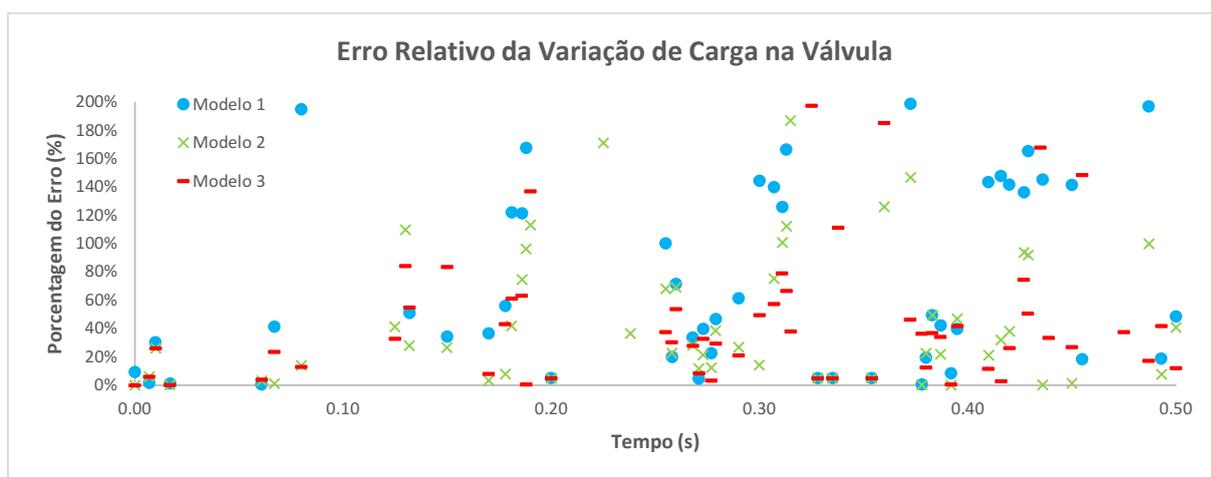
Todos os modelos tiveram resultados menos expressivos, considerando que o Modelo 3 apresentou resultados compatíveis com o fenômeno cavitante, com o segundo pico maior que o primeiro, conseqüente pela junção da coluna líquida após uma separação de coluna (Gráfico 79, Gráfico 80 e Tabela 39).

Gráfico 79 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 80 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 39 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 10)

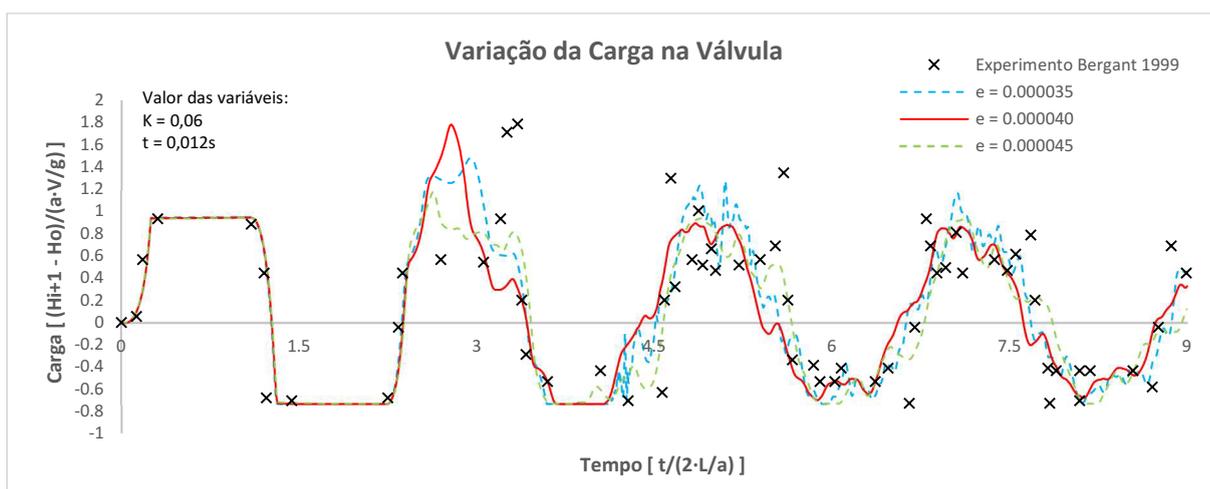
Método	EQM	NSE
Modelo 1	41,611	-1,542
Modelo 2	23,075	0,218
Modelo 3	20,724	0,369

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após variar o valor da fração de vazio, percebeu-se que a visualização dos gráficos corroboraram a análise dos dados estatísticos. Ao observar valor de 0,00004 para a fração de vazio percebeu-se que é o melhor valor para esse caso de fluxo cavitante, porém comparando

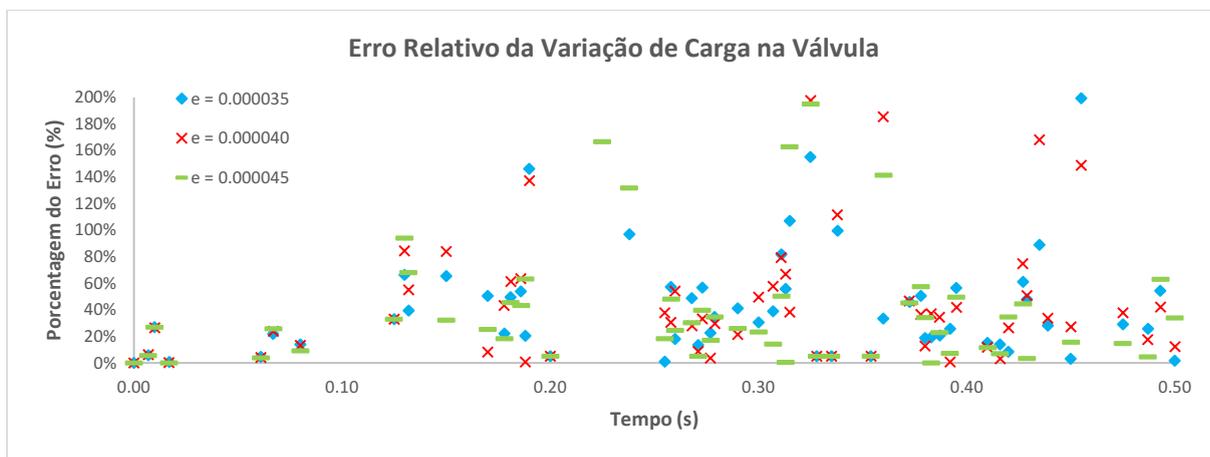
com os dados experimentais, o valor de 0,000045 expôs melhor resultado. Assim esclarece-se melhor a importância de dados estatísticos para avaliação de modelos numéricos (Gráfico 81, Gráfico 82 e Tabela 40).

Gráfico 81 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 82 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

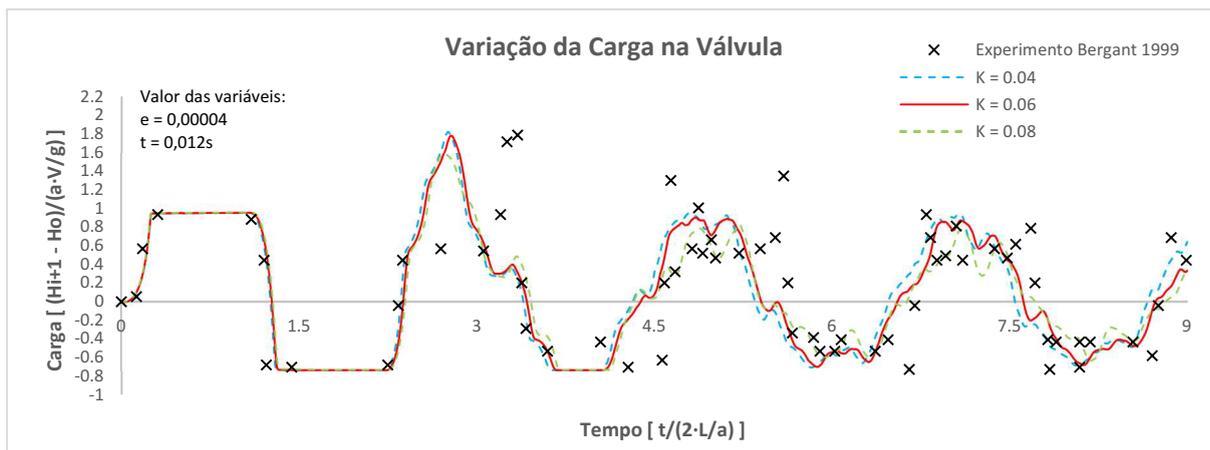
Tabela 40 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 10)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,000035$	19,737	0,428
$e = 0,000040$	20,724	0,369
$e = 0,000045$	17,812	0,534

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

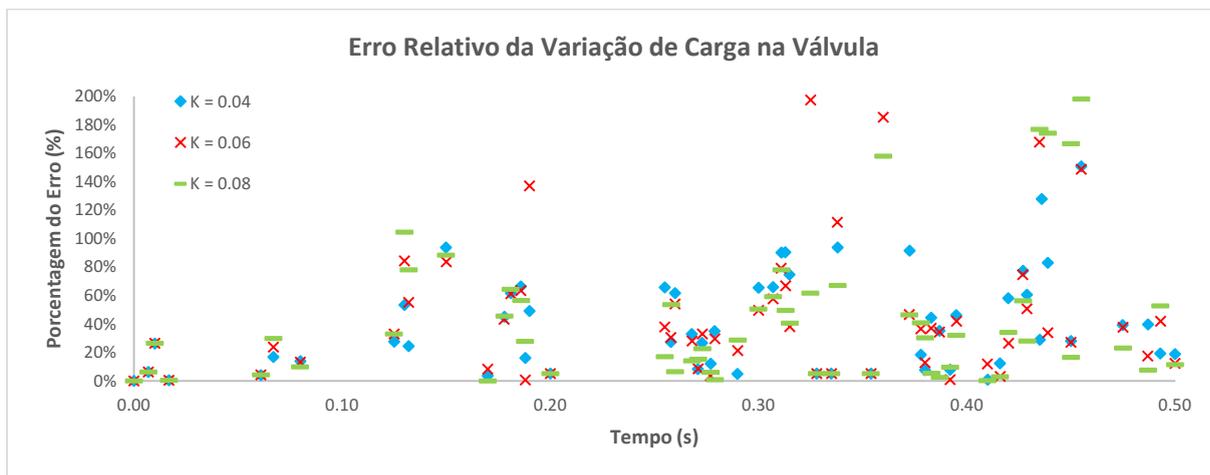
Outro fato interessante aconteceu na variação do K, pois os dois últimos valores se mostram diferentes em uma visualização do gráfico, porém apresentam mesmo valor de NSE (Gráfico 83, Gráfico 84, Gráfico 41 e Tabela 41).

Gráfico 83 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 84 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

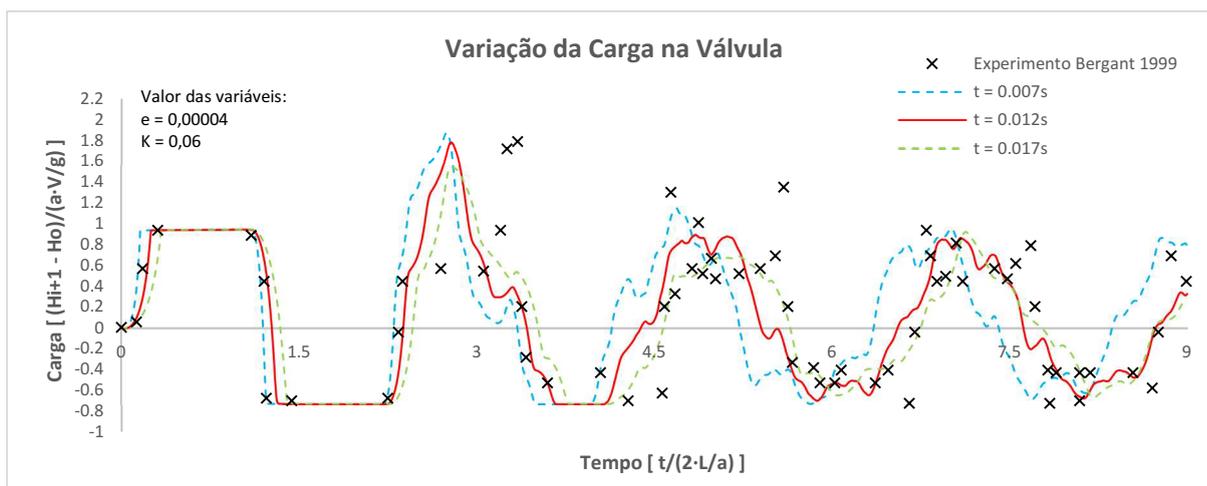
Tabela 41 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 10)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,04	22,329	0,268
K = 0,06	20,724	0,369
K = 0,08	20,736	0,369

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após vários testes percebeu-se uma sensibilidade maior dessa variável (tempo de fechamento da válvula), podendo causar aumento ou redução dos picos de pressão. Para evitar desastres por conta do transiente hidráulico é fundamental uma boa calibração do tempo de fechamento da válvula. (Gráfico 85, Gráfico 86 e Tabela 42).

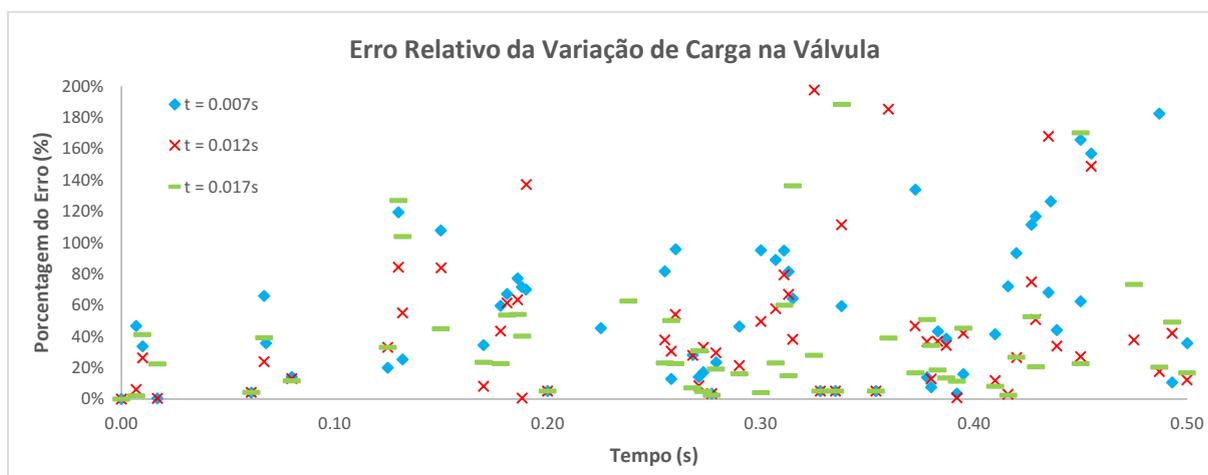
Gráfico 85 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para evitar desastres por conta do transiente hidráulico é fundamental uma boa calibração do tempo de fechamento da válvula.

Gráfico 86 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 10)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 42 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 10)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
t = 0,007s	28,386	-0,183
t = 0,012s	20,724	0,369
t = 0,017s	19,122	0,463

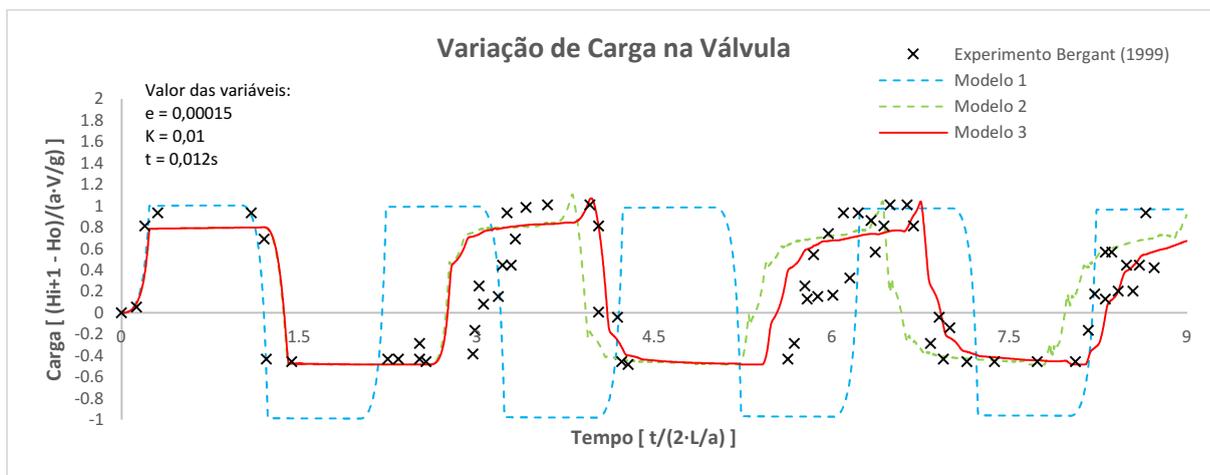
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.5.2 Análise dos resultados obtidos do Caso 11

O Modelo 3 exibiu dados mais próximos aos dados observados do que os Modelos 1 e 2. Por vezes as conclusões realizadas somente por meio de visualização gráfica descaracteriza informações relevantes que a estática revela, como por exemplo, o amortecimento da onda (Gráfico 87, Gráfico 88 e Tabela 43).

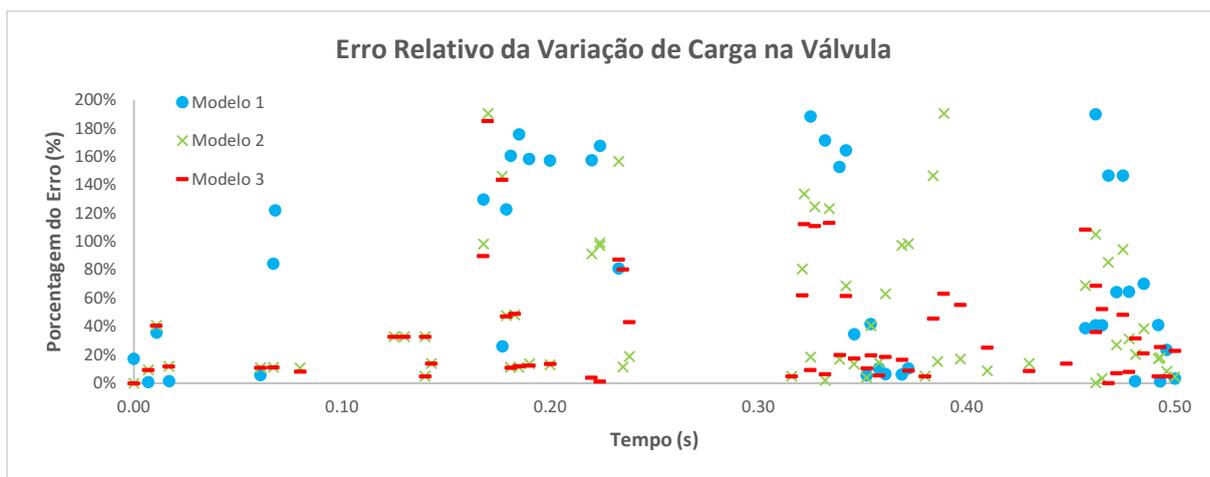
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 87). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 87 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 88 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 43 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 11)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	41,438	-2,821
Modelo 2	19,757	0,131
Modelo 3	14,957	0,502

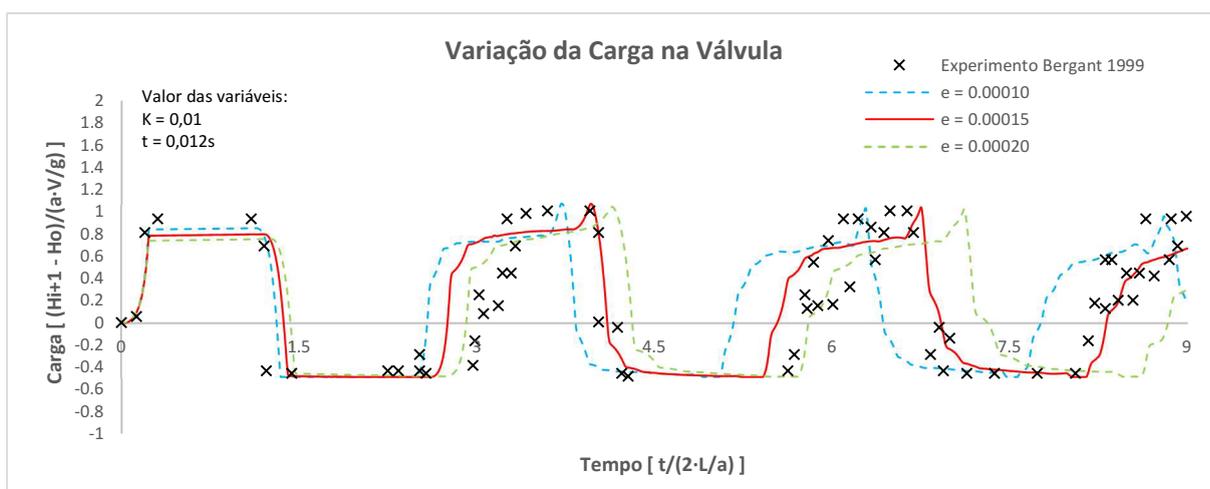
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Fato é que no Caso 10 identificou-se uma modelagem de melhor resultado na primeira comparação entre modelos, mas depois que se realizou variações de fração de vazio

obteve-se melhora significativa em termos estatísticos. Mesma situação aconteceu também no Caso 11, no entanto o melhor resultado se deu por conta da variação do K.

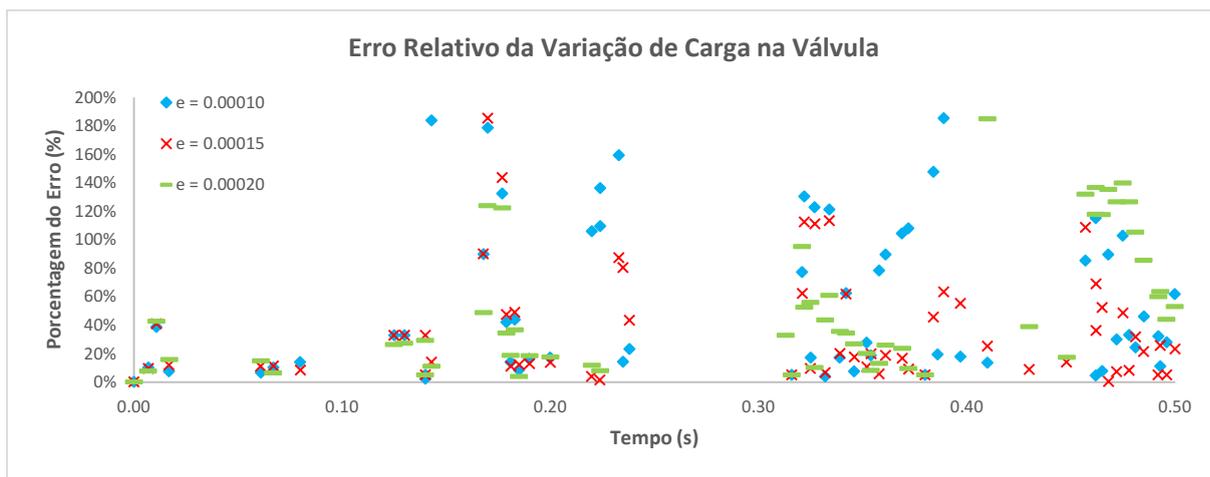
O valor da fração de vazio de 0,00015 evidenciou melhor resultado. Salienta-se que ao variar a fração de vazio inicial todas as outras variáveis permaneceram inalteradas (Tabela 2).

Gráfico 89 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 90 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

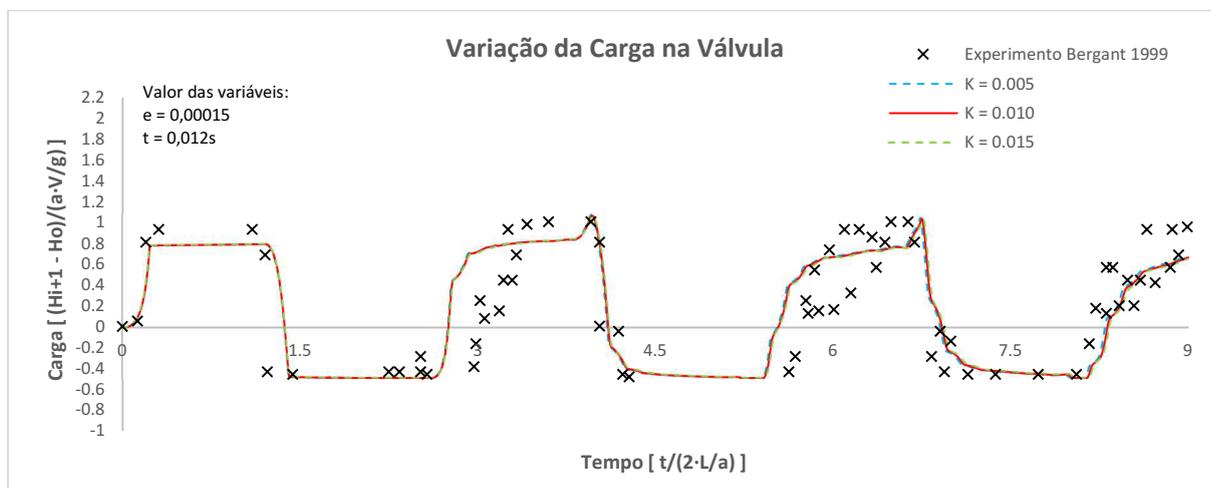
Tabela 44 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 11)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,00010$	22,098	-0,087
$e = 0,00015$	14,957	0,502
$e = 0,00020$	23,687	-0,248

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

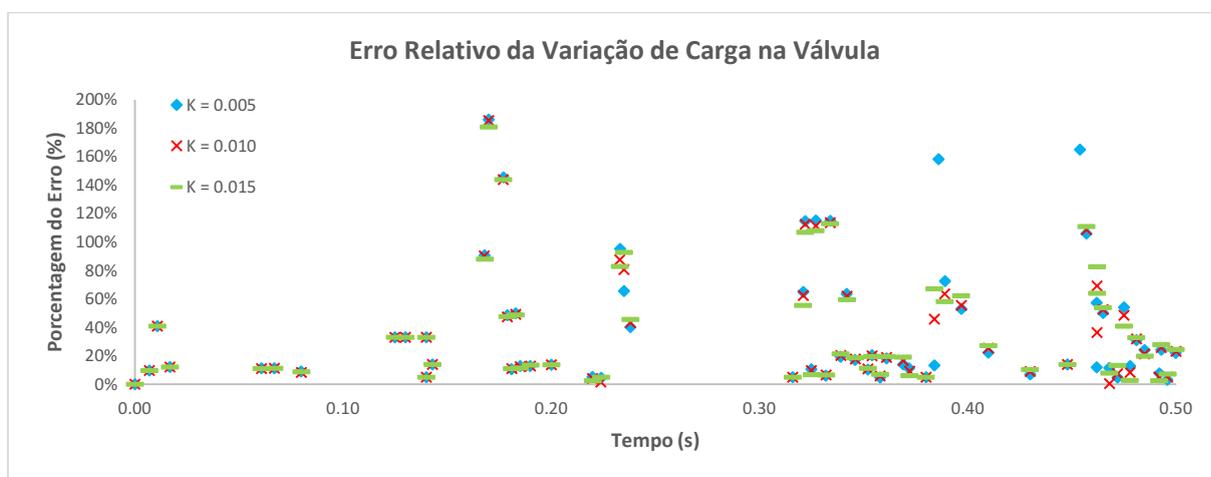
A variação do valor inicial de K melhorou os resultados gráficos (Gráfico 91, Gráfico 92 e Tabela 45).

Gráfico 91 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 92 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

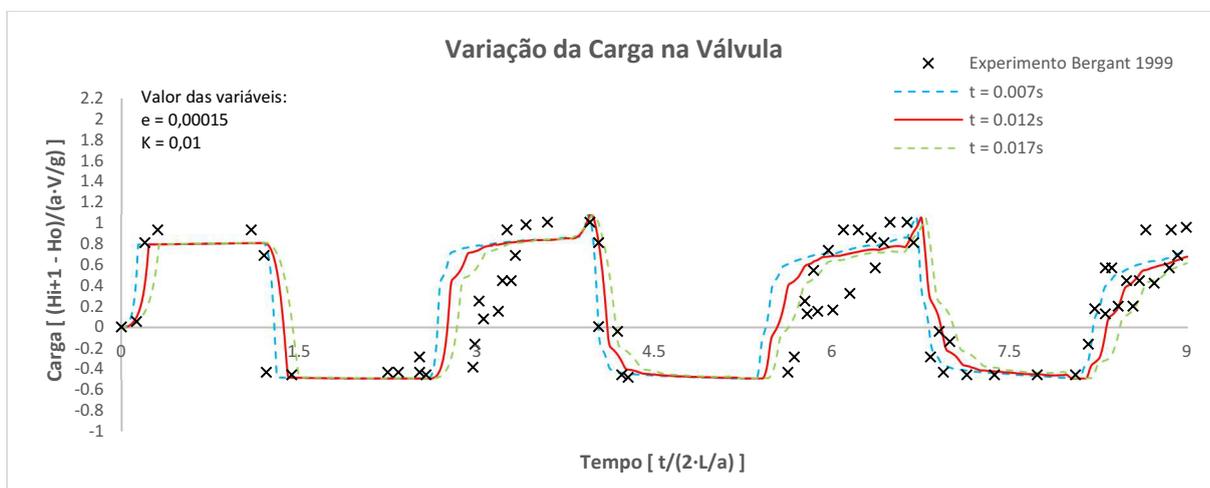
Tabela 45 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 11)

Coeficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,005	14,770	0,515
K = 0,010	14,957	0,502
K = 0,015	15,127	0,491

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

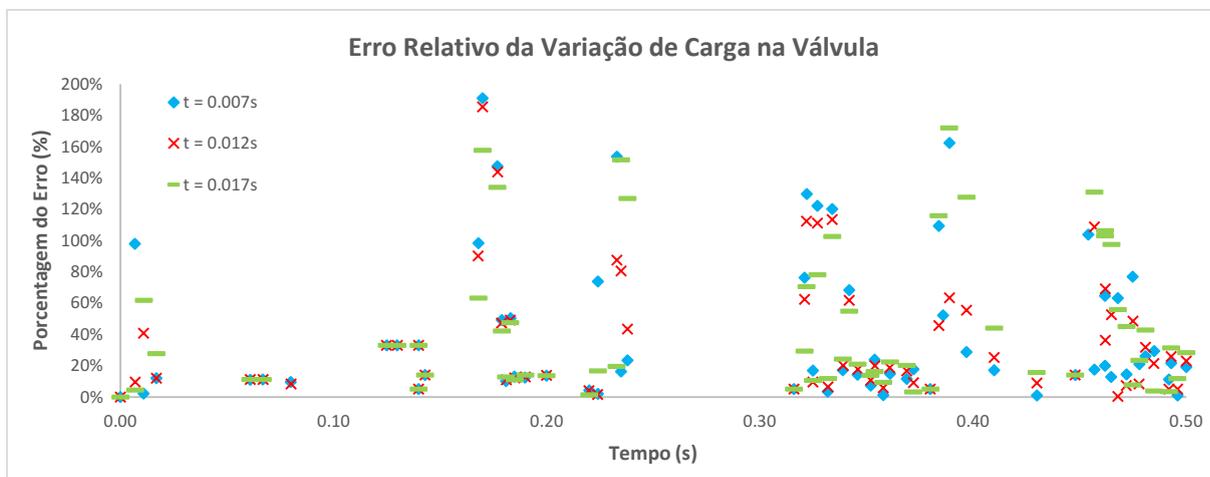
O Gráfico 93 e 94 como também a Tabela 46 apresentaram a sensibilidade da variável de fechamento da válvula.

Gráfico 93 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 94 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 11)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 46 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 11)

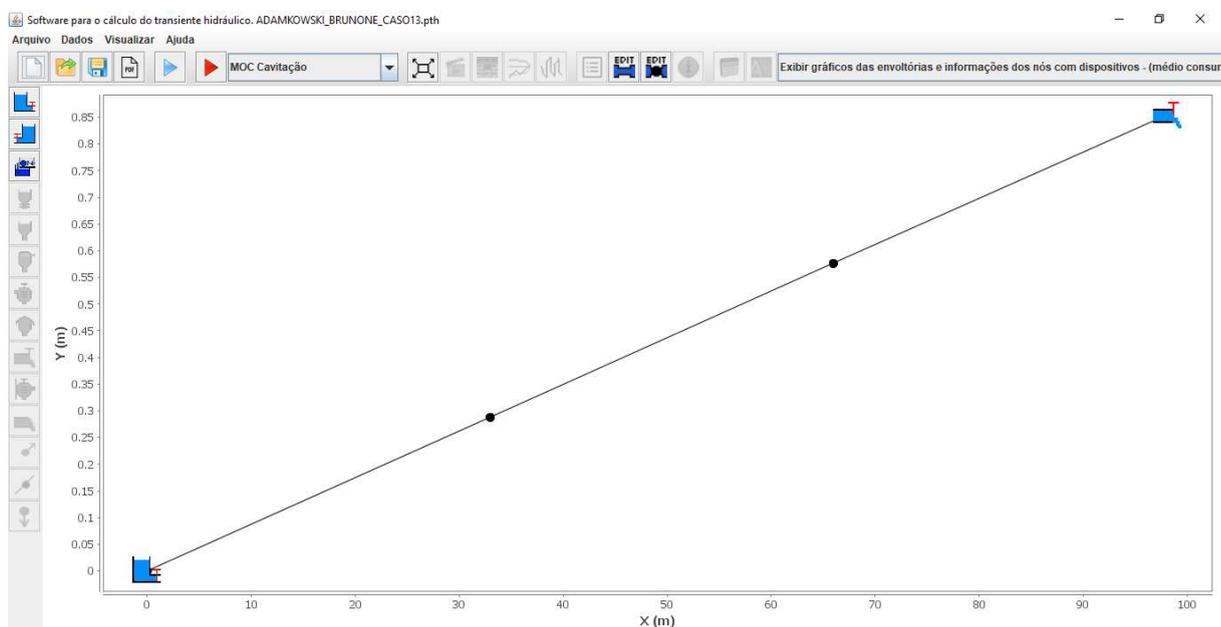
Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,007s$	15,562	0,492
$t = 0,012s$	15,404	0,502
$t = 0,017s$	16,443	0,433

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.6 Experimento de Adamkowski e Lewandowski (2006)

O experimento realizado por Adamkowski e Lewandowski em 2006 no Departamento de testes de máquinas hidráulicas e diagnóstico no Instituto de Szewalski na Polônia possuía uma tubulação de nível 0,8551 m em relação ao solo com um comprimento total de 98,11 m, diâmetro de 16 mm e espessura de 1 mm. Além disso, o esquema proposto simulou um sistema com reservatório – tubulação – válvula, utilizando tanques de ar comprimido (Figura 15).

Figura 15 – Layout do experimento de Adamkowski e Lewandowski (2006) no *software* UFC7



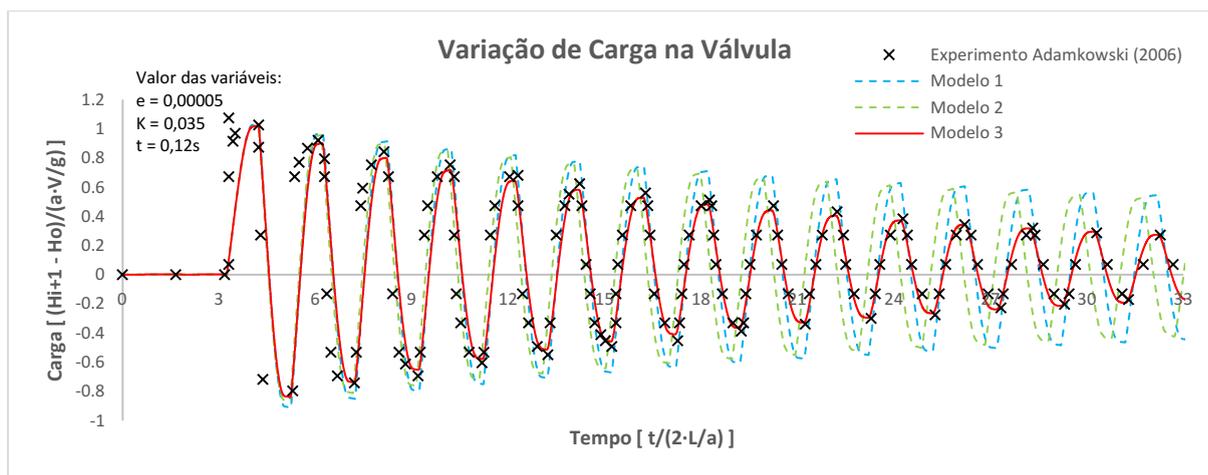
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.6.1 Análise dos resultados obtidos do Caso 12

Os resultados obtidos neste Caso 12 mostraram um padrão estabelecido nos Casos anteriores, revelando que o método que melhor representa o fenômeno transiente, para reservatório – tubulação – válvula é Modelo 3. Outro fato relevante é a importância dos dados estatísticos como forma de julgamento de um método para comparar aos dados experimentais (Gráfico 95, Gráfico 96, Gráfico 97 e Tabela 47).

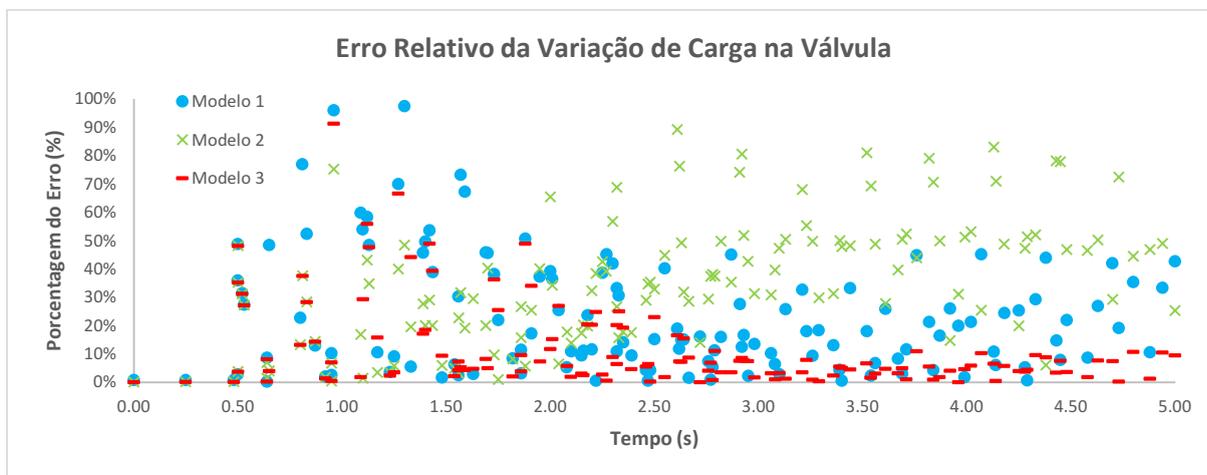
Foi realizada a calibração dos parâmetros, em seguida, os três Modelos foram comparados (Gráfico 95). Posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (fração de vazio inicial, coeficiente de amortecimento e tempo de fechamento).

Gráfico 95 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 96 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir da aplicação dos Modelos 1, 2, 3 e os dados experimentais (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

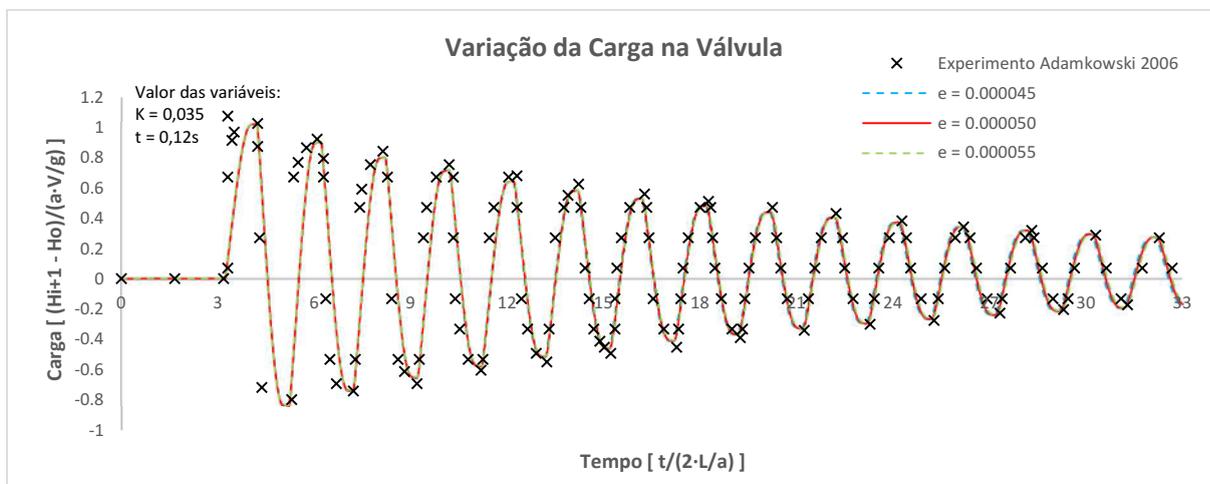
Tabela 47 – Dados estatísticos dos resultados gerados partir da aplicação dos Modelos 1, 2 e 3 e os dados experimentais (Caso 12)

Método	EQM	NSE
Modelo 1	37,631	0,514
Modelo 2	47,166	0,236
Modelo 3	27,826	0,734

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

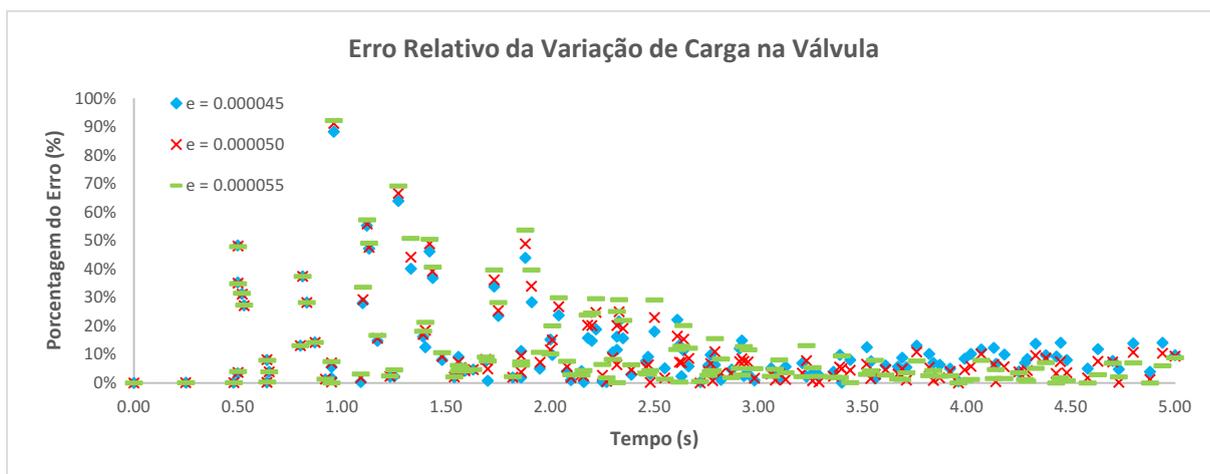
Houve pouca variação da fração de vazio inicial em relação aos três valores testados. Importante lembrar que primeiramente foram realizados diversos testes até chegar a um valor mais próximo aos dados experimentais. Posteriormente, testou-se mais dois valores, totalizando assim, três testes (Gráfico 97, Gráfico 98 e Tabela 48).

Gráfico 97 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 98 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três frações de vazio inicial e os dados experimentais (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

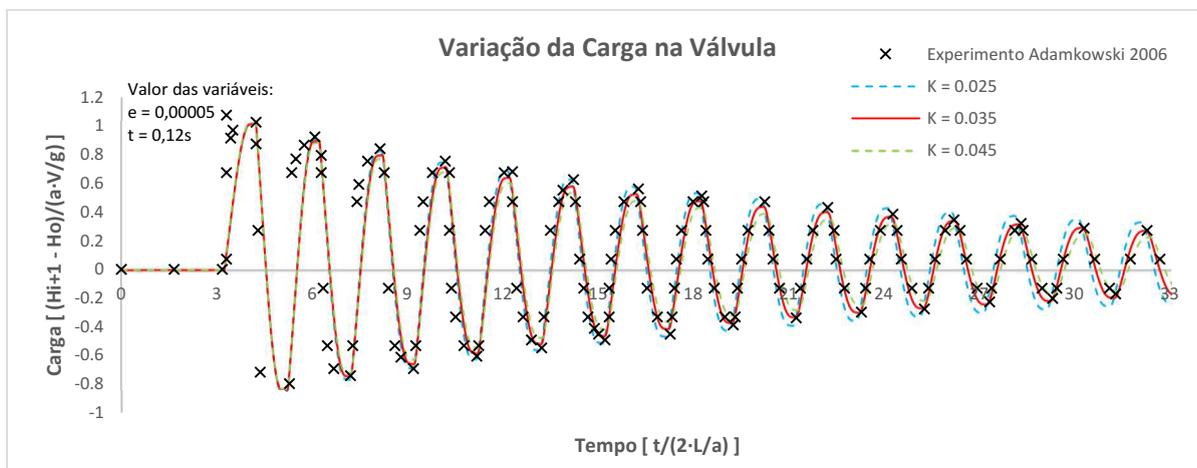
Tabela 48 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes frações de vazio inicial, com base em dados experimentais (Caso 12)

Fração de Vazio Inicial	EQM	NSE
$e = 0,000045$	27,447	0,741
$e = 0,000050$	27,826	0,734
$e = 0,000055$	28,758	0,716

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

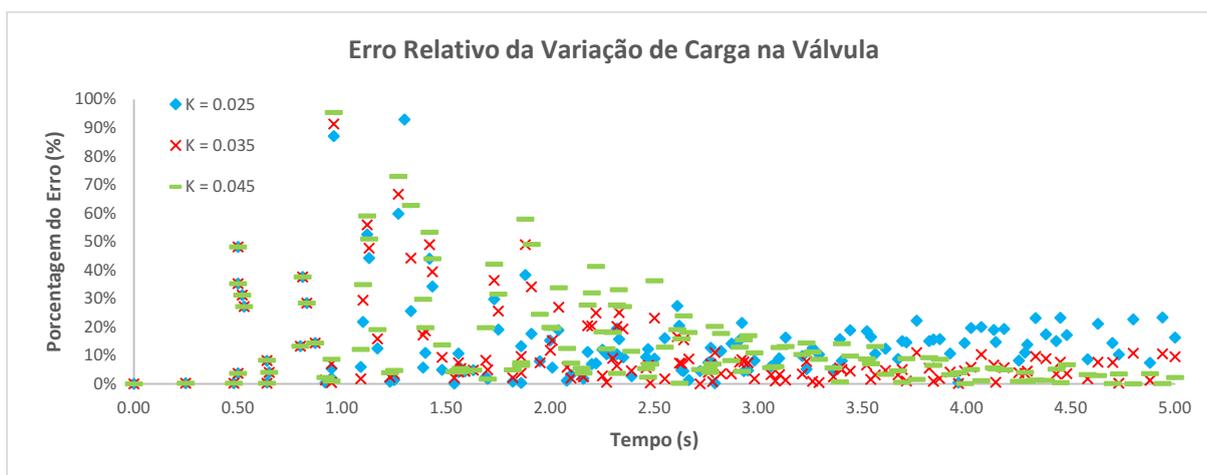
O K é diretamente proporcional ao amortecimento da onda de pressão (Gráfico 99, Gráfico 100 e Tabela 49).

Gráfico 99 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 100 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três coeficientes “K” e os dados experimentais (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

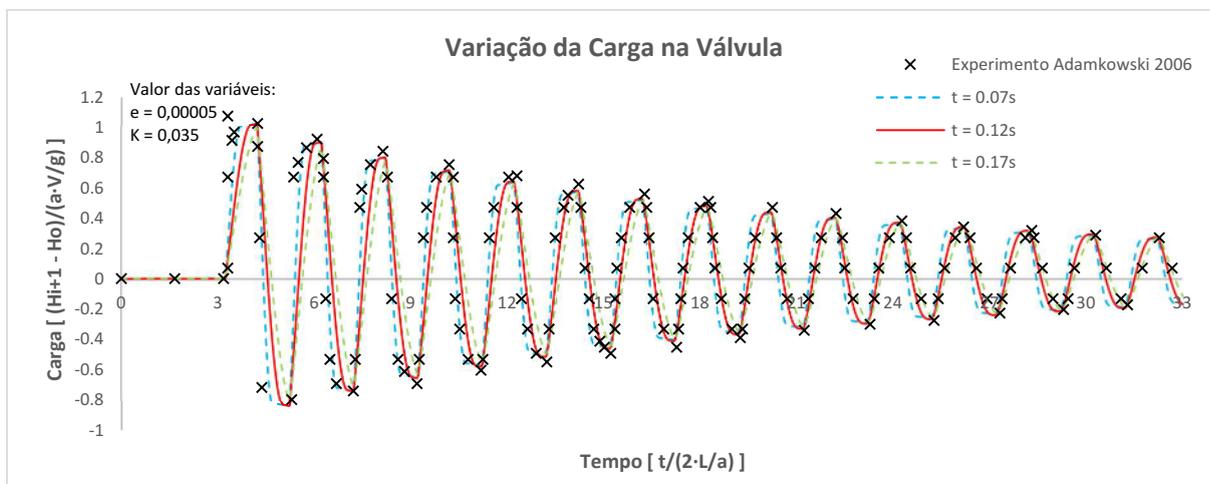
Tabela 49 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes coeficientes “K”, com base em dados experimentais (Caso 12)

Coefficiente de Amortecimento	EQM	NSE
K = 0,025	27,785	0,735
K = 0,035	27,826	0,734
K = 0,045	30,668	0,677

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

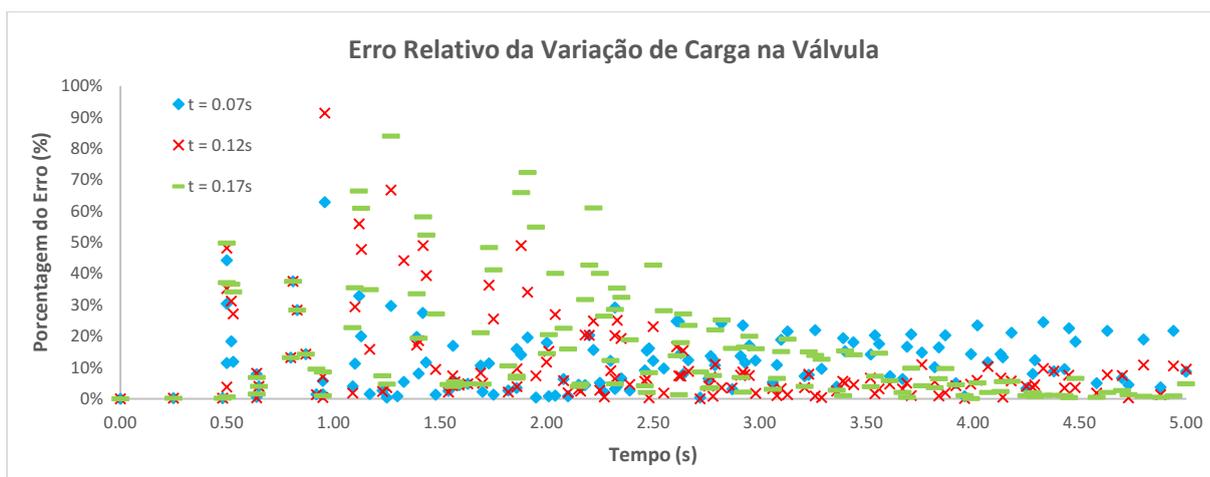
O tempo de fechamento influenciou diretamente no comprimento das ondas e também nos picos de pressão (Gráfico 101, Gráfico 102 e Tabela 50).

Gráfico 101 – Comparativo entre os dados experimentais e os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 102 – Erro relativo entre os resultados gerados a partir de três tempos de fechamento de válvula e os dados experimentais (Caso 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 50 – Avaliação estatística das métricas EQM e NSE para diferentes tempos de fechamento, com base em dados experimentais (Caso 12)

Tempo de Fechamento	EQM	NSE
$t = 0,07s$	22,619	0,824
$t = 0,12s$	27,826	0,734
$t = 0,17s$	36,058	0,553

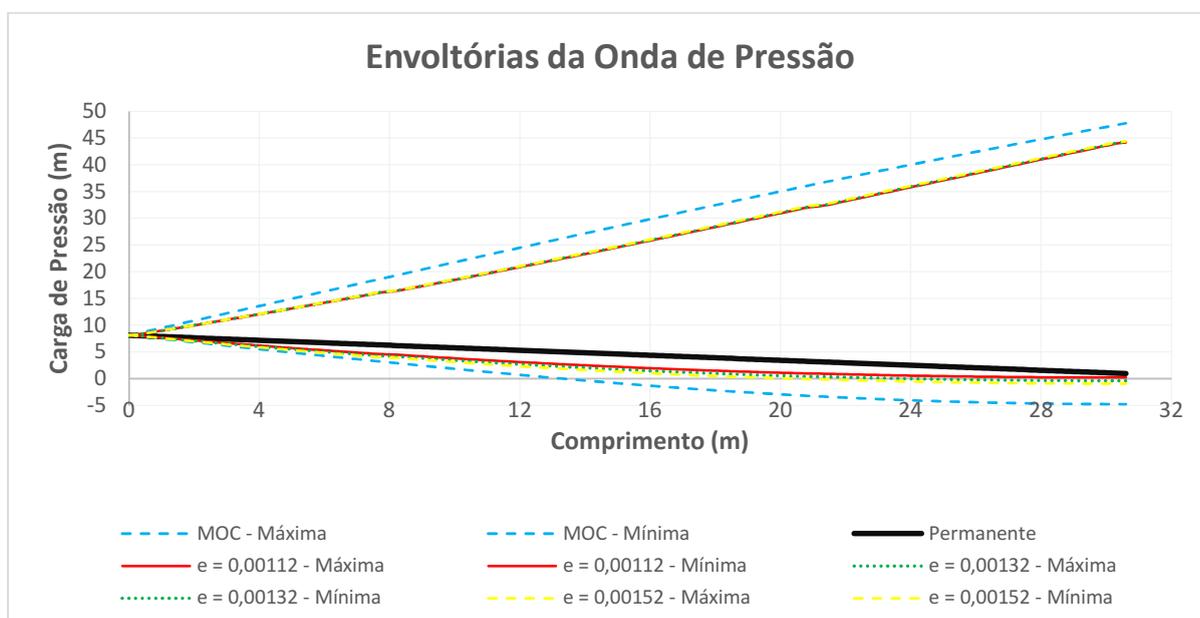
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.7 Influência da variação da fração de vazio inicial nas envoltórias de pressões

O Modelo 1 representado pelo MOC tradicional apresentou maiores variações de pressão máxima e mínima, comparado ao Modelo 3.

Analisando a mudança de fração de vazio dentro do Modelo 3, percebeu-se pouca variação das envoltórias máximas e maiores variações nas envoltórias mínimas (Gráfico 103).

Gráfico 103 – Dados experimentais e dados adimensionais do 1º cenário



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base no que foi relatado anteriormente, observou-se que quanto maior a quantidade de vazios iniciais em um sistema de adução de água, maior é a subpressão.

Ademais esse exemplo refere-se ao Caso 1 do experimento de Chaudhry (1990), que devido ao tempo de fechamento ser lento não acontece cavitação. Isso influenciou diretamente na formação de bolhas e conseqüentemente na não ocorrência da separação de coluna. Reforça-se que os vazios não influenciaram somente em fluxos cavitantes.

4.8 Proposição e análise de uma Nova Equação da Fração de Vazio Inicial para o cálculo do transiente hidráulico

Conforme explanado na metodologia, para propor uma nova equação da fração de vazio inicial foi necessário analisar todos os casos experimentais e posteriormente definir qual melhor modelo e sua respectiva fração de vazio inicial. De modo geral, os resultados obtidos do Modelo 3 se apresentaram mais próximo dos dados experimentais, comparando os Modelos por meio da observação visual e por parâmetros estatísticos.

Depois de definir os adimensionais, aplicou-se a (Tabela 51) de modo que cada PI terá seu valor, assim as (Tabela 52 e Tabela 53) serão aplicadas nos (Gráfico 104 e Gráfico 105) para adquirir as equações por meio da linha de tendência.

Enfatiza-se que todos os PIs foram testados, porém aqueles que possuem a celeridade, vazão e carga tiveram resultados mais próximos aos dados bases.

Em paralelo à definição da melhor fração de vazio, utilizou-se o teorema de Vaschy-Buckingham para obter os adimensionais. Diante disso, escolheu-se criar dois cenários, de forma que os PIs com melhores resultados estatísticos serão escolhidos para compor o desenvolvimento da equação deste trabalho. A seguir serão expostos os passos necessários para se obter cada adimensional.

O 1º passo é escolher o número de variáveis que influenciam no fenômeno. Para o 1º cenário são as seguintes:

- $Q - [L^3.T^{-1}]$
- $H - [L]$
- $A - [L^2]$
- $a - [L.T^{-1}]$
- $e - [L]$

No 2º cenário substituiu a espessura pelo tempo de fechamento da válvula.

- $t - [T]$

O 2º passo é determinar o número de adimensionais a partir da quantidade de variáveis e grandezas. Ambos os cenários têm 5 variáveis e 2 grandezas, assim tem-se 3 adimensionais.

$$m = 5 - 2 = 3$$

O 3º passo é montar os adimensionais de cada cenário individualmente. Em ambos os casos será fixado duas variáveis e as demais serão complementadas em cada adimensional.

Adimensionais do 1º cenário:

$$\pi_1 = Q^{\alpha_1} \cdot a^{\alpha_2} \cdot A \quad (102)$$

$$\pi_2 = Q^{\beta_1} \cdot a^{\beta_2} \cdot H \quad (103)$$

$$\pi_3 = Q^{\theta_1} \cdot a^{\theta_2} \cdot e \quad (104)$$

Resultou-se nos seguintes adimensionais:

$$\pi_1 = \frac{a \cdot A}{Q} \quad (105)$$

$$\pi_2 = \sqrt{\frac{a}{Q}} \cdot H \quad (106)$$

$$\pi_3 = \sqrt{\frac{a}{Q}} \cdot e \quad (107)$$

Adimensionais do 2º cenário:

$$\pi_1 = Q^{\alpha_1} \cdot H^{\alpha_2} \cdot A \quad (108)$$

$$\pi_2 = Q^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} \cdot a \quad (109)$$

$$\pi_3 = Q^{\theta_1} \cdot H^{\theta_2} \cdot t \quad (110)$$

Resultou-se nos seguintes adimensionais:

$$\pi_1 = \frac{A}{H^2} \quad (111)$$

$$\pi_2 = \frac{H^2 \cdot a}{Q} \quad (112)$$

$$\pi_3 = \frac{Q \cdot t}{H^3} \quad (113)$$

Tabela 51 – Dados de entrada para cada cenário

Caso	Carga no Reservatório à Montante (m)	Espessura da Tubulação (m)	Celeridade da Onda (m/s)	Área (m ²)	Vazão (m ³ /s)	Tempo de fechamento (s)	Fração de vazio inicial
1	8,13	0,001000	715,00	0,00053	0,00128	0,600	0,001320
2	46,00	0,001000	1255,00	0,00031	0,00013	0,012	0,000010
3	46,00	0,001000	1255,00	0,00031	0,00016	0,011	0,000200
4	24,30	0,001588	1280,00	0,00029	0,00007	0,030	0,000250
5	23,41	0,001588	1280,00	0,00029	0,00009	0,010	0,000250
6	23,38	0,001588	1280,00	0,00029	0,00011	0,010	0,000120
7	23,16	0,001588	1280,00	0,00029	0,00013	0,015	0,000043
8	432,06	0,001500	1392,00	0,00028	0,00078	0,009	0,000045
9	438,17	0,001500	1392,00	0,00028	0,00083	0,009	0,000150
10	22,00	0,001600	1338,98	0,00038	0,00012	0,017	0,000050
11	12,00	0,001600	1338,98	0,00038	0,00012	0,012	0,000037
12	128,00	0,001000	1298,40	0,00020	0,00019	0,070	0,000045

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- 1º cenário

Tabela 52 – Resultado dos adimensionais no 1º cenário

π_1 (a.A/Q)	π_2 [raiz(a/Q).H]	π_3 [raiz(a/Q).e]
295,4545455	6064,815518	0,745979768
2959,90566	141195,8168	3,069474277
2525,150905	130414,7052	2,835102286
5355,648536	105334,9242	6,883615626
3855,421687	86098,8669	5,840452825
3192,01995	78241,53905	5,314267066
2746,781116	71896,98206	4,929723985
506,1818182	577290,9772	2,004222753
473,4693878	566226,3167	1,938378883
4463,271412	75043,33306	5,457696950
4463,271412	40932,72712	5,457696950
1381,276596	335494,4753	2,621050588

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- 2º cenário

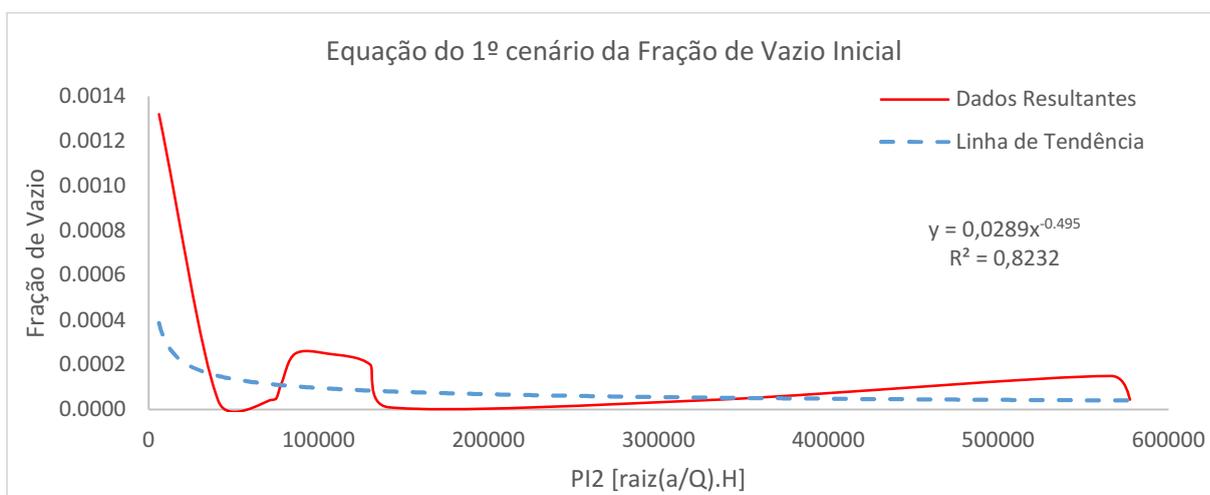
Tabela 53 – Resultado dos dimensionais no 2º cenário

π_1 (A/H ²)	π_2 [(H ² .a)/Q]	π_3 [(Q.t)/H ³]
0,000008033	36781987,27	0,000001434602413
0,000000148	19936258668,68	0,000000000016422
0,000000148	17007995322,98	0,000000000017645
0,000000483	11095446265,58	0,000000000142423
0,000000520	7413014881,27	0,000000000073759
0,000000521	6121738432,71	0,000000000089432
0,000000531	5169176028,69	0,000000000160377
0,000000002	333264872298,81	0,000000000000087
0,000000001	320612241761,28	0,000000000000089
0,000000793	5631501836,19	0,000000000183729
0,000002664	1675488149,61	0,000000000799159
0,000000012	112556542970,84	0,000000000006308

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

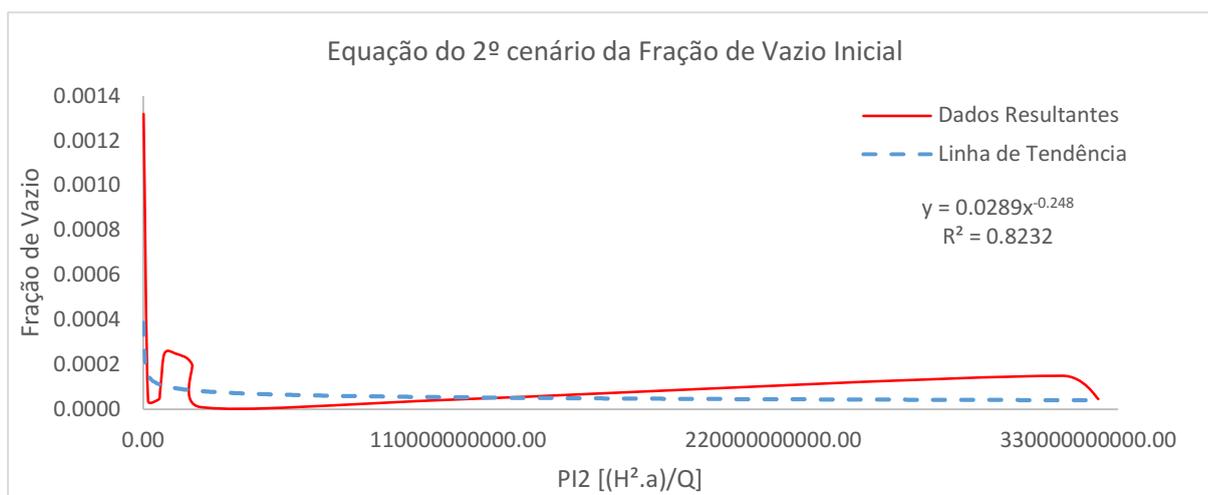
Outro aspecto analisado foi a escolha do tipo de equação. A equação de potência mostrou-se mais adequada para a fração de vazio, por meio de comparações estatísticas. Para o próximo passo foi utilizada uma ferramenta do Excel chamada de “Atingir Meta”, de forma que os valores 0,0289 e -0,0495 no 1º cenário e os valores 0,0289 e -0,0248 no 2º cenário fossem calibrados.

Gráfico 104 – Dados do 1º cenário da Fração de Vazio Inicial



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 105 – Dados do 2º cenário da Fração de Vazio Inicial



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após a calibração dos valores alcançou-se o resultado esperado, sendo que ambas as equações possuem a mesma precisão e conseqüentemente apresentam o mesmo resultado (Tabela 54). Ressalta-se que independente das grandezas testadas para se obter a equação da fração de vazio inicial, as variáveis a , Q e H apresentam maior relevância e importância para obter os valores desejados. Assim abaixo será exposto a equação final resultante desse trabalho.

Por fim as equações (114) e (115) foram obtidas por meio de cenários diferentes, no entanto apresentaram o mesmo resultado.

Equações da fração de vazio inicial para o cálculo do Transiente Hidráulico:

- 1ª Equação da Fração de Vazio Inicial, resultante do 1º cenário analisado

$$\varepsilon_o = 0,0032 \cdot \left(\sqrt{\frac{a}{Q}} \cdot H \right)^{-0,4351} \quad (114)$$

- 2ª Equação da Fração de Vazio Inicial, resultante do 2º cenário analisado

$$\varepsilon_o = 0,0032 \cdot \left(\frac{H^2 \cdot a}{Q} \right)^{-0,2177} \quad (115)$$

Neste trabalho notou-se a importância de um modelo que leve em consideração celeridade variável, fluxo bifásico, processo termodinâmico e atrito variável. Os resultados

indicam que as oscilações estão mais próximas aos dados experimentais, muitas vezes atingindo os maiores e menores picos de pressão, como também o amortecimento da onda de pressão.

Visto isso, a equação da fração de vazio inicial foi baseada no Modelo 3 deste trabalho, que através dos valores base conseguiu-se duas equações que em termos estatísticos tiveram resultados interessantes, com EQM próximo de zero e ERM igual a 71,97% de precisão.

Tabela 54 – Dados estatísticos referentes às equações dos dois cenários

Método	EQM	ERM
1ª Equação	0,00037	0,6646
2ª Equação	0,00037	0,6646

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Confirma-se que as duas equações expõem os mesmos resultados, além disso nota-se que o Caso 11 teve melhor correlação com os dados observados, em contrapartida o Caso 2 demonstrou-se valores menos expressivos (Tabela 55).

Tabela 55 – Relatório comparativo entre as equações

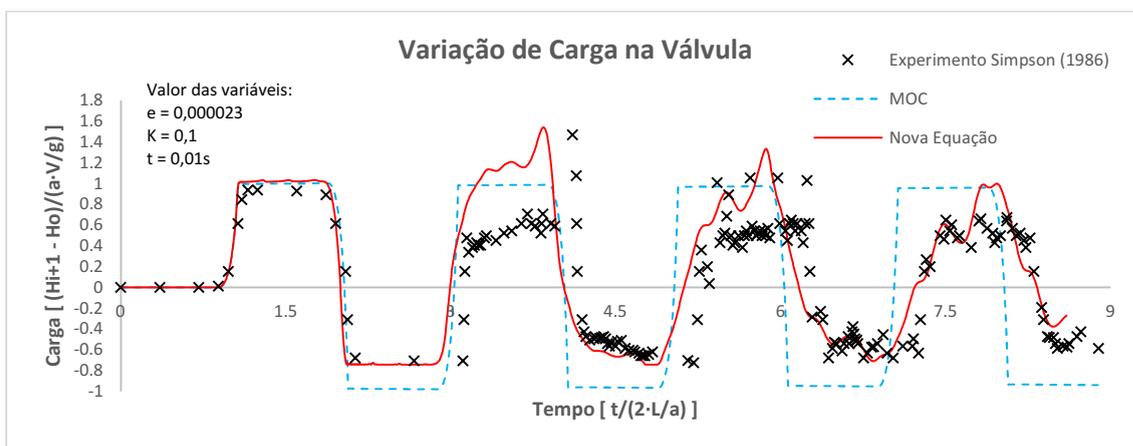
Caso	Experimental	1ª Equação		2ª Equação	
	Fração de Vazio Parâmetro	Fração de Vazio	Erro Relativo	Fração de Vazio	Erro Relativo
1	0,001320	0,000072	94,52%	0,000072	94,54%
2	0,000037	0,000018	50,31%	0,000018	50,49%
3	0,000010	0,000019	90,31%	0,000019	89,64%
4	0,000043	0,000021	51,43%	0,000021	51,60%
5	0,000050	0,000023	54,40%	0,000023	54,56%
6	0,000120	0,000024	80,19%	0,000024	80,26%
7	0,000200	0,000025	87,67%	0,000025	87,71%
8	0,000200	0,000010	95,02%	0,000010	95,04%
9	0,000010	0,000010	0,47%	0,000010	0,07%
10	0,000040	0,000024	39,49%	0,000024	39,69%
11	0,000150	0,000032	78,99%	0,000031	79,06%
12	0,000050	0,000013	74,77%	0,000013	74,86%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como exposto no Gráfico 106, Gráfico 107, Gráfico 108 e na Tabela 56, a nova equação da fração de vazio inicial apresentou resultados mais próximos aos dados observados. Reforça-

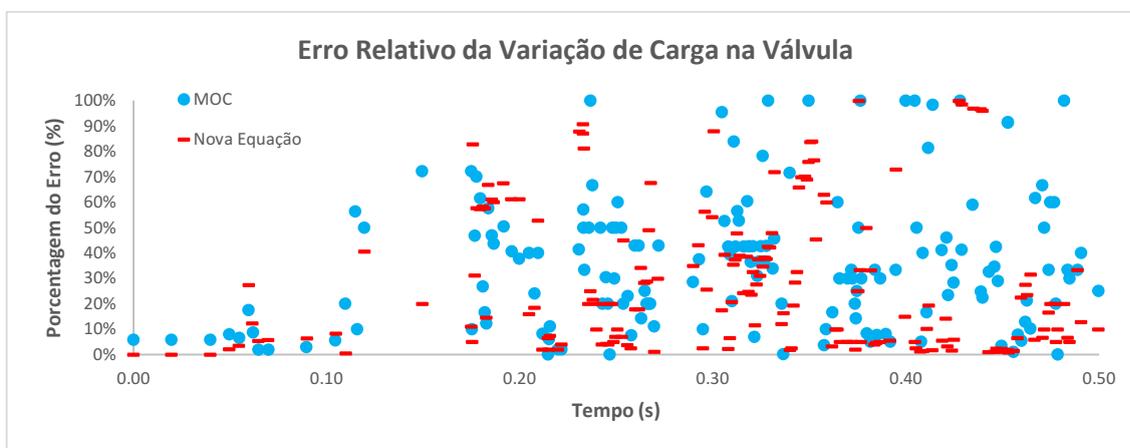
se que nesse Caso 5 analisado houve cavitação consequentemente o segundo pico é maior que o primeiro.

Gráfico 106 – Comparativo entre o MOC, Nova Equação “e” e os dados experimentais



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 107 – Erro relativo entre o MOC e a Nova Equação da fração de vazio inicial



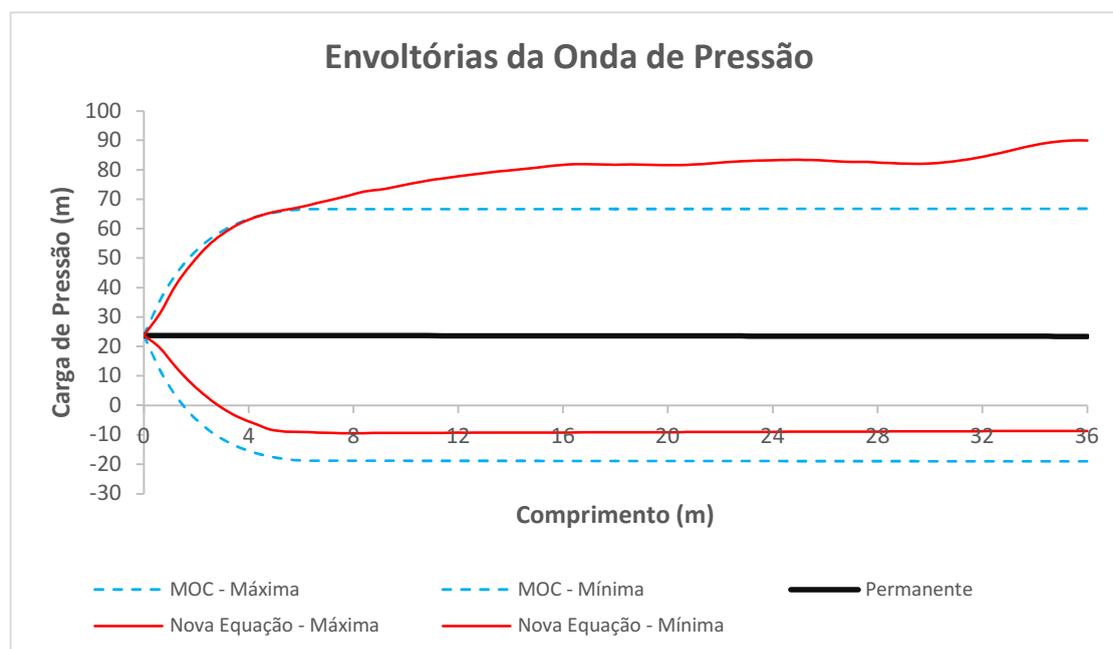
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 56 – Dados estatísticos dos métodos analisados

Método	EQM	NSE
MOC	23,085	0,066
Nova Equação	16,945	0,497

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 108 – Envoltórias das ondas de pressão do Caso 5 no 1º cenário



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

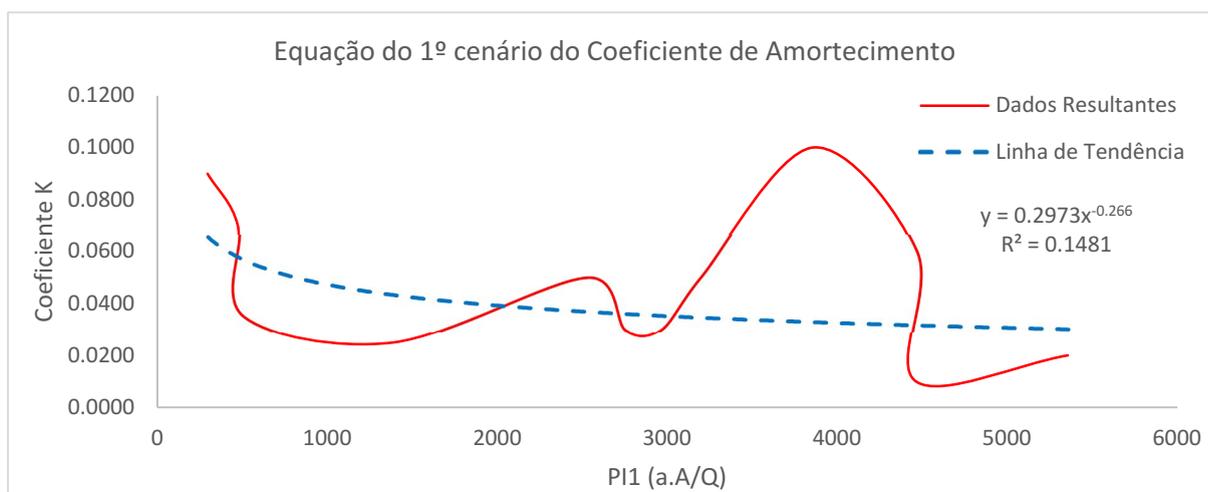
Assim esse novo método proposto juntamente com a nova equação da fração de vazio inicial demonstra resultados que corroboram com uma análise a favor da segurança, fato que difere do método MOC.

4.9 Proposição e análise de uma Nova Equação do Coeficiente de Amortecimento para o Método de Aceleração Instantânea do Brunone

Para resolver o modelo de aceleração instantânea de Brunone atualmente existem duas formas. A primeira é através de inserção de valores aleatórios até o modelo ficar próximo aos dados observados e a segunda é por meio das equações de Vardy.

Neste trabalho as equações de Vardy foram testadas, porém obtiveram resultados muito divergentes aos dados experimentais, por esse motivo resolve-se propor uma nova equação com melhor precisão que proporcionasse encontrar o valor de K. Para isso utilizou-se a mesma metodologia do item 4.8 aproveitando as equações (102) a (107) além da Tabela 51 e Tabela 52.

Gráfico 109 – Dados do 1º cenário do Coeficiente de Amortecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- 1ª Equação do Coeficiente de Amortecimento, resultante do 1º cenário analisado

$$K = 0,1913 \cdot \left(\frac{a \cdot A}{Q} \right)^{-0,263} \quad (116)$$

Tabela 57 – Dados estatísticos referentes à equação do cenário

Método	EQM	ERM
1ª Equação	0,03305	0,4333

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com isso obteve-se uma nova equação de boa precisão que servirá não somente para aplicação no novo modelo proposto nesse trabalho, mas em todos os métodos que utilizarem o modelo de aceleração instantânea do Brunone.

De acordo com a Tabela 58, o Caso 4 expôs valores mais próximos aos dados experimentais. No entanto, o Caso 11 mostrou resultado menos relevante, condição inversa exibida nas equações da fração de vazio inicial do item anterior. De forma geral, foi evidenciado números promissores comparando-se aos dados observados.

Tabela 58 – Relatório de desempenho da equação

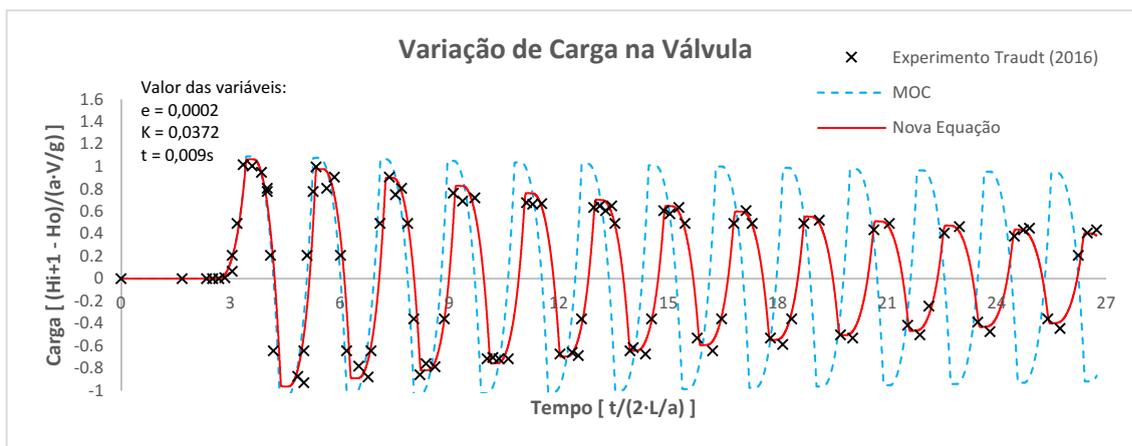
Experimental		1ª Equação	
Caso	Coefficiente de Amortecimento Parâmetro	Coefficiente de Amortecimento	Erro Relativo
1	0,0900	0,0429	52,39%
2	0,0300	0,0234	22,08%
3	0,0500	0,0244	51,25%
4	0,0200	0,0200	0,00%
5	0,1000	0,0218	78,19%
6	0,0500	0,0229	54,17%
7	0,0300	0,0238	20,53%
8	0,0350	0,0372	6,27%
9	0,0700	0,0379	45,92%
10	0,0600	0,0210	65,03%
11	0,0100	0,0210	109,82%
12	0,0250	0,0286	14,26%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como exposto no Gráfico 110, Gráfico 111, Gráfico 112 e na Tabela 59, a nova equação do coeficiente de amortecimento da onda de pressão apresentou resultados mais próximos aos dados observados, obedecendo o amortecimento da onda como também as máximas e mínimas de pressões em cada pico.

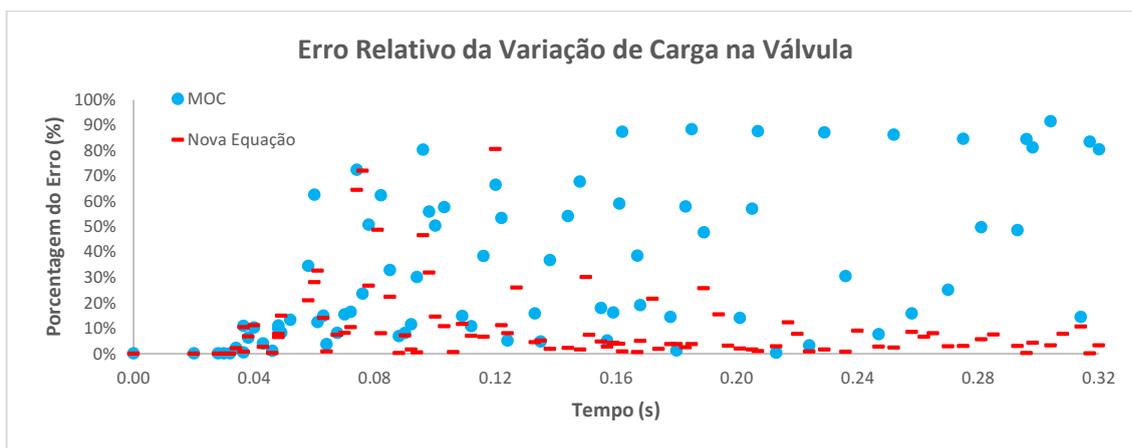
Salienta-se que neste Caso 8 analisado não houve cavitação, mesmo assim o novo método proposto juntamente com a nova equação K demonstrou resultados que corroboram uma análise a favor da segurança, mesmo que em menor escala dos experimentos com cavitação.

Gráfico 110 – Comparativo entre o MOC, Nova Equação “K” e os dados experimentais



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 111 – Erro relativo entre o MOC e a Nova Equação do coeficiente de amortecimento da onda



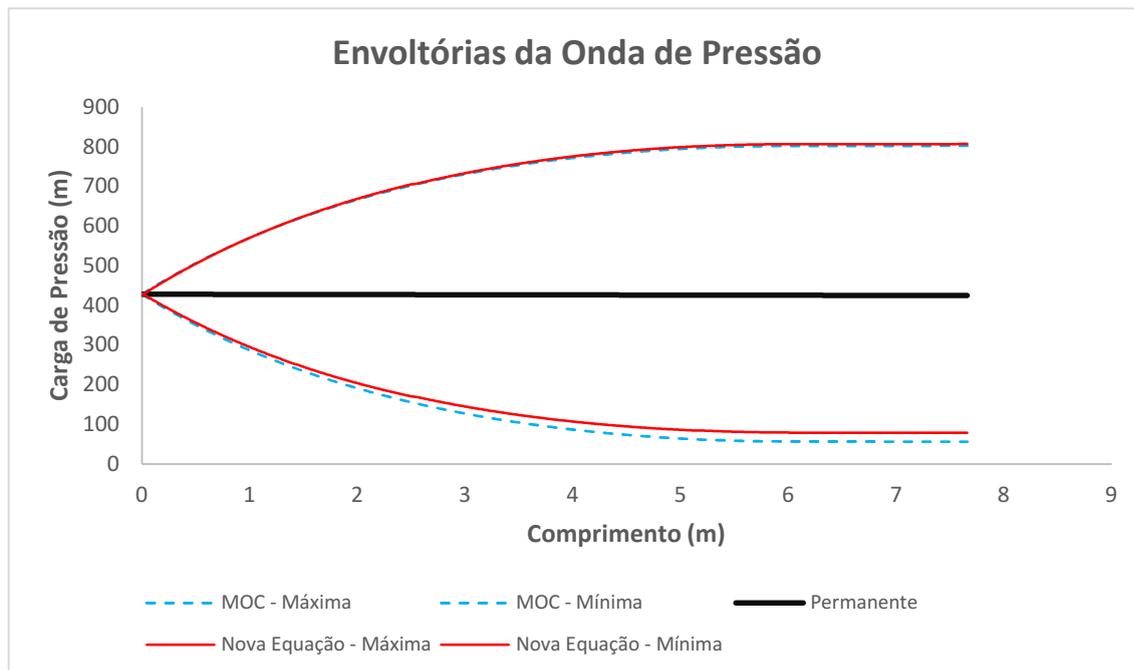
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 59 – Dados estatísticos dos métodos analisados

Método	EQM	NSE
MOC	266,648	-0,484
Nova Equação	56,028	0,934

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 112 – Envoltórias das ondas de pressão do Caso 8 no 1º cenário



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5 CONCLUSÃO

Um estudo de fluxo bifásico em métodos de sistemas hidráulicos foi realizado no presente trabalho. Desenvolveu-se um simulador na linguagem de programação JAVA, para realizações de estudos transitórios, com a consideração do fluxo bifásico, celeridade variável, amortecimento da onda variável, processo termodinâmico e fração de vazio inicial.

Para realização dos testes foram utilizados 12 experimentos, sendo 6 sem cavitação e 6 com cavitação, cuja configuração deles é reservatório – tubulação – válvula de pouca inclinação e tubulações metálicas. Esses testes foram coletados de dados adquiridos na literatura. Salienta-se que foram normalizados os tempos de simulação e as cargas de pressão de cada teste realizado, com a finalidade de padronizar a análise dos resultados.

No geral, o novo método proposto apresentou resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais. Nos Casos sem cavitação mostrou-se eficaz desde o pico de pressão até o último pico acompanhando o amortecimento da onda. Nos Casos com cavitação os resultados ratificaram o que é afirmado na literatura, pois todos os segundos picos foram maiores que os primeiros, provocado pelo colapso da separação de coluna líquida. Esse colapso provoca uma onda de sobrepressão ainda maior, sendo essencial para projetistas.

Foram realizadas visualizações gráficas a fim de corroborar para análise estatística que em alguns casos mostraram resultados contrários, pois ao se comparar com dados observados, percebe-se que a visualização gráfica pode ser realizada de forma inicial e de forma complementar, utiliza-se os métodos estatísticos.

Houve Casos (5, 7, 8 e 11) em que o segundo pico atingiu valores próximos aos dados experimentais, mas após variação da fração de vazio inicial, do coeficiente de amortecimento “K” e do tempo de fechamento da válvula, percebeu-se melhora mesmo com o pico um pouco menor. Fato é que na observação gráfica não se conseguiu definir de forma global qual melhor resultado para um método numérico.

Um fato interessante comprovado nos resultados foi que, mesmo em fluxos não cavitantes, existem vazios dentro do sistema que podem ser vapor, gás, ou seja, tudo que não é líquido. Fato que demonstra a importância desse método proposto juntamente com as novas equações da fração de vazio inicial e coeficiente de amortecimento da onda de pressão.

Os resultados analisados por meio do método do Erro Relativo serviram para identificarmos qual ponto de maior vulnerabilidade do modelo. Foi através disso que se percebe uma boa resposta do modelo para as sobrepressões, de todos os casos, e na subpressão, em

alguns casos, vale ressaltar que a subpressão obedeceu em todos os casos o princípio físico da pressão de vapor.

Para o Erro Quadrático Médio a avaliação da qualidade de uma simulação transitória agregou no sentido de obter valores absolutos para parametrizar o melhor resultado de cada caso simulado.

Por último, utilizou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe, expondo resultados que estão de acordo com a análise transitória, com índices acima 0,97 para fluxo não cavitantes e índices com média de 0,65 para fluxos cavitantes. Valores que servem como parâmetros para análise numérica do transiente hidráulico em adutoras.

Outro fato observado foi que o tempo de fechamento da válvula influenciou diretamente na intensidade do golpe de aríete, pois quanto mais rápido acontecia a interrupção do fluxo maior era a sobrepressão do primeiro pico. Fato que uma pequena variação dessa variação pode deixar as oscilações numéricas fora de fase comparando-se com os dados observados

Ademais, a variação da fração de vazio inicial denotou que quanto menor for essa variável, mais curto será o comprimento da onda, resultando em aumento no número de picos. De forma inversa, o aumento da fração de vazio provocou um alongamento do comprimento de onda, assim a quantidade de picos tornou-se inferior. Vale enfatizar que esse fato não provoca alteração no amortecimento da onda.

Para analisar a importância do atrito variável variou-se o coeficiente de amortecimento chamado K. Constatou-se que ao diminuir essa variável, o amortecimento é menor, influenciando não somente na segunda metade da simulação, mas em todos os picos de pressão. Isso mostra a importância da consideração desse método.

Nota-se que todos os métodos utilizados para compor o novo método proposto neste trabalho influenciam a qualidade dos resultados. Além disso, percebeu-se aspectos importantes como a fração de vazio inicial, mesmo em situação não cavitantes. Outro aspecto importante é que ao utilizar o processo termodinâmico politrópico pôde-se avaliar que apesar da existência de vazios, tal como o vapor ou outros elementos, a modelagem mostrou-se eficaz, obedecendo a expansão e compressão do gás ao longo de cada passo de tempo.

Para criar a equação da fração de vazio inicial e a do coeficiente de amortecimento utilizou-se os melhores resultados obtidos de cada caso experimental. Paralelamente, utilizou-se o teorema de Vaschy-Buckingham para obter os adimensionais e assim pôde-se ter ciência de quais variáveis têm maior influência no fenômeno, obtendo a **celeridade, vazão e carga**

como principais fatores que direcionam a **fração de vazio inicial**, para o **coeficiente de amortecimento** as principais variáveis são a **celeridade**, **área** da seção transversal da tubulação e a **vazão**.

A equação de potência expões números significativos que através do Atingir Meta do Excel calibrou-se as equações de modo que os resultados se aproximaram dos dados observados.

Nesse trabalho tiveram 4 contribuições principais:

1º - Novo método o cálculo do transiente hidráulico;

2º - Nova equação da fração de vazio inicial;

3º - Nova equação do coeficiente de amortecimento da onda de pressão;

4º - Novo modelo numérico implementado em linguagem de programação em JAVA dentro do sistema UFC7.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar experimentos com maiores inclinações a fim de avaliar melhor a influência do tamanho das bolhas.

- Realizar experimentos com fechamento de válvula e desligamento de bomba com o intuito de diversificar a aplicação e calibração do modelo proposto.

- Estudar modelos complementares de viscoelasticidade aplicando o modelo para tubulações plásticas e polietileno de alta densidade (PEAD).

- Estudar o comportamento dos vazios aplicando testes experimentais com tubulações de acrílico complemento as simulações com o CFD.

- Aplicar esse modelo proposto em sistema com equipamentos de proteção, tal como, ventosas, chaminé, tanque de alimentação unidirecional e bidimensional.

REFERÊNCIAS

- ABDELDAYEM, O. M.; FERRÀS, D.; VAN DER ZWAN, S.; KENNEDY, M. Analysis of unsteady friction models used in engineering software for water hammer analysis: Implementation case in Wanda. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 4, 2021. MDPI AG.
- ADAMKOWSKI, A.; LEWANDOWSKI, M. Experimental examination of unsteady friction models for transient pipe flow simulation. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, nov. 2006.
- ADAMKOWSKI, A.; LEWANDOWSKI, M. A new method for numerical prediction of liquid column separation accompanying hydraulic transients in pipelines. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 131, n. 7, p. 0713021–07130211, 2009.
- ADAMKOWSKI, A.; LEWANDOWSKI, M. Investigation of Hydraulic Transients in a Pipeline with Column Separation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 11, p. 935–944, 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- ADAMKOWSKI, A.; LEWANDOWSKI, M. Consideration of the cavitation characteristics of shut-off valves in numerical modelling of hydraulic transients in pipelines with column separation. *Procedia Engineering. Anais...* v. 70, p.1027–1036, 2014. Elsevier Ltd.
- ALEXANDROU, A.; WYLIE, E. B. Thermodynamic analysis of momentum-driven cavitation. **Proceedings of the 5th International Conference on Pressure Surges**, p. 149–155, 1986.
- ALMEIDA, A. B. Cavitation and water-column separation by the method of characteristics. **Proceedings of the 6th International Symposium on Water Column Separation, IAHR, Gloucester, UK**, 1983.
- ARAÚJO PAIVA, B. **PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MODELO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA CAVITAÇÃO RESULTANTE DO GOLPE DE ARIETE EM ADUTORAS**. FORTALEZA, 2019.
- ARAÚJO PAIVA, B.; DE CASTRO SANDERS NETO, V.; COSTA BARBOSA, J. M.; HOLANDA DE CASTRO, M. A. Modelagem computacional do golpe de aríete em adutoras considerando a cavitação no fluido com a fração de vazio. **Revista DAE**, v. 69, n. 233, p. 217–228, 2021. Revista DAE.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. *Manual de Hidráulica*. , 2018.
- BAKARJI, J. ET AL. Dimensionally consistent learning with Buckingham pi. **Nature Computational Science**, p. 1–11, 2022.
- BARBOSA, J. M. C. **MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM VENTOSAS DE TRÍPLICE FUNÇÃO E NON SLAM CONSIDERANDO AS CURVAS DE ADMISSÃO E EXPULSÃO DE AR**. 2015.

BERGANT, A.; KARADŽIĆ, U.; TIJSSELING, A. Developments in multiple-valve pipeline column separation control. *Journal of Physics: Conference Series. Anais...* . v. 813, 2017. Institute of Physics Publishing.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R. **PIPELINE COLUMN SEPARATION FLOW REGIMES**. 1999.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; SIJAMHODZIC, E. **Water Hammer Analysis of Pumping Systems for Control of Water in Underground Mines**. 1991.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; TIJSSELING, A. S. Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures*, v. 22, n. 2, p. 135–171, 2006. Academic Press.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; VÍTKOVSKÝ, J. Developments in unsteady pipe flow friction modelling. *Journal of Hydraulic Research*, v. 39, n. 3, p. 249–257, 2001a. International Association of Hydraulic Engineering Research.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; VÍTKOVSKÝ, J. Développements dans la modélisation de frottement en écoulement non permanente en conduite. *Journal of Hydraulic Research*, v. 39, n. 3, p. 249–257, 2001b. International Association of Hydraulic Engineering Research.

BERGANT, ANTON; SIMPSON, ANGUS R; BERGANT, A; SIMPSON, A R. **Interface model for transient cavitating flow in pipelines**. 2014.

BRERETON, G. J. **Review of recent advances in the study of unsteady turbulent internal flows**. 1995.

BRUNONE, B. B.; GOLIA, U. M.; GRECO, M. **EFFECTS OF Two-DIMENSIONALITY ON PIPE TRANSIENTS MODELING**. 1995.

BRUNONE, B.; GOLIA, U.; GRECO, M. Modelling of fast transients by numerical methods. *Conf. on Hydr. Transients With Water Column Separation*, p. 273–280, 1991a.

BRUNONE, B.; GOLIA, U.; GRECO, M. Some remarks on the momentum equation for fast transients. *Proceedings of the International Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation*, p. 201–209, 1991b.

BRUNONE, B.; GOLIA, U. M. Improvements in modelling of water hammer and cavitating flow in pipes. Experimental verification. *22nd Convegno Nazionale di Idraulica e Costuzioni Idrauliche*, v. 4, p. 147–160, 1990.

BRUNONE, B.; GRECO, M. UN MODELLO PER LA RICOSTRUZIONE DI FENOMENI DI COLPO D' ARIETE ANCHE INPRESENZA DI CAVITAZIONE - RISCONTRO SPERIMENTALE. , 1990.

BRUNONE, B.; KARNEY, B. W.; MECARELLI, M.; FERRANTE, M. **VELOCITY PROFILES AND UNSTEADY PIPE FRICTION IN TRANSIENT FLOW**. 2000.

BUGHAZEM, M. B.; ANDERSON, A. Problems with simple models for damping in unsteady flow. **BHR Group Conference Series Publicatio**, p. 537–548, 1996.

BURROWS, R.; QIU, D. Q. **Effect of air pockets on pipeline surge pressure**. 1995.

CANNIZZARO, D.; PEZZINGA, G. Energy Dissipation in Transient Gaseous Cavitation. **J. Hydraul. Eng.**, p. 724–732, 2005.

CAO, Z.; WANG, Z.; DENG, J.; GUO, X.; LU, L. Unsteady friction model modified with compression-expansion effects in transient pipe flow. **Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, v. 71, n. 2, p. 330–344, 2022. IWA Publishing.

CARSTENS, M. R.; ROLLER, J. E. Boundary-shear stress in unsteady turbulent pipe flow. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 85, p. 67–81, 1959.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. 2014.

CHAUDHRY, M. H.; BHALLAMUDI, S. M.; MARTIN, C. S.; NAGHASH, M. Analysis of Transient Pressures in Bubbly, Homogeneous, Gas-Liquid Mixtures. **Journal of Fluids Engineering**, v. 112, 1990.

CORONADO-HERNÁNDEZ, Ó. E.; DERPICH, I.; FUERTES-MIQUEL, V. S.; CORONADO-HERNÁNDEZ, J. R.; GATICA, G. Assessment of steady and unsteady friction models in the draining processes of hydraulic installations. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 14, 2021. MDPI AG.

COVAS, D. I. C. **Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modelling Special Dynamic Effects**, 2003. London, UK: Imperial College of Science, Technology and Medicine.

DAILY, J. W. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, v. 78, p. 1071–1077, 1956.

DAUDE, F.; TIJSSELING, A. S.; GALON, P. Numerical investigations of water-hammer with column-separation induced by vaporous cavitation using a one-dimensional Finite-Volume approach. **Journal of Fluids and Structures**, v. 83, p. 91–118, 2018. Academic Press.

DINH TAM, N. **FLUID TRANSIENTS IN COMPLEX SYSTEMS WITH AIR ENTRAINMENT**. 2009.

EPSTEIN, M. A simple approach to the prediction of waterhammer transients in a pipe line with entrapped air. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, n. 9, p. 2182–2188, 2008.

FERREIRA, F. E. F. R.; BARBOSA, J. M. C.; CASTRO, M. A. H. DE. Avaliação de modelos de atrito variável em transientes hidráulicos. **Revista Recursos Hídricos**, v. 36, n. 1, p. 37–46, 2015. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH).

FERREIRA, J. P.; BUTTARAZZI, N.; FERRAS, D.; COVAS, D. I. C. Effect of an entrapped air pocket on hydraulic transients in pressurized pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 59, n. 6, p. 1018–1030, 2021. Taylor and Francis Ltd.

FLORÊNCIO DA CUNHA TEIXEIRA, L.; DE CASTRO SANDERS NETO, V.; ARAÚJO PAIVA, B.; COSTA BARBOSA, J. M.; HOLANDA DE CASTRO, M. A. Efeito da entrada superior em reservatórios de jusante durante transitório hidráulico em adutoras de distribuição de água. **Revista DAE**, v. 70, n. 237, p. 6–18, 2022. Revista DAE.

FUERTES-MIQUEL, V. S.; CORONADO-HERNÁNDEZ, O. E.; IGLESIAS-REY, P. L.; MORA-MELIÁ, D. Transient phenomena during the emptying process of a single pipe with water–air interaction. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 318–326, 2019. Taylor and Francis Ltd.

FUERTES-MIQUEL, V. S.; CORONADO-HERNÁNDEZ, O. E.; MORA-MELIÁ, D.; IGLESIAS-REY, P. L. Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: a literature review. **Urban Water Journal**, 21. abr. 2019. Taylor and Francis Ltd.

G1. Barragem do Jati no Ceará. Disponível em:

<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2020/08/22/duas-mil-pessoas-sao-evacuadas-do-entorno-da-barragem-de-jati-no-ceara-apos-rompimento-de-tubulacao.ghtml>. Acesso em: 02 mai 2023.

GHIDAOU, M. S.; ASCE, M.; MANSOUR, S. Efficient Treatment of the Vardy-Brown Unsteady Shear in Pipe Transients. **J. Hydraul. Eng.**, p. 102–112, 2002.

GÜNDOĞDU, M. Y.; ÇARPINLIOĞLU, M. **Present State of Art on Pulsatile Flow Theory**. 1999.

HADJ-TAIEB, E.; LILI, T. Transient flow of homogeneous gas-liquid mixtures in pipelines. **International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow**, v. 8, n. 3, p. 350–368, 1998. Emerald Group Publishing Ltd.

HADJ-TAIEB, E.; LILI, T. **INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS THE NUMERICAL SOLUTION OF THE TRANSIENT TWO-PHASE FLOW IN RIGID PIPELINES**. 1999.

HINO, M.; SAWAMOTO, M.; TAKASU, S. Study on the transition to turbulence and frictional coefficient in an oscillatory pipe flow. **Trans. JSCE**, v. 9, p. 282–285, 1977.

HOLMBOE, E. L.; ROULEAU, W. T. The effect of viscous shear on transients in liquid lines. **Journal of Basic Engineering**, v. 89, p. 174–180, 1967.

IVLJANIN, B.; STEVANOVIC, V. D.; GAJIC, A. Water hammer with non-equilibrium gas release. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 165, p. 229–240, 2018. Elsevier Ltd.

JENSEN, R. K. **Modelling of a Two Phase Water Hammer**, 2018. Aalborg University Esbjerg.

JENSEN, R. K.; LARSEN, J. K.; LASSEN, K. L.; MANDØ, M.; ANDREASEN, A. Implementation and validation of a free open source 1D water hammer code. **Fluids**, v. 3, n. 3, 2018. MDPI AG.

JIANG, D.; REN, C.; ZHAO, T.; CAO, W. Pressure transient model of water-hydraulic pipelines with cavitation. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 3, 2018. MDPI AG.

KARADŽIĆ, U.; JANKOVIĆ, M.; STRUNJAŠ, F.; BERGANT, A. Water hammer and column separation induced by simultaneous and delayed closure of two valves. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 64, n. 9, p. 525–535, 2018. UiTM Press.

KESSAL, M.; AMAOUCHE, M. Numerical simulation of transient vaporous and gaseous cavitation in pipelines. **International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow**, v. 11, n. 2, p. 121–137, 2001.

KIM, H.; KIM, S. Two dimensional cavitation waterhammer model for a reservoir-pipeline-valve system. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 327–336, 2019. Taylor and Francis Ltd.

KOJIMA, E.; SHINADA, M.; SHINDO, K. **Fluid Transient Phenomena Accompanied with Column Separation in Fluid Power Pipeline : 1st Report, On the Horizontal Pipeline Downstream of a Valve Instantaneously Closed**. 1984.

KOT, C. A.; YOUNGDAHL, C. K. **TRANSIENT CAVITATION EFFECTS IN FLUID PIPING SYSTEMS ***. 1978.

LAI, A.; HAU, K. F.; NOGHREHKAR, R.; SWARTZ, R. **Investigation of waterhammer in piping networks with voids containing non-condensable gas**. 2000.

LAI, C. **A Study of Waterhammer Including Effect of Hydraulic Losses**. , 1961.

LAMBERT, J. P.; SIMPSON, M. F.; BERGANT, A. R. **Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow**. 2000.

LAUHLAN, C. S.; ESCARAMEIA, M.; BURROWS, M. R.; GAHAN, C. **Air in Pipelines A Literature Review**. 2005.

LEE, N. H. **Effect of Pressurization and Expulsion of Entrapped Air in Pipelines**. 2005.

LEE, S.; LOW, H. T.; NGUYEN, T.; RONG, W.; NEO, A. **Experimental Study of Check Valves in Pumping Systems with Air Entrainment**. 2008.

LEON, A. S.; GHIDAOU, M. S.; SCHMIDT, A. R.; GARCIA, M. H. A robust two-equation model for transient-mixed flows. **Journal of Hydraulic Research**, v. 48, n. 1 EXTRA ISSUE, p. 44–56, 2010.

LIU, J. Numerical properties of the discrete gas cavity model for transients. **J. Fluids Eng**, v. 122, p. 636–639, 2000.

MAGALHÃES, C. A. DE C.; ARENS, H. G.; PORTO, R. DE M. **Determinação Experimental do Expoente Politrópico em Sistemas Hidráulicos-Escala Piloto**. 2003.

MALEKPOUR, A.; KARNEY, B. W. Profile-Induced Column Separation and Rejoining during Rapid Pipeline Filling. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 11, 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE).

MARTIN, C. S.; SCHOLAR, R. F.; PROFESSOR, G. **Status of Fluid Transients in Western Europe and the United Kingdom. Report on Laboratory Visits by Freeman Scholar**. 1973.

MARTINS, N. M. C.; CARRIÇO, N. J. G.; RAMOS, H. M.; COVAS, D. I. C. Velocity-distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis. **Computers and Fluids**, v. 105, p. 218–230, 2014. Elsevier Ltd.

MIJI CHERIAN, R.; SAJIKUMAR, N.; K.S, S. Effect of valve closure time on transient cavitating flow through piping systems. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 28, n. S1, p. 180–187, 2022. Taylor and Francis Ltd.

MIWA, T.; SANO, M.; YAMAMOTO, K. Experimental studies on water hammer phenomenon including vapour column separation. **Water Supply**, v. 8, p. 430–438, 1990.

NETTO, J. M. D. A.; FERNÁNDEZ, M. F. Y. **Manual de hidráulica**. 2015.

NOROOZ, R.; SHAMLOO, H. **Quasi-Two-Dimensional Discrete Vapour Cavity Model**. 2016.

PEARSALL, I. S. **THE VELOCITY OF WATER HAMMER WAVES**. , 1965.

PEZZINGA, G.; SANTORO, V. C. Unitary Framework for Hydraulic Mathematical Models of Transient Cavitation in Pipes: Numerical Analysis of 1D and 2D Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 143, n. 12, 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE).

PROVOOST, G. A. Investigation into cavitation in a prototype pipeline caused by water hammer. **NASA STI/Recon Technical Report N**, v. 78, 1976.

PROVOOST, G. A.; WYLIE, E. Discrete gas model to represent distributed free gas in liquids. **Presented at 5th Intern. Symp. on Water Column Separation**, p. 28–30, 1982.

QUILODRÁN, J. T. **Water Hammer and Column Separation due to Pump Shutdown. Golpe de Ariete y Separación de la Columna Debido al Apagado de la Bomba**. 2018a.

QUILODRÁN, J. T. Análisis implícito del flujo transitorio de agua con aire disuelto. **Ingeniería del agua**, v. 22, n. 1, p. 27, 2018b. Universitat Politecnica de Valencia.

RKIBI, O.; ACHAK, N.; CHERRAJ, M.; BAHRAR, B. Numerical Modelling of Cavitation in an Elastic Pipe. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 97, n. 1, p. 13–19, 2022. Penerbit Akademia Baru.

RODRIGUES, C. **Artigos Referenciais teóricos sobre o uso de e-book em bibliotecas públicas brasileiras.** 2014.

RUBEN, N.; VENKATARATHNAM, E. Mathematical simulation of cavitation with column separation in pressurized pump pipeline systems. **Lecture Notes in Mechanical Engineering**. p.393–398, 2019. Pleiades journals.

SADAFI, M.; RIASI, A.; NOURBAKHSH, S. A. Cavitating flow during water hammer using a generalized interface vaporous cavitation model. **Journal of Fluids and Structures**, v. 34, p. 190–201, 2012.

SAEMI, S.; RAISEE, M.; CERVANTES, M. J.; NOURBAKHSH, A. Computation of two- and three-dimensional water hammer flows. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 386–404, 2019. Taylor and Francis Ltd.

SAFWAT, H. H.; VAN DEN POLDER, J. **Experimental and Analytic Data Correlation Study of Water Column Separation.** 1973.

VAN DE SANDE, E.; BELDE, A. P. The collapse of vaporous cavities. An experimental study. **Proceedings of the 5th International Round Table on Hydraulic Transients with Water Column Separation, IAHR, Obernach, Germany,** 1981.

SANDERS NETO, V. DE C.; COSTA BARBOSA, J. M.; HOLANDA DE CASTRO, M. A. Análise do efeito do golpe de aríete numa adutora com uma junção de ramificação. **Revista DAE**, v. 68, n. 225, p. 135–148, 2020. Revista DAE.

SANTORO, V. C.; CRIMÌ, ; ; A; PEZZINGA, G. Developments and Limits of Discrete Vapor Cavity Models of Transient Cavitating Pipe Flow: 1D and 2D Flow Numerical Analysis. , 2018.

SARZEDAS, G. L. **Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água da Região Metropolitana de São Paulo.** São Paulo, 2009.

SHU, J. J. A finite element model and electronic analogue of pipeline pressure transients with frequency-dependent friction. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 125, n. 1, p. 194–199, 2003a.

SHU, J. J. Modelling vaporous cavitation on fluid transients. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 80, n. 3, p. 187–195, 2003b. Elsevier.

SHUY, E. B.; APELT, C. J. Friction effects in unsteady pipe flows. **Proceedings of the 4th International Conference on Pressure Surges, BHRA, Bath, England**, p. 147–164, 1983.

SIEMONS, J. The phenomenon of cavitation in a horizontal pipe-line due to a sudden pump-failure. **Journal of Hydraulic Research**, v. 5, n. 2, p. 135–152, 1967.

SIMPSON, A. R. **LARGE WATER HAMMER PRESSURES DUE TO COLUMN SEPARATION IN SLOPING PIPES.** 1986.

SIMPSON, A. R.; BERGANT, A. **NUMERICAL COMPARISON OF PIPE-COLUMN-SEPARATION MODELS**. 1994.

SINGH, J.; SINGH, R.; SINGH, H. **Surface roughness prediction using Buckingham's Pi-theorem for SS-316L hip implant prepared as rapid investment casting**. 2018.

SOARES, A. K. **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório**. 2007.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; CARRIO, N. J. G. Transient vaporous cavitation in viscoelastic pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 2, p. 228–235, 2012.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; RAMOS, H. M.; FERNANDA, L.; REIS, R. **Unsteady Flow with Cavitation in Viscoelastic Pipes**. 2009.

SOARES, A. K.; MARTINS, N.; COVAS, D. I. C. Investigation of transient vaporous cavitation: Experimental and numerical analyses. *Procedia Engineering*. **Anais...** . v. 119, p.235–242, 2015. Elsevier Ltd.

SOARES, A. K.; MARTINS, N. M. C.; COVAS, D. I. C. Transient vaporous cavitation in a horizontal copper pipe. **Journal of Hydraulic Research**, v. 55, n. 5, p. 731–736, 2017. Taylor and Francis Ltd.

SONG, H. **Engineering fluid mechanics**. Singapore: Springer, 2018.

STECKI, J. S.; DAVIS, D. C. **Fluid transmission lines-dis tributed parameter models Part 1 : a review of the state of the art**. 1986.

STREETER, V. L. **Transient Cavitating Pipe Flow**. 1983.

STREETER, V. L.; WYLIE, B. E.; KW, B. **Mecánica de fluidos**. 2000.

TANAHASHI, T.; KASAHARA, E. **Comparisons between Experimental and Theoretical Results of the Waterhammer with Water Column Separations**. 1970.

TANG, X.; DUAN, X.; GAO, H.; LI, X.; SHI, X. CFD investigations of transient cavitation flows in pipeline based on weakly-compressible model. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 2, 2020. MDPI AG.

THIBESSARD, G. La simulation du coup de bélier sur ordinateur numérique. **Proceedings of the 9th IAHR Convention**, p. 881–890, 1961.

TIJSSELING, A. S.; VARDY, A. E.; FAN, D. **FLUID-STRUCTURE INTERACTION AND CAVITATION IN A SINGLE-ELBOW PIPE SYSTEM**. 1996.

TRAUDT, T.; BOMBARDIERI, C.; MANFLETTI, C. Influences on water-hammer wave shape: an experimental study. **CEAS Space Journal**, v. 8, n. 3, p. 215–227, 2016. Springer-Verlag Wien.

TRIKHA, A. K. **An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow**. 1975.

URBANOWICZ, K.; BERGANT, A.; DUAN, H. F. Simulation of unsteady flow with cavitation in plastic pipes using the discrete bubble cavity and Adamkowski models. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...** . v. 710, 2019. IOP Publishing Ltd.

URBANOWICZ, K.; ZARZYCKI, Z. **NEW EFFICIENT APPROXIMATION OF WEIGHTING FUNCTIONS FOR SIMULATIONS OF UNSTEADY FRICTION LOSSES IN LIQUID PIPE FLOW**. 2012a.

URBANOWICZ, K.; ZARZYCKI, Z. **CONVOLUTION INTEGRAL IN TRANSIENT PIPE FLOW**. 2012b.

VARDY, A.; BROWN, J. Efficient Approximation of Unsteady Friction Weighting Functions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 130, n. 11, p. 1097–1107, 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE).

VARDY, A. E. Unsteady Airflows in Rapid Transit Systems: Part 1: Measurements on the London Transport Victoria Line. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 194, p. 341–348, 1980.

VARDY, A. E.; ASCE, F.; BROWN, J. M. B. Approximation of Turbulent Wall Shear Stresses in Highly Transient Pipe Flows. **J. Hydraul. Eng.**, p. 1219–1228, 2007.

VARDY, A. E.; BROWN, J. M. B. Le frottement dans un écoulement turbulent instationnaire en conduite lisse. **Journal of Hydraulic Research**, v. 33, n. 4, p. 435–456, 1995.

VARDY, A. E.; BROWN, J. M. B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows. **Journal of Sound and Vibration**, v. 259, n. 5, p. 1011–1036, 2003. Academic Press.

VARDY, A. E.; KUO-LUN, H.; BROWN, J. M. B. Une fonction de base pour une formulation faible du frottement dans un écoulement turbulent instationnaire en conduite. **Journal of Hydraulic Research**, v. 31, n. 4, p. 533–548, 1993.

VITKOVSKY, J.; LAMBERT, J. P.; SIMPSON, M. F.; BERGANT, A. R. **Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow**. 2000.

VÍTKOVSKÝ, J. P.; BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; ASCE, M.; LAMBERT, M. F. Systematic Evaluation of One-Dimensional Unsteady Friction Models in Simple Pipelines. **J. Hydraul. Eng.**, p. 696–708, 2006.

VÍTKOVSKÝ, J.; STEPHENS, M.; BERGANT, A.; et al. **Efficient and accurate calculation of Zielke and Vardy-Brown unsteady friction in pipe transients**. 2004.

VRIES, A. H. Cavitation door waterslag in horizontale leidingen met enige hoge punten. **Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands**, 1973.

WARDA, H. A.; WAHBA, E. M.; EL-DIN, M. S. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of liquid column separation in pipe transients. **Alexandria Engineering Journal**, v. 59, n. 5, p. 3451–3462, 2020. Elsevier B.V.

WEYLER, M. E.; STREETER, V. L.; LARSEN, P. S. **An Investigation of the Effect of Cavitation Bubbles on the Momentum Loss in Transient Pipe Flow**. 1971.

WHITEMAN, K. J.; PEARSALL, I. S. Reflux valve and surge tests at Kingston pumping station. **British Hydromechanics Research Association**, 1959.

WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S.; BOULOS, P. F.; KARNEY, B. W.; MCPHERSON, D. L. Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. **Journal / American Water Works Association**, 2005. American Water Works Association.

WYLIE, E. B. Free air in liquid transient flow. **Proceedings of the 3rd. International Conference on Pressure Surges, BHRA, Cantenbury, UK**, p. 27–42, 1980.

WYLIE, E. B. **Simulation of Vaporous and Gaseous Cavitation**. 1984.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.; SUO, L. **Fluid Trasients in Systems**. 1993.

ZHOU, L.; CAO, Y.; KARNEY, B.; et al. Unsteady friction in transient vertical-pipe flow with trapped air. **Journal of Hydraulic Research**, v. 59, n. 5, p. 820–834, 2021. Taylor and Francis Ltd.

ZHOU, L.; LI, Y.; ZHAO, YAN; OU, C.; ZHAO, YUE. An accurate and efficient scheme involving unsteady friction for transient pipe flow. **Journal of Hydroinformatics**, v. 23, n. 4, p. 879–896, 2021. IWA Publishing.

ZHOU, L.; WANG, H.; BERGANT, A.; et al. Godunov-Type Solutions with Discrete Gas Cavity Model for Transient Cavitating Pipe Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 5, 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE).

ZHU, Y.; DUAN, H.; LI, F.; et al. Experimental and numerical study on transient air–water mixing flows in viscoelastic pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 56, n. 6, p. 877–887, 2018. Taylor and Francis Ltd.

ZIELKE, W. **Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow**. 1968.

APÊNDICE A - PLANILHA PARA O CÁLCULO DA CAVITAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO

Na etapa inicial da pesquisa, realizou-se a análise no modelo de cavitação em regime transitório com atrito variável do modelo de Brunone, utilizando-se para isso o *software* Excel.

Esta análise foi realizada para um sistema onde o primeiro nó computacional é um reservatório, o último nó é a válvula, os nós intermediários são as junções; a tubulação é horizontal e a cota dos nós é zero.

Na planilha do Excel, é exibida a aba dos dados de entrada juntamente com os cálculos iniciais (Figura A 1)

Figura A 1 – Captura de tela da base de dados da análise inicial para modelagem numérica

Trecho	Cota Montante (m)	Cota Jusante (m)	Comprimento (m)	DN (mm)	DI (mm)	Espessura (mm)	Rugosidade (mm)	Fator de Atrito - Regime Permanente	Pressão Máxima de Serviço (mca)	Módulo de Elasticidade do Material (GPa)	Coefficiente de Poisson do material
1	0.00	0.00	8.00	38	26	6	0.10	0.0205	100	1.20E+11	0.38
2	0.00	0.00	13.10	38	26	6	0.10	0.0205	100	1.20E+11	0.38
3	0.00	0.00	9.50	38	26	6	0.10	0.0205	100	1.20E+11	0.38

Tipo de Ancoragem	Celeridade inicial (m/s)	Δt	Nº de Subtrechos	Nº de Subtrechos Corrigidos	Δx Corrigido por Trecho	Nº de Seções por Trecho	Critério de Estabilidade de Courant	ΔH por Trecho Δx	A (m ²)	B	R
1	715	0.0037	3.0000	3	2.6667	4	1	0.622869445	0.000530929	137277.8463	380169.3390
1	715	0.0037	4.9125	4	3.2750	5	0.814249364	0.764961537	0.000530929	137277.8463	466895.4695
1	715	0.0037	3.5625	3	3.1667	4	0.842105263	0.739657466	0.000530929	137277.8463	451451.0901

Vazão (m ³ /s)	0.00128
Carga Montante (mca)	18.46
Diâmetro Interno da Válvula (mm)	26
Tempo de Início de Fech. da Válvula (s)	0.53
Tempo de Fechamento da Válvula (s)	0.35
Duração da simulação (s)	2.4
Divisões do menor trecho	3
Densidade do fluido (kg/m ³)	999
Módulo de elasticidade (Pa)	219000000
Viscosidade dinâmica (kg/s.m)	0.001
Aceleração da Gravidade (m/s ²)	9.81
Menor trecho	8
Δx	2.66666667
ϵ_0	0.00115
n	1.34
Pv_{ABS}	0.33
cl	1
Re	62.6825622
C^*	0.090156415
$K3$	0.1
n	1.34
S	-1.5
Kv	33

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Cada trecho da tubulação foi dividido em 3 seções computacionais, resultando em 4 nós. O nó inicial representa o reservatório e o quarto nó representa a válvula (Figura A 1, Figura A 2, Figura A 3, Figura A 4, Figura A 5, Figura A 6, Figura A 7, Figura A 8 Figura A 9).

Figura A 2 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 1)

QRES	Q2	Q3	Q4		HRES	H2	H3	H4
0.00128000	0.00128000	0.00128000	0.00128000		18.46	17.83713	17.21426	16.59139
0.00128000	0.00128000	0.00128000	0.00128000		18.46	17.83713	17.21426	16.59139
0.00128000	0.00128000	0.00128000	0.00127911		18.46	17.83713	17.21426	16.66246
0.00128000	0.00128000	0.00127913	0.00127822		18.46	17.83713	17.28538	16.72748
0.00128000	0.00127914	0.00127824	0.00127742		18.46	17.90835	17.35064	16.80055

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura A 3 mostra variáveis de caráter positivo e negativo da malha do Método das Características. No passo de tempo 0, o CP = 0 e o CN = 0, por isso aparece hachurada.

Figura A 3 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 2)

CP,RES	CP,2	CP,3	CP,4		CN,RES	CN,2	CN,3	CN,4
0	123.6861	121.3647	119.0039		-89.0501	-88.0118	-86.9362	-85.82115
0	123.6861	121.3647	119.0039		-89.0501	-88.0118	-86.9362	-85.67902
0	123.6861	121.3647	119.3466		-89.0501	-88.0118	-86.7939	-85.89168
0	123.6861	121.6996	119.6751		-89.0501	-87.8694	-86.9983	-86.07395

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura A 4 expõe as variáveis da fração de vazio e da celeridade variável, com o passo de tempo 0 marcado pela faixa mais escura, pois representa uma condição permanente.

Figura A 4 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 3)

εRES	ε2	ε3	ε4		aRES	a2	a3	a4
0.001	0.001150000	0.001150000	0.001		437.47	430.71	423.80	416.72
0.001	0.001150000	0.001150000	0.001		437.47	430.71	423.80	416.72
0.001	0.001150000	0.001146467	0.001		437.47	430.71	423.80	418.15
0.001	0.001146585	0.001143247	0.001		437.47	430.71	425.19	419.45

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já na Figura A 5 têm-se a variável B e o tempo de cada seção computacional, lembrando que nesse método utiliza-se o menor tempo da seção na tubulação.

Figura A 5 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 4)

Variável adotada pelo MOC				Variação do tempo por nó					
BRES	B2	B3	B4		Δt_{RES}	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_{MENOR}
83992.29	82694.49	81367.51	80009.8		0.006096	0.006191	0.006292	0.006399	0.006096
83992.29	82694.49	81367.51	80009.8		0.006096	0.006191	0.006292	0.006399	0.006096
83992.29	82694.49	81367.51	80283.12		0.006096	0.006191	0.006292	0.006377	0.006096
83992.29	82694.49	81634.76	80532.87		0.006096	0.006191	0.006272	0.006358	0.006096

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura A 6 tem-se as variáveis de vazão sobre o tempo e na Figura A 7 tem-se as variáveis de vazão sobre o espaço, sendo que ambas são relacionadas ao cálculo do atrito variável de Brunone.

Figura A 6 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 5)

Vazão sobre o tempo na malha positiva				Vazão sobre o tempo na malha negativa				
QRES+/T	Q2+/T	Q3+/T	Q4+/T		QRES-/T	Q2-/T	Q3-/T	Q4-/T
0	0	0	0		0	0	0	0
0	3.56E-17	0	3.56E-17		0	3.56E-17	3.56E-17	-0.0003
0	-7.1E-17	3.56E-17	0		3.56E-17	0	-0.00015	-0.00015
0	1.07E-16	-3.6E-17	-0.00014		-3.6E-17	-0.00014	-0.00015	-0.00013

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura A 7 – Aba relativa ao trecho 1 da planilha para a modelagem da cavitação (Parte 6)

Vazão sobre o espaço na malha positiva				Vazão sobre o espaço na malha negativa				
QRES+/X	Q2+/X	Q3+/X	Q4+/X		QRES-/X	Q2-/X	Q3-/X	Q4-/X
0	0	0	0		0	0	0	0
0	-8.1E-20	8.13E-20	0		-8.1E-20	8.13E-20	0	-6.8E-07
0	1.63E-19	0	-3.3E-07		1.63E-19	0	-3.3E-07	-6.8E-07
0	-1.6E-19	-3.3E-07	-3.4E-07		-1.6E-19	-3.3E-07	-3.4E-07	-6.5E-07

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Neste trabalho, como mencionado no tópico 2.5, o J representa o termo de atrito e, consequentemente, a variável JQ evidencia o atrito semiestacionário (Figura A 8).

Figura A 8 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 7)

JQ+RES	JQ+2	JQ+3	JQ+4		JQ-RES	JQ-2	JQ-3	JQ-4
0	0.622869	0.622869	0.622869		0.622869	0.622869	0.622869	0.622869
0	0.622869	0.622869	0.622869		0.622869	0.622869	0.622869	0.621112
0	0.622869	0.622869	0.622869		0.622869	0.622869	0.622005	0.620231
0	0.622869	0.622869	0.622019		0.622869	0.622019	0.621134	0.619453

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O termo JU mostrado na Figura A 9, pode ser representado pelo método da aceleração instantânea. Vale lembrar que no tópico 2.5 tem uma explicação mais detalhada sobre o método, que no decorrer do trabalho, avalia-se qual valor é mais bem aplicado para o modelo.

Figura A 9 – Captura de tela realizada sobre parte da planilha referente ao trecho 1 da adutora, para a modelagem da cavitação (Parte 8)

JU+RES	JU+2	JU+3	JU+4		JU-RES	JU-2	JU-3	JU-4
0	0	0	0		0	0	0	0
0	3.61E-15	-1.8E-15	1.82E-15		1.82E-15	2.81E-17	1.82E-15	-0.00071977
0	-7.2E-15	1.82E-15	0.007131		-1.8E-15	0	-0.00023	0.007043036
0	9.05E-15	0.007135	-1.3E-05		1.82E-15	-0.00011	-9.6E-05	0.007209778

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).