



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**ENGENHARIA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**

**JOSÉ GESCILAM SOUSA MOTA UCHÔA**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO FLUXO INDUZIDO POR VAZAMENTOS DE  
ÁGUA EM TUBULAÇÕES**

**FORTALEZA**  
**2022**

JOSÉ GESCILAM SOUSA MOTA UCHÔA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO FLUXO INDUZIDO POR VAZAMENTOS DE  
ÁGUA EM TUBULAÇÕES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD

FORTALEZA

2022

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)

---

U19s Uchôa, José Gescilam Sousa Mota.  
Simulação computacional do fluxo induzido por vazamentos de água em tubulações / José Gescilam  
Sousa Mota Uchôa. – 2022.  
65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Sistema de distribuição de água. 2. Vazamentos. 3. Coeficiente de descarga. 4. CFD. I. Título.  
CDD 620

---

JOSÉ GESCILAM SOUSA MOTA UCHÔA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO FLUXO INDUZIDO POR VAZAMENTOS DE  
ÁGUA EM TUBULAÇÕES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em 02 / 02 / 2022

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD (Membro interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Engº. Liduino de Albuquerque Marques (Membro externo)  
Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE)

## AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que lutam pela ciência e pelas políticas de inclusão social. A CAPES através do BRAFITEC e CNPq, a UFC através da PRAE, PIBID e PIBIC pelos auxílios e financiamentos que possibilitaram a minha permanência no ensino superior e a presente pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD pela paciência, generosidade e ternura ao longo de toda a orientação. Obrigado pela inspiração cotidiana, pela animação a cada novo projeto e aventura, pela positividade nos momentos de intempéries. O senhor é o exemplo de Professor que eu sonho me tornar.

Ao corpo docente da UFC e École Centrale de Lille, em especial, a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Áurea Silva de Holanda pela orientação e carinho ao longo da minha graduação, a Prof.<sup>a</sup> Veronica Teixeira Franco Castelo Branco, PhD por compartilhar a paixão pelo método científico e ao Prof. Armand Toguyeni, PhD pela confiança e positividade durante minha estadia na França.

A toda comunidade do PRECE pelo apoio incontestável e carinho ao longo de todo o meu percurso escolar. Obrigado aos inúmeros Professores e amigos dessa família, em especial ao Prof. Dr. Manoel Andrade Neto e Dr. Elton Luz Lopes pela luta continua na construção de líderes solidários.

Aos amigos pelo apoio, sugestões, críticas e reflexões. Em especial, aos amigos pesquisadores pela paciência de escutar minhas dificuldades e por tonar essa caminhada mais leve.

Aos meus Pais, José Mota Uchôa e Clotilde Ramos de Sousa, pelos sacrifícios para que eu e meu irmão tivéssemos acesso a melhor educação disponível. Obrigado pelo encorajamento e por acreditarem nos nossos sonhos.

Ao meu avô, Francisco Inácio Uchôa (*in memoriam*), por repedir incansavelmente que um dia eu me tornaria doutor.

“O sertanejo é, antes de tudo, um forte.”

(Euclides da Cunha)

## RESUMO

O relatório do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) de 2021 indica mudanças na quantidade e sazonalidade da água devido às mudanças climáticas e reporta que aproximadamente 80% da população mundial já sofre de altos níveis de ameaça à segurança hídrica. Dada a vulnerabilidade dos recursos hídricos e o papel das mudanças climáticas na intensificação dos impactos adversos nas sociedades humanas, pode-se afirmar que existe uma grande demanda para a realização de estudos acerca da detecção e quantificação de perdas em sistemas de adução e distribuição de água. Nesse contexto, o objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o impacto de fatores geométricos, hidráulicos e hidrodinâmicos em vazamentos de água em tubulações de aço por meio da fluidodinâmica computacional (CFD). Para tanto, utilizou-se o software ANSYS FLUENT. A calibração e validação dos modelos matemáticos testados foi realizada com base em dados experimentais considerando diferentes condições de contorno de pressão e velocidade, com tubos de três diâmetros (DN25, DN 50 e DN 100). Os resultados mostraram que os modelos de turbulência RANS ( $k-\epsilon$  e  $k-\omega$  SST) podem reproduzir bem o fenômeno de vazamentos em tubulações de água, apresentado um desvio máximo de 8% em relação ao coeficiente de descarga ( $C_d$ ) obtido experimentalmente. Os resultados indicaram ainda que a variação do  $C_d$  como uma função do diâmetro e da forma dos orifícios pode ser atribuída ao efeito da curvatura do tubo na convergência do fluxo através do orifício. Correlações empíricas e provindas das simulações explicando o  $C_d$  através de parâmetros adimensionais ( $d/D$ ,  $\Delta H/D$  e  $Re$ ) apresentaram alto valor de R-quadrado (95,01% e 79,08%, respectivamente). A aplicação dessas correlações em cinco adutoras do Ceará indicou que o uso tradicional do  $C_d$  como uma constante pode induzir a erros de quantificação das perdas, e conseqüentemente a equívocos nas tomadas de decisão.

**Palavras-Chave:** sistema de distribuição de água; vazamentos; coeficiente de descarga; CFD;

## ABSTRACT

The 2021 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report indicates changes in water quantity and seasonality due to climate change and reports that approximately 80% of the world's population already suffers from high levels of threat to water security. Given the vulnerability of water resources and the role of climate change in intensifying adverse impacts on human societies, it can be said that there is a great demand for studies on the detection and quantification of losses in water supply and distribution systems. In this context, the general objective of this research was to evaluate the impact of geometric, hydraulic, and hydrodynamic factors on water leaks in pipes through computational fluid dynamics (CFD). For that, the ANSYS FLUENT software was used. The calibration and validation of the tested mathematical models were performed based on experimental data considering different pressure and velocity boundary conditions, with pipes of three diameters (DN25, DN 50 and DN 100). The results showed that the RANS turbulence models ( $k-\epsilon$  e  $k-\omega$  SST) can reproduce well the phenomenon of leaks in water pipes, presenting a maximum deviation of 8% compared to the discharge coefficient ( $C_d$ ) obtained experimentally. The results further indicated that the variation of  $C_d$  as a function of orifice diameter and shape can be attributed to the effect of tube curvature on the flow convergence through the orifice. Empirical correlations and those from simulations explaining  $C_d$  through dimensionless coefficients ( $d/D$ ,  $\Delta H/D$ ,  $Re$ ) presented a high R-squared value (95.01% and 79.08%, respectively). The application of these correlations in five water mains in Ceará indicated that the traditional use of  $C_d$  as a constant can lead to errors in the quantification of losses, and consequently mistakes in decision making.

**Keywords:** water distribution system; pipe leakage; discharge coefficient; CFD.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Sumário dos filtros utilizados na plataforma <i>Web of Science</i> .....   | 19 |
| <b>Figura 2</b> - Rede de coocorrência de palavras-chaves entre os trabalhos obtidos pelo 1º Filtro .....  | 20 |
| <b>Figura 3</b> - Rede de coocorrência das 20 palavras-chaves mais citadas entre os trabalhos obtidos pelo 1º Filtro.....  | 21 |
| <b>Figura 4</b> - Número de publicações por país até o ano 2000 a partir do resultado do 1º Filtro. ....   | 22 |
| <b>Figura 5</b> - Número de publicações por país até o ano 2010 a partir do resultado do 1º Filtro. ....   | 22 |
| <b>Figura 6</b> - Número de publicações por país até o ano 2021 a partir do resultado do 1º Filtro. ....   | 23 |
| <b>Figura 7</b> - Número de publicações nos 10 países com mais publicação no tema por década e até o ano de 2021 .....   | 24 |
| <b>Figura 8</b> - Rede de coocorrência das principais palavras-chaves entre os trabalhos obtidos pelo 2º Filtro.....   | 24 |
| <b>Figura 9</b> - Rede de coautoria dos principais autores obtidos pelo 2º Filtro .....  | 25 |
| <b>Figura 10</b> - Condições de vazamento em tubulações com diferentes curvaturas.....   | 31 |
| <b>Figura 11</b> - Sumário dos passos chaves de uma modelagem CFD.....   | 37 |
| <b>Figura 12</b> - Geometria da tubulação DN 25 com orifício circular de 3mm de diâmetro com comprimento total de 60 cm (30 cm a montante e a jusante do orifício) .....   | 38 |
| <b>Figura 13</b> - Secção longitudinal (a) e circunferencial (b) da geometria DN 100: aproximadamente 512.000 elementos lançados na malha do ANSYS FLUENT.....   | 40 |
| <b>Figura 14</b> - Resumo das etapas de verificação e validação em uma modelagem CFD.....  | 44 |
| <b>Figura 15</b> - MDE do Estado do Ceará com as principais adutoras da COGERH destacado em vermelho as cinco adutoras utilizadas neste trabalho.....  | 47 |
| <b>Figura 16</b> - Exemplo de elevação da adutora de Lavras Da Mangabeira extraída com auxílio do software Global Mapper. ....   | 48 |
| <b>Figura 17</b> - Comparação entre o modelo de turbulência k- $\epsilon$ e modelo de turbulência k- $\omega$ SST através do $C_d$ simulado e experimental para os casos com orifício circular de 6 mm em função do diâmetro da tubulação..... | 50 |
| <b>Figura 18</b> - Comparação do desempenho do modelo de turbulência k- $\epsilon$ através do $C_d$ simulado e experimental entre os casos com orifício circular de 3mm (O3) e de 6mm (O6) em função do  |    |

|   |    |
|---|----|
| diâmetro da tubulação.....  | 50 |
| <b>Figura 19</b> - Simulação de $\epsilon$ na seção circunferência e longitudinal do orifício nas geometrias com orifício circular de 6 mm para carga em torno de 4 m.c.a em função do diâmetro: (a) DN 25; (b) DN 50; (c) DN 100 ..... | 51 |
| <b>Figura 20</b> - Linhas de corrente em direção ao orifício nas geometrias com orifício circular de 6 mm para carga em torno de 4 m.c.a em função do diâmetro.....   | 53 |
| <b>Figura 21</b> - Comparação entre as correlações Eq. 25 (EXP) e Eq. 25 (CFD) do tipo $C_d = A \cdot dDB \cdot \Delta HDC \cdot ReD$ .....   | 56 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> - Resumo das principais contribuições sobre o estudo do $C_d$ em tubulações de água com o tipo de estudo, os fatores que o influenciam e sua faixa de variação. ....     | 26 |
| <b>Tabela 2</b> - Resumo das principais hipóteses consideradas sobre o $C_d$ nos principais trabalhos de vazamentos de sistemas de distribuição de água .....                            | 26 |
| <b>Tabela 3</b> - Resumo do coeficiente exponencial de vazamento da Equação 02 para diferentes materiais e formatos de orifício .....  | 29 |
| <b>Tabela 4</b> - Resumo do $C_d$ para vazamentos em tubulações a depende do meio externo e do formato do orifício.....  | 30 |
| <b>Tabela 5</b> - Resumo das condições de contorno escolhidas por localização .....  | 38 |
| <b>Tabela 6</b> - Principais parâmetros de qualidade de malha analisados neste trabalho.....   | 39 |
| <b>Tabela 7</b> - Parâmetros gerais do CFD usados neste trabalho.....  | 41 |
| <b>Tabela 8</b> - Principais parâmetros dos principais modelos de turbulência utilizados .....   | 42 |
| <b>Tabela 9</b> - Principais parâmetros do método de inicialização e de solução do sistema de equações.....  | 42 |
| <b>Tabela 10</b> - Principais parâmetros da análise de regressão múltipla não-linear .....   | 46 |
| <b>Tabela 11</b> - Principais características das adutoras selecionadas.....   | 47 |
| <b>Tabela 12</b> - Principais dados do pós-processamento para um caso típico de geometria com orifício circular de 6 mm para carga em torno de 4 m.c.a em função do diâmetro. ....       | 54 |
| <b>Tabela 13</b> - Coeficientes das correlações empíricas e seus R-quadrados para diferentes funções do tipo $C_d = A. dDB. \Delta HDC. ReD$ utilizando os dados experimentais.....      | 55 |
| <b>Tabela 14</b> - Coeficientes das correlações e seus R-quadrados para diferentes funções do tipo $C_d = A. dDB. \Delta HDC. ReD$ utilizando os dados oriundos das simulações CFD. .... | 55 |
| <b>Tabela 15</b> - Vazões perdidas no cenário de um orifício circular de 5 mm usando diferentes correlações para o coeficiente de descarga.....  | 57 |
| <b>Tabela 16</b> - Vazões perdidas no cenário de um orifício circular de 15 mm usando diferentes correlações para o coeficiente de descarga.....   | 57 |

## LISTA DE SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| AWWA   | <i>American Water Works Association</i>                        |
| CAGECE | Companhia de Água e Esgoto do Ceará                            |
| CAPES  | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior    |
| CFD    | <i>Computer Fluid Dynamics</i>                                 |
| COGERH | Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará             |
| DWRWCO | <i>Department of Water Resources Water Conservation Office</i> |
| DNS    | <i>Direct numerical simulation</i>                             |
| IPCC   | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>               |
| SDAs   | Sistema de distribuição de água                                |
| SNIS   | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento               |
| SWAN   | <i>Smart Water Networks Forum</i>                              |
| RANS   | <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>                         |
| IWA    | <i>The International Water Association</i>                     |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                      |                   |   |
|----------------------|-------------------|---|
| $C_v$                | -                 | Coefficiente de velocidade  |
| $C_c$                | -                 | Coefficiente de contração   |
| $Q$                  | $[L^3T^{-1}]$     | Fluxo de água perdida   |
| $C_d$                | -                 | Coefficiente de descarga  |
| $A$                  | $[L^2]$           | Área do orifício  |
| $g$                  | $[LT^{-2}]$       | Aceleração gravitacional  |
| $H$                  | $[L]$             | Carga total   |
| $\alpha$             | $[L^2T^{-1}]$     | Coefficiente de vazamento   |
| $\beta$              | -                 | Expoente de vazamento   |
| $A_0$                | $[L^2]$           | Área de orifício inicial a pressão zero   |
| $m$                  | $[L^2L^{-1}]$     | Constante de proporcionalidade entre a deformação da área do orifício e a carga |
| $\mu_t$              | $[L^2T^{-1}]$     | Viscosidade turbulenta  |
| $k$                  | $[L^2T^{-2}]$     | <i>Turbulence kinetic energy</i>  |
| $\varepsilon$        | $[L^2T^{-3}]$     | <i>Turbulence Dissipation rate</i>  |
| $\rho$               | $[ML^{-3}]$       | Massa específica  |
| $\mu$                | $[L^2T^{-1}]$     | Viscosidade dinâmica  |
| $G_k$                | $[ML^{-1}T^{-3}]$ | Geração de $k$ devido aos gradientes médios de velocidade                       |
| $G_b$                | $[ML^{-1}T^{-3}]$ | Geração de energia cinética de turbulência devido ao empuxo                     |
| $Y_M$                | $[ML^{-1}T^{-3}]$ | Dilatação flutuante em turbulência compressível                                 |
| $\sigma_k$           | -                 | Número de Prandtl turbulento para $k$   |
| $\sigma_\varepsilon$ | -                 | Número de Prandtl turbulento para $\varepsilon$                                 |
| $\Gamma_k$           | $[ML^{-1}T^{-1}]$ | Difusividade efetiva de $k$   |
| $\Gamma_\omega$      | $[ML^{-1}T^{-1}]$ | Difusividade efetiva de $\omega$  |
| $Y_k$                | $[ML^{-1}T^{-3}]$ | Dissipação de $k$ devido à turbulência  |
| $Y_\omega$           | $[ML^{-3}T^{-2}]$ | Dissipação de $\omega$ devido à turbulência.                                    |
| $Re_t$               | -                 | Reynolds turbulento   |
| $S$                  | $[T^{-1}]$        | Magnitude da taxa de deformação   |
| $y$                  | $[L]$             | Distância até a superfície  |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>14</b> |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>                                     | <b>17</b> |
| 2.1 Objetivo Geral .....                                     | 17        |
| 2.2 Objetivos Específicos .....                              | 17        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                         | <b>18</b> |
| 3.1 Análise Bibliométrica .....                              | 18        |
| 3.1.1 Metodologia.....                                       | 19        |
| 3.1.2 Resultados.....  | 20        |
| 3.2 Perda em Sistemas de Distribuição de Água .....          | 27        |
| 3.3 Equação do Orifício.....                                 | 28        |
| 3.4 Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).....             | 31        |
| 3.4.1 Modelos de Turbulência RANS.....                       | 31        |
| 3.4.1.1 Modelo k- $\epsilon$ .....                           | 33        |
| 3.4.1.2 Modelo k- $\omega$ .....                             | 34        |
| 3.4.1.2.1 Modelo k- $\omega$ SST .....                       | 35        |
| 3.4.2 Estudo de Vazamento de Água com CFD .....              | 36        |
| <b>4 MATERIAL E MÉTODO .....</b>                             | <b>37</b> |
| 4.1 Material.....  | 37        |
| 4.2 Estudo Computacional CFD.....                            | 37        |
| 4.2.1 Entradas e Geometrias .....                            | 38        |
| 4.2.2 Malha.....   | 39        |
| 4.2.3 Modelos de Turbulência .....                           | 40        |
| 4.2.4 Método de Solução Numérica .....                       | 42        |
| 4.3 Verificação, Calibração e Validação dos Resultados ..... | 43        |
| 4.3.1 Verificação .....                                      | 44        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3.2 Validação .....                             | 45        |
| 4.4 Pós-processamento .....                       | 45        |
| 4.5 Equações Empíricas .....                      | 46        |
| 4.6 Aplicação dos Resultados .....                | 46        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>             | <b>49</b> |
| 4.1 Implicação das Linhas de Fluxo no $C_d$ ..... | 51        |
| 4.2 Correlações Adimensionais .....               | 54        |
| 4.3 Aplicação dos Resultados .....                | 56        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>                          | <b>58</b> |
| 5.1 Recomendações .....                           | 58        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                           | <b>60</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas já são reconhecidas há muito tempo pela literatura científica e por agências de desenvolvimento global como um dos principais desafios para a humanidade. Uma vez que as consequências das mudanças climáticas nos ecossistemas terrestres e nas sociedades humanas são vivenciadas principalmente através do ciclo da água (JIMENEZ CISNEROS *et al.*, 2014), e dada a vulnerabilidade dos recursos hídricos do planeta, um dos principais desafios da nossa sociedade atual e futura será sua conservação (OPPENHEIMER *et al.*, 2014).

Diversos lugares no Mundo e no Brasil já convivem com a escassez hídrica em virtude do déficit de quantidade ou qualidade da água, agravado por problemas regionais como o crescimento urbano desordenado (IISD, 2006). Mekonnen e Hoekstra (2016) estimam que quatro bilhões de pessoas no mundo vivem em áreas que sofrem com escassez de água ao menos uma vez ao ano.

Na comparação entre os sistemas de tratamento e distribuição de água com a indústria tradicional, entende-se que a indústria da água necessita de sistemas de condicionamento, transporte e armazenamento eficientes, nos quais o princípio de múltiplas barreiras deve ser aplicado a fim de garantir a qualidade do produto final. Essas barreiras de proteção vão desde ações de proteção ao manancial até a manutenção da segurança dos sistemas de distribuição de água (REALI *et al.*, 2019). Assim, deve-se buscar medidas estruturais e não estruturais a fim de garantir a segurança hídrica da população.

Nesse contexto, inclui-se o estudo dos sistemas de distribuição de água (SDAs), uma vez que a quantidade de água perdida nesses sistemas é considerável. De acordo com a última estimativa do Banco Mundial (2016), cerca de 45 milhões de metros cúbicos de água são perdidos diariamente nos países em desenvolvimento, gerando uma perda financeira para os estados e companhias de água de cerca de três bilhões de dólares por ano.

Apesar de a quantidade de água perdida variar significativamente entre países, o problema de escassez hídrica não é restrito a países em desenvolvimento. Dados recentes do Governo Americano (2021) indicam que mais de 10 milhões de lares americanos, e mais de 400 mil escolas e creches americanas sofrem com a escassez de água.

Além da complexidade natural do dimensionamento e operação dos SDAs, e das questões econômicas e humanitárias apresentadas até o momento, pesquisas recentes inserem mais uma camada de complexidade indicando potenciais riscos para a saúde pública por meio de intrusões nos orifícios das redes de distribuição de água (BESNER *et al.*, 2011).



No contexto brasileiro, os avanços nos serviços de saneamento foram firmados com a Lei Federal 11.026 / 2020 - Novo Marco Legal Para o Saneamento Básico. Essa nova lei estipula metas de universalização e redução progressiva das perdas de água no sistema de abastecimento de água até 2033. Porém, o indicador de perdas de água da ordem de 39% em 2019, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), reflete uma grande falta de investimentos no combate a essas perdas no país. A situação é ainda mais grave na região Nordeste do Brasil, onde a grande variabilidade das chuvas já é uma realidade, e o indicador de perda de água chega a cerca de 46% (BRASIL, 2020).

O Atlas Água, que faz parte do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), indica que 35% das cidades brasileiras utilizam os recursos hídricos de modo ineficiente e necessitam reduzir vazamentos, 19% têm potencial para melhorias significativas na gestão dos recursos hídricos e 46% precisam realizar avaliações para confirmar a efetividade das melhorias nos índices de perdas (BRASIL, 2021).

Nesse cenário, faz-se necessários estudos teóricos e experimentais acerca da detecção e quantificação de perdas em sistemas de distribuição e adução, a fim de promover ferramentais de detecção ativa e modelos de vazamento mais precisos com o intuito de promover ações práticas que possam minimizar os seus impactos socioeconômicos e ambientais (KINGDOM *et al.*, 2006; THORNTON *et al.*, 2008).

Apesar da vasta literatura sobre sistemas de distribuição de água, os modelos de quantificação das perdas de água em sistemas de distribuição ainda apresentam limitações importantes. Esses modelos geralmente assumem que o tubo está submerso no mesmo fluido, ignorando a interação solo-vazamento. Fatores como fluxo axial no tubo, regime de fluxo e variações no coeficiente de descarga também são geralmente ignorados.

Diversos estudos na literatura buscam relacionar a área de vazamento a fatores que dependem das propriedades do material ou características de abertura do orifício, enquanto as condições hidráulicas, e principalmente as condições hidrodinâmicas, são geralmente negligenciadas (GREYVENSTEIN e VAN ZYL, 2007; CASSA *et al.*, 2010; RAHMAN *et al.*, 2018; SHAO *et al.*, 2019b).

Tais condições podem ser manifestadas no coeficiente de descarga ( $C_d$ ). O mesmo é definido por Streeter e Wylie (1985) como o produto de  $C_v$  - coeficiente de velocidade definido como a razão entre a velocidade real e a velocidade teórica e  $C_c$  - coeficiente de contração definido como a razão entre a área do jato na *vena contracta* e a área do orifício.

O recente estudo experimental de Yu *et al.* (2019) sugere que não apenas o tamanho e a forma do orifício interferem no coeficiente de descarga de vazamento da tubulação, mas

também que o padrão de fluxo representado pelas linhas de fluxo tem um efeito neste coeficiente. No entanto, a literatura ainda necessita de mais estudos experimentais, bem como simulações numéricas que possam reproduzir e explicar o comportamento desses fluxos complexos.

No contexto cearense, segundo a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), no estado existem atualmente 130 adutoras sob sua responsabilidade totalizando mais de 1.700 Km de extensão com expectativa de expansão através do projeto Malha D'água. Tal projeto visa ampliar a segurança hídrica do Estado interligando e ampliando a rede existente em mais de 4.000 Km de extensão até 2041 (COGERH, 2021).

Apesar do projeto de expansão, o balanço hídrico da CAGECE de 2016 indica que o estado tem um índice de perdas reais em torno de 20%, onde as adutoras sozinhas representam em torno de 2% do volume de perdas totais (SOUZA FILHO, 2018). Relatórios da Controladoria Geral da União de 2014 alertam a COGERH na gestão das adutoras de engate rápido em nove cidades do estado (Crateús/Nova Russas, Canindé/Caridade, Tauá, Irauçuba, Caririaçu, Alcântaras, Potiretama, Quiterianópolis e Maranguape) indicando tubulações onde houve significativa redução da vida útil por falhas de assentamento, o que pode levar a vazamentos no sistema.

Dessa maneira, espera-se que as informações e correlações obtidas neste trabalho possam auxiliar os órgãos de gestão de água provisionando o entendimento dos vazamentos através de equações mais confiáveis que permitam uma intervenção nas redes e adutoras e uma gestão de perdas mais eficiente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o impacto dos fatores geométricos, hidráulicos e hidrodinâmicos nos vazamentos de água em tubulações através da modelagem do tipo fluidodinâmica computacional (CFD).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar estudos computacionais dos principais modelos CFD para avaliar vazamentos de água em tubulações sob diferentes condições de contorno;
- Verificar, calibrar e validar os modelos escolhidos com os resultados experimentais disponíveis na literatura;
- Avaliar o impacto dos fatores geométricos, hidráulicos e hidrodinâmicos no coeficiente de descarga ( $C_d$ );
- Obter correlações adimensionais práticas que possam auxiliar na gestão e controle de perdas nos sistemas de distribuição e adução de água;
- Avaliar o impacto na gestão de perdas de água do uso do  $C_d$  como uma constante e como uma função de fatores geométricos, hidráulicos e hidrodinâmicos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Análise Bibliométrica

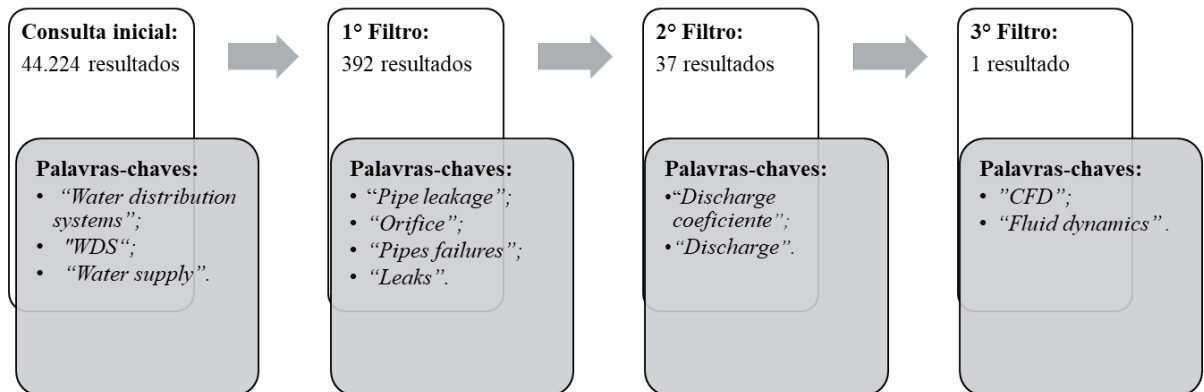
Uma análise bibliométrica foi realizada com auxílio das ferramentas Excel e VOSviewer. O *software* VOSviewer foi escolhido por apresentar representações gráficas mais ilustrativas e fáceis de sintetizar, mesmo para uma grande base de dados, em comparação ao demais software livre de análise bibliométrica (VAN ECK e WALTMAN, 2009).

O objetivo da análise bibliométrica é permitir uma análise de maneira sistêmica das seguintes questões:

- Avaliar a coocorrência de temas com o estudo de vazamentos em sistemas de distribuição de água através das palavras-chaves;
- Avaliar como as contribuições para o estudo de vazamentos evoluiu espacialmente e ao longo do tempo;
- Avaliar a coocorrência de temas com o estudo do coeficiente de descarga em tubulações de água através das palavras-chaves;
- Avaliar a interação e as parcerias internacionais entre os maiores pesquisadores sobre o tema;
- Avaliar as principais contribuições para o estudo do coeficiente de descarga em tubulações de água;
- Avaliar as principais hipóteses e abordagem relacionadas ao  $C_d$  no estudo de vazamentos em sistemas de distribuição de água.

Para isso, através do Portal de Periódicos da CAPES buscas foram realizadas na plataforma *Web of Science* por meio dos títulos, *abstract* e palavras chaves. Um resumo dos resultados quantitativos e dos filtros utilizados segue abaixo na Figura 01. Apesar disso, o presente trabalho não se limitou aos periódicos disponíveis no *Web of Science*, assim foram incluídos nesta análise e nas referências bibliográficas, por exemplo, livros e obras de autores brasileiros que não constavam nesta plataforma.

**Figura 1** - Sumário dos filtros utilizados na plataforma *Web of Science*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 3.1.1 Metodologia

Com auxílio do *software* VOSviewer, e com base nos 392 resultados do 1º Filtro, tomou-se palavras-chave que ocorriam ao menos em dois trabalhos diferentes, o que resultou em 157 palavras-chave, e realizou-se uma rede de interconexões entre elas. Nessa rede quanto maior o círculo nas figuras extraídas do *software*, maior a ocorrência da palavra-chave, e as ligações representam a coocorrência de duas palavras chaves (VAN ECK e WALTMAN, 2021). Em seguida, a fim permitir uma melhor análise, tomou-se somente as 20 palavras-chave com maior ocorrência, e repetiu-se o processo.

Após, a fim de avaliar a expansão territorial das pesquisas relacionadas a vazamento de água, tomou-se o país do endereço do primeiro autor de cada trabalho, e com auxílio do *software* Excel foram plotados na projeção do mapa-múndi o número de publicações por país até o ano 2000, em seguida até o ano 2010 e até o ano de 2021.

Com o objetivo de avaliar a evolução temporal do tema, tomou-se os 10 países com mais publicações sobre o tema, e avaliou-se o número de trabalhos publicados antes de 2000, entre 2000 a 2010, e entre 2010 a 2021.

Em seguida com base nos resultados do 2º Filtro, e com auxílio do *software* VOSviewer analisou-se a coocorrência de palavras-chaves com a palavra-chave coeficiente de descarga. Após, tomou-se os principais pesquisadores e uma rede interconexões de coautoria foi realizada.

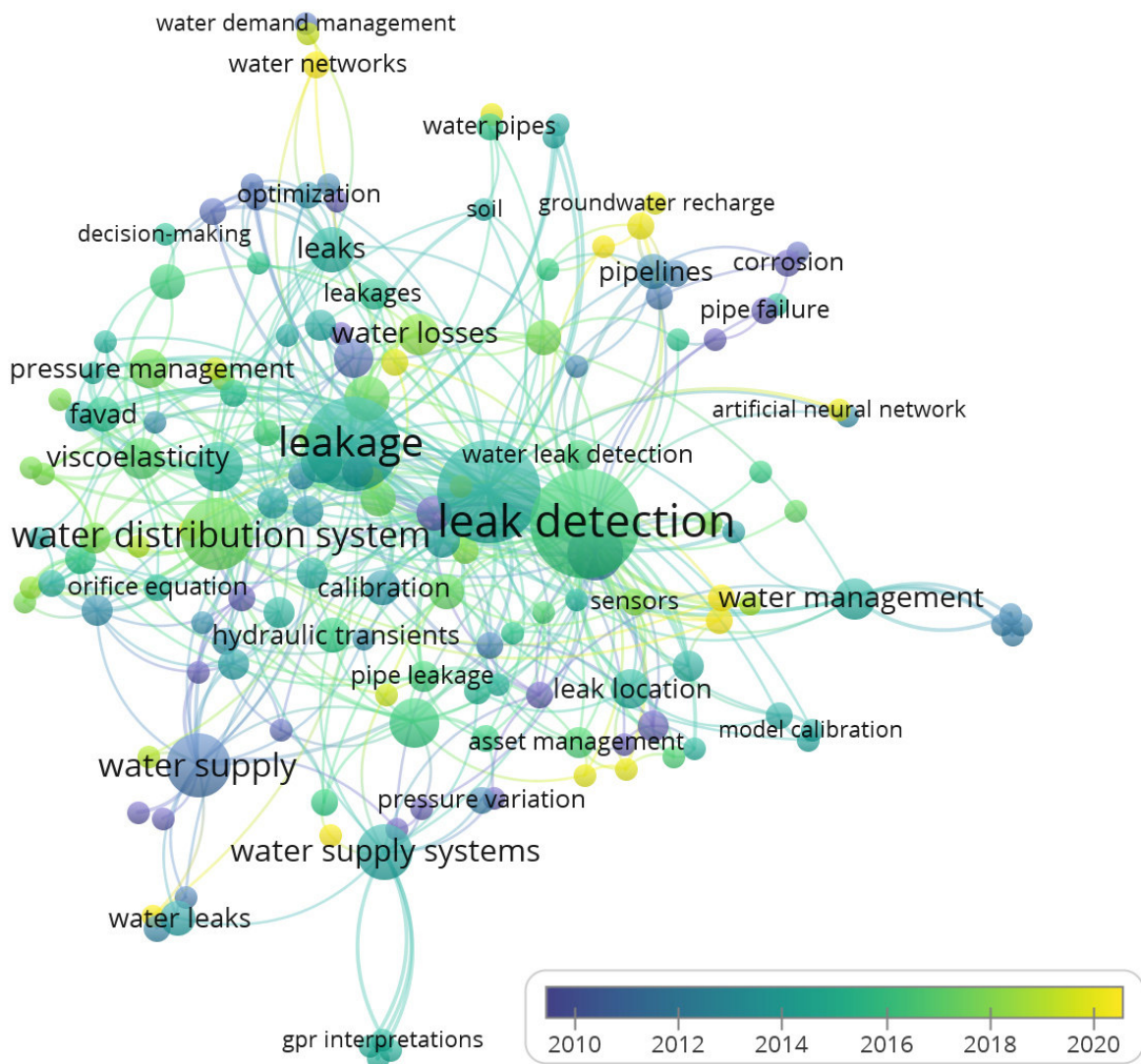
Ao final, foram elaboradas tabelas resumos das principais contribuições da literatura no estudo do coeficiente de descarga em tubulações, e as principais hipóteses estabelecidas em relação ao coeficiente de descarga nos estudos sobre vazamentos em sistemas de distribuição de água.

### 3.1.2 Resultados

O resultado quantitativo apresentado na Figura 01 mostra que apesar da evolução do CFD e o seu uso com sucesso no estudo de vazamentos de gases e óleos (CHEN *et al.* 2021), a associação com estudo de vazamentos de água ainda é nova, contando somente um único trabalho na base de dados *Web of Science*.

A Figura 02 permite uma análise dos principais temas que se relacionam ao estudo de vazamento. Percebe-se palavras-chaves recentes em amarelo e mais distantes do centro da rede como novas propostas de trabalho que se relacionam com vazamentos de água dentre eles pode-se citar: *artificial neural network* e *groundwater recharge*.

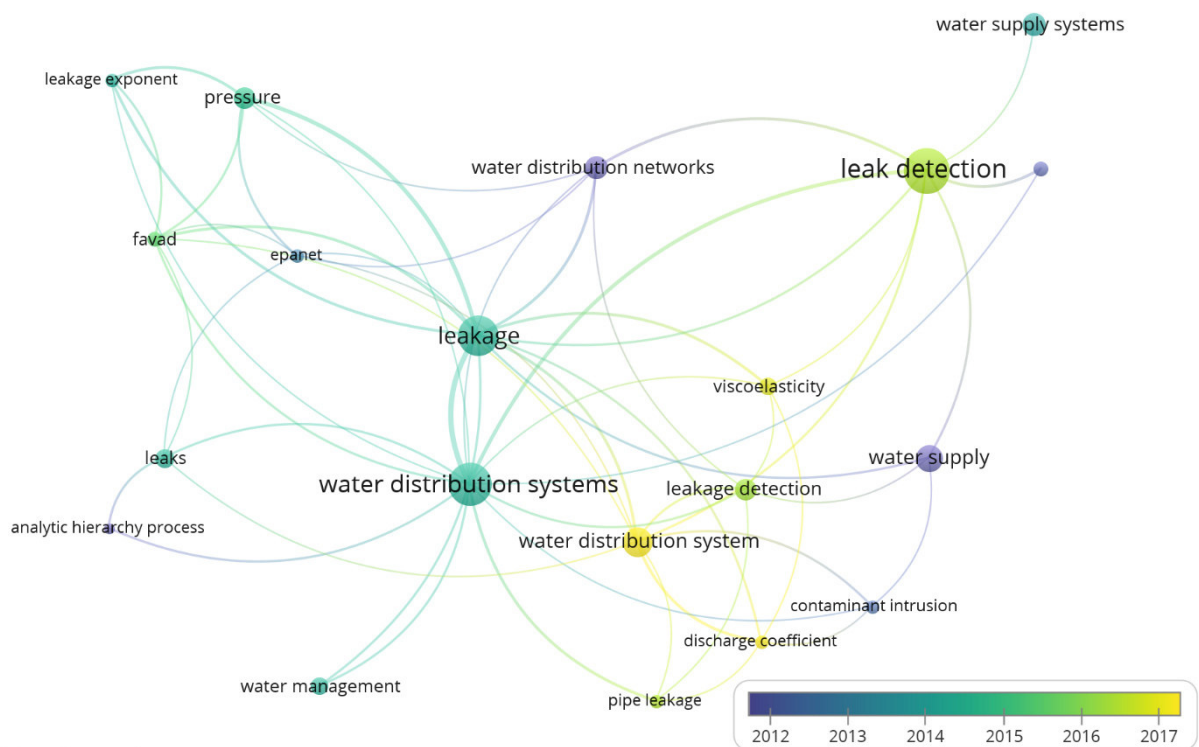
**Figura 2** - Rede de coocorrência de palavras-chaves entre os trabalhos obtidos pelo 1º Filtro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 3 indica as vinte principais palavras-chaves relacionadas ao estudo de vazamento de água em redes de distribuição. O termo *discharge coefficient* aparece próximo dos termos *contamination intrusion* e *pipe leakage* apresentando um total de 13 conexões com as demais palavras chaves.

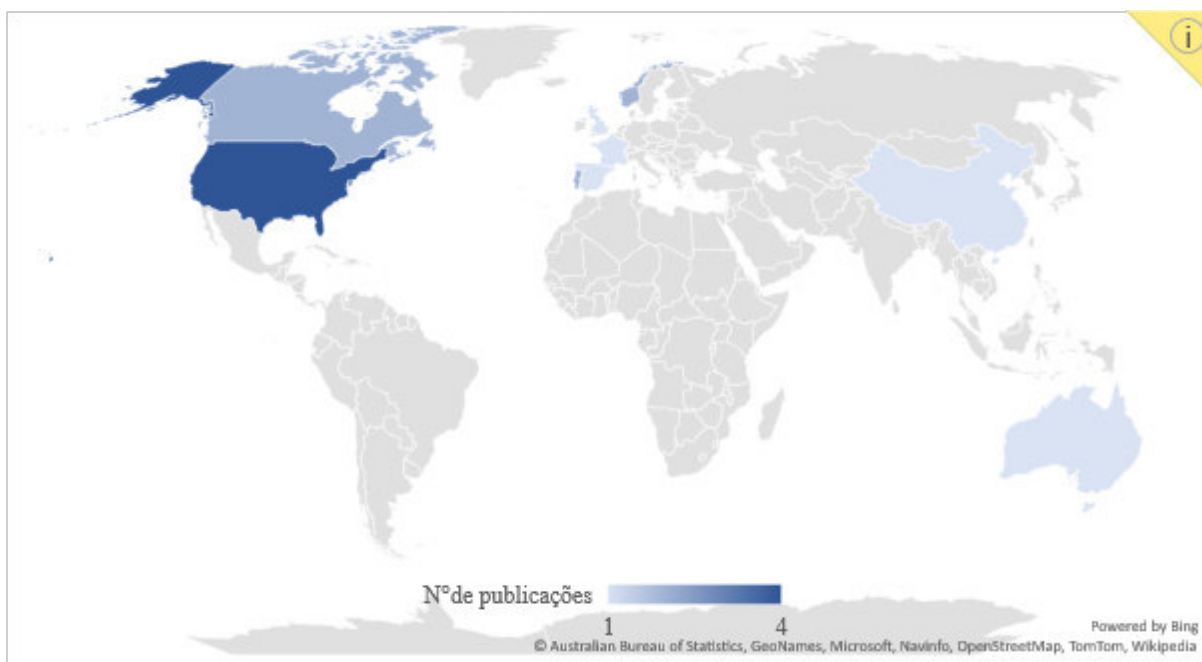
**Figura 3** - Rede de coocorrência das 20 palavras-chaves mais citadas entre os trabalhos obtidos pelo 1º Filtro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

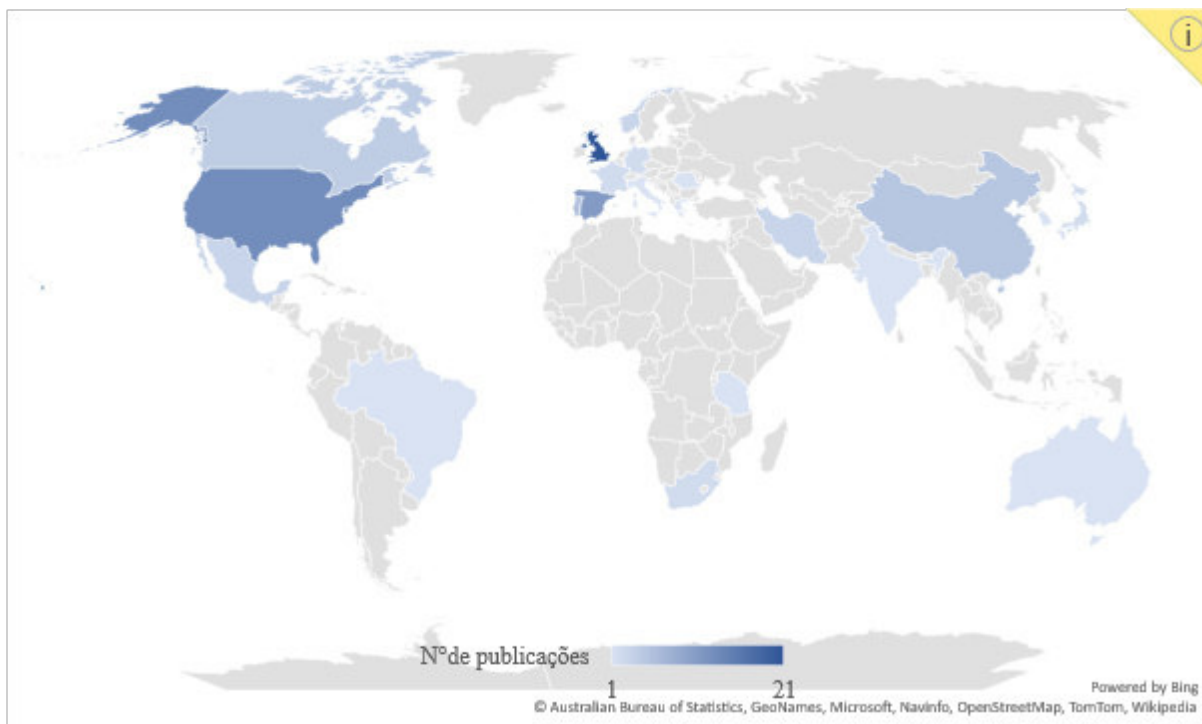
Na Figura 04 representa as publicações sobre o presente tema até o ano 2000, verifica-se um domínio nos países norte-americanos. A Figura 05 indica que entre os anos 2000 e 2010 diversos países europeus começaram a pesquisar sobre o tema, destacando-se a Inglaterra. A Figura 06 que retrata a divisão geográfica atual do tema mostra que os Estados Unidos e a China lideram no número de publicações. De uma maneira geral, mais instituições no mundo estão se interessando sobre o tema, até 2000 somente 9 países tinham publicações no tema, em 2010 esse número cresceu para 23 países e atualmente 54 países tem publicações sobre o tema na base de dados da *Web of Science*.

**Figura 4** - Número de publicações por país até o ano 2000 a partir do resultado do 1º Filtro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

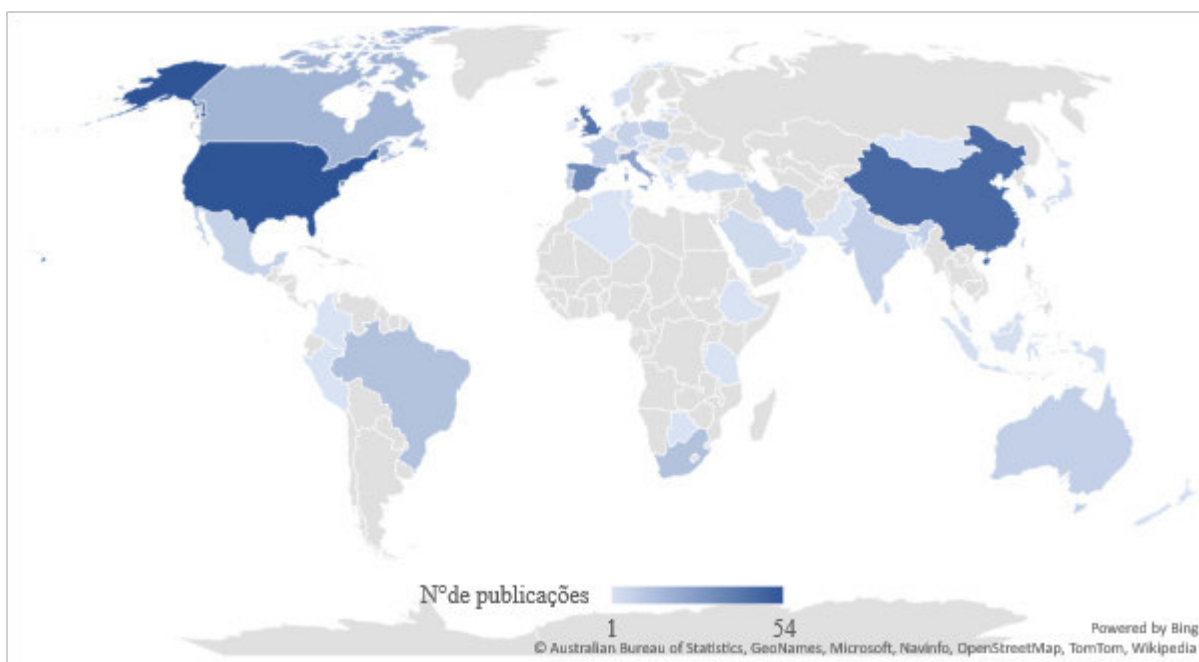
**Figura 5** - Número de publicações por país até o ano 2010 a partir do resultado do 1º Filtro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.



**Figura 6** - Número de publicações por país até o ano 2021 a partir do resultado do 1º Filtro.



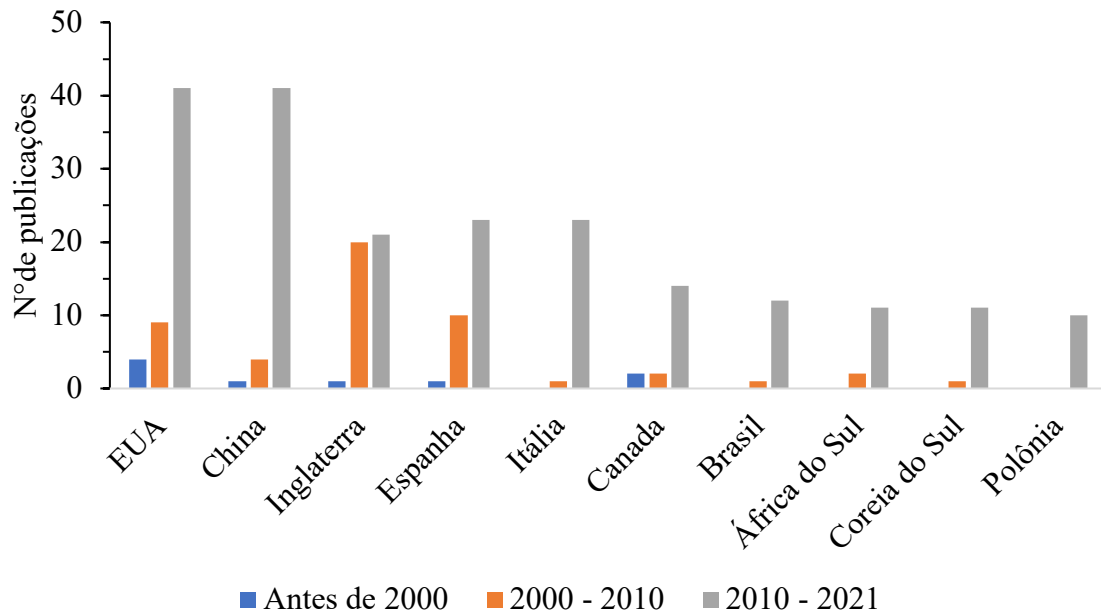
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 7 indica que o número de publicações sobre vazamento de água cresceu em todos os 10 países com mais publicação sobre o tema em comparação com as últimas décadas. A Figura 7 ainda indica que a Inglaterra se manteve com o mesmo nível de publicação da última década, enquanto EUA e China tem suas principais contribuições após o ano de 2010. Países emergentes como Brasil e África do Sul aparecem como sétimo e oitavo na lista de maiores publicadores do tema de acordo com a base de dados da *Web of Science*.

A Figura 8 mostra as principais palavras-chaves relacionadas com o termo coeficiente de descarga extraídas do 2º Filtro. Percebe-se em amarelo, indicando as publicações mais recentes, os termos *hydraulic transient* e *cfD modelling* o que sugere que o uso de teorias de hidráulica transiente e da modelagem CFD para o estudo do coeficiente de descarga ainda são incipientes.

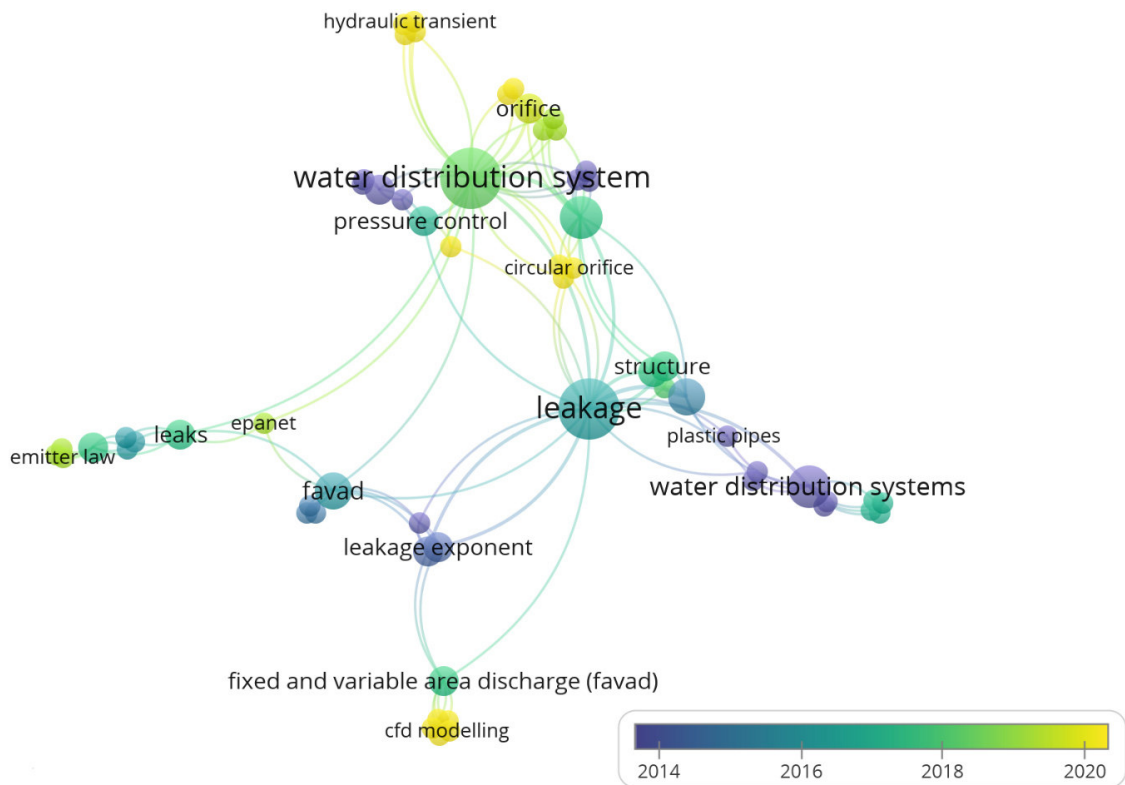
Apesar das Figuras 4, 5 e 6 sugerirem um avanço no estudo de vazamentos de água, indicando que cada vez mais instituições de diferentes países se interessam sobre o tema, a Figura 9 que mostra os principais autores extraídos do 2º Filtro, ou seja, os autores com publicação sobre o coeficiente de descarga, apesar de fazerem parcerias internacionais os grupos de pesquisas analisados trabalham de forma isolada.

**Figura 7** - Número de publicações nos 10 países com mais publicação no tema por década e até o ano de 2021



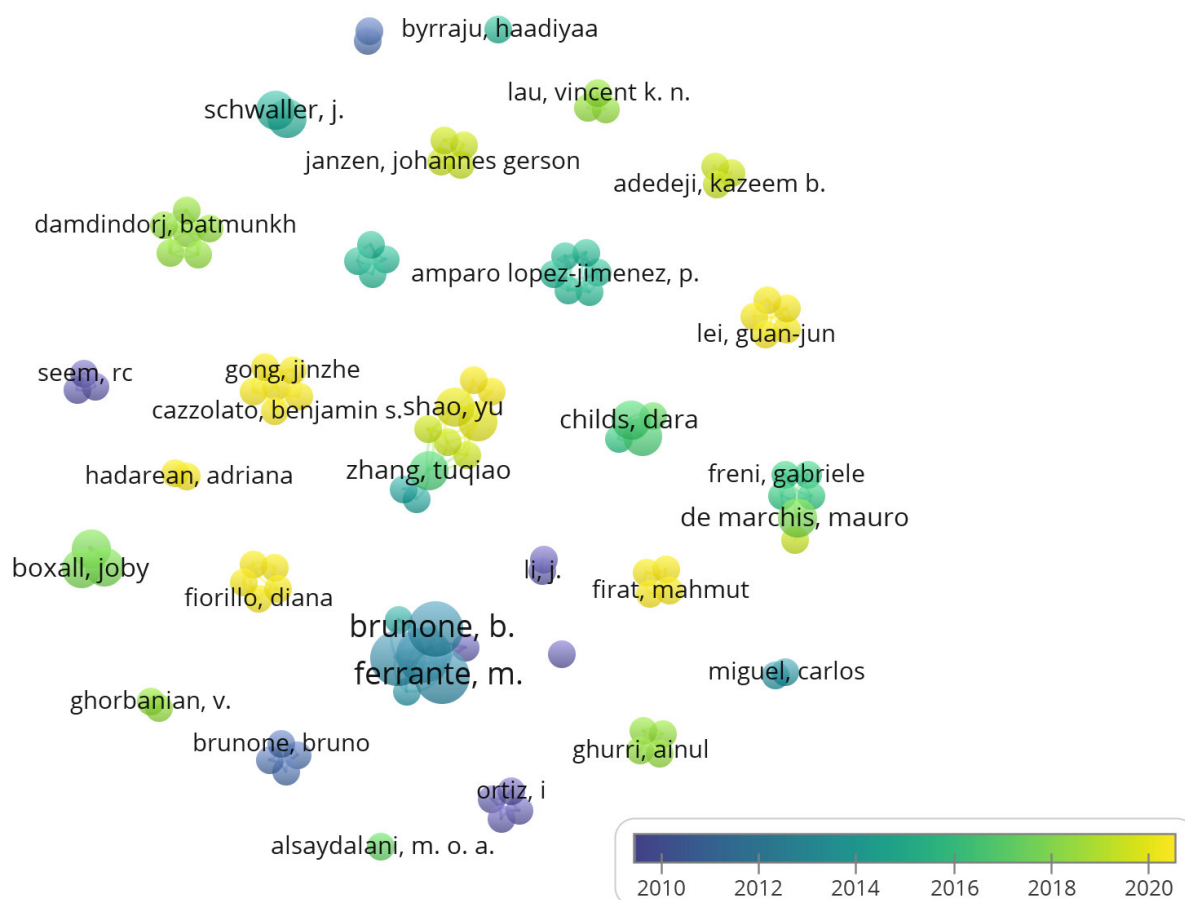
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 8** - Rede de coocorrência das principais palavras-chaves entre os trabalhos obtidos pelo 2º Filtro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 9** - Rede de coautoria dos principais autores obtidos pelo 2º Filtro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Apesar de não haver consenso ainda na literatura em relação aos parâmetros que influenciam o  $C_d$ , diversos estudos resumidos na Tabela 01 indicam que o  $C_d$  não é uma constante. Apesar disso, do conhecimento do autor não há publicações que avaliem o impacto do uso do  $C_d$  como uma constante nos sistemas de detecção e quantificação de perdas.

A Tabela 01 ainda indica que a faixa de variação do  $C_d$  pode ser relativamente grande a depender se trata-se de uma intrusão ou vazamento, e a depender das variáveis do trabalho. De uma maneira geral, o  $C_d$  para intrusão varia mais principalmente com variável como o meio poroso como pode ser observado no trabalho de Yang *et al.* (2013).

A Tabela 02 indica as principais hipóteses tomadas em relação ao  $C_d$  no estudo de vazamentos. Grande parte dos trabalhos utiliza o coeficiente de descarga como uma constante em torno de 0,67. Trabalhos inovadores como de Schwaller e Van Zyl (2014, 2015), e trabalhos recentes como de Boian *et al.* (2019) utilizam o  $C_d$  como uma variável aleatória com comportamento normal usualmente variando em média entre 0,5 a 0,8 e desvio padrão em torno

de 10%.

**Tabela 1** - Resumo das principais contribuições sobre o estudo do  $C_d$  em tubulações de água por tipo de estudo indicando os fatores que o influenciam e sua faixa de variação.

| Referência                          | Tipo de estudo       | Fatores que influenciam o $C_d$   | Faixa de variação do $C_d$ |
|-------------------------------------|----------------------|---|----------------------------|
| Yang <i>et al.</i> (2013)           | Intrusão             | Meio poroso, tamanho do orifício e regime do fluxo  | 0,15 - 0,75                |
| Mora-Rodríguez <i>et al.</i> (2015) | Intrusão             | $Re$ , formato do orifício  | 0,70 - 0,92                |
| De Marchis e Milici (2019)          | Vazamento            | Deformação do orifício, <i>leakage exponent</i>   | -                          |
| Shao <i>et al.</i> (2019a)          | Intrusão             | Carga, formato do orifício, relação orifício-diâmetro   | 0,62 - 0,72                |
| Shao <i>et al.</i> (2019b)          | Intrusão e Vazamento | Velocidade do fluxo, formato do orifício, pressão externa   | 0,64 - 0,81                |
| Yu <i>et al.</i> (2019)             | Vazamento            | Relação orifício-diâmetro, relação carga-espessura da parede, formato do orifício, e meio externo | 0,60 - 0,85                |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 2** - Resumo das principais hipóteses consideradas sobre o  $C_d$  nos principais trabalhos de vazamentos de sistemas de distribuição de água

| Referência                    | Hipótese sobre o $C_d$ | Faixa de valores usadas |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Cassa <i>et al.</i> (2010)    | Constante              | 0,67                    |
| Ferrante <i>et al.</i> (2014) | Constante              | -                       |
| Schwaller e Van Zyl (2014)    | Distribuição normal    | -                       |
| Schwaller e Van Zyl (2015)    | Distribuição normal    | Médias 0,50 - 0,80      |
| Gamboa-Medina e Reis (2017)   | Constante              | -                       |
| Ghorbanian e Ramezani (2018)  | Constante              | -                       |
| Fox <i>et al.</i> (2018)      | Constante              | 0,60                    |
| Boian <i>et al.</i> (2019)    | Distribuição normal    | Médias 0,58 - 0,73      |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 3.2 Perda em Sistemas de Distribuição de Água

Os sistemas de distribuição de água estão definidos na norma brasileira NBR 12218:2017 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - como segue: “Parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas.”

Esta norma recomenda no item 5.12.3 que sejam elaborados manuais de operação, controle e manutenção que permitam a medição e detecção de vazamentos e o controle de perdas nos setores de medição. Apesar disso, não há menções a nível aceitável de perdas no sistema. Diversos autores como Porto (2006) alertam não só para a complexidade do projeto de sistemas de distribuição de água, mas também para a complexidade de operação e manutenção desses sistemas.

Uma das operações de manutenção e controle do sistema é o controle das perdas de água. Lambert e Hirner (2000) substituem o nome genérico "água perdida" por *non-revenue water* (NRW), em tradução livre água não faturada, definida como a diferença entre a quantidade de água que entra no sistema de distribuição e a quantidade de água que é faturada aos consumidores. Essa pode ser dividida em três componentes: (1) um consumo autorizado não faturado, (2) perdas aparentes e (3) perdas reais de água.

Tal definição permitiu o estabelecimento de metas e controles mais precisos, por exemplo, a *International Water Association* (IWA) sugere que o nível aceitável de NRW não deve ultrapassar 25%. No entanto, o último relatório do *Smart Water Networks Forum* (SWAN) que avaliou as principais capitais do mundo mostra que a maioria das capitais tem um nível de NRW entre 25 a 50%, mesmo capitais de países desenvolvidos como Glasgow no Reino Unido com uma taxa de perda de 45%, Londres no Reino Unido com uma taxa de 28%, e Montreal no Canadá com uma taxa de 40% de perdas.

Em relação a parcela de perdas reais de água, ou seja, os vazamentos. Tal fenômeno é complexo e ainda não totalmente compreendido. Ainda não há na literatura consenso de equações universais que possam ser usadas para quantificar e detectar tais vazamentos. Apesar disso, pode-se afirmar que os principais fatores que podem causar o vazamento podem ser divididos nas seguintes categorias:

- (a) Problemas internos: material da tubulação, propriedades estruturais da tubulação, idade da tubulação, defeitos nas tubulações;
- (b) Problemas de projeto e manutenção: más conexões nas tubulações, cargas internas

devido à pressão de operação e cargas externas - alta pressão do sistema, má qualidade de mão de obra;

(c) Problemas externos: deterioração do material devido a ambientes químicos internos e externos, interação entre solo e tubulação, temperatura do inverno, sobrecarga do solo, tráfego intenso, e danos acidentais ou intencionais, por exemplo, devido a escavação (RAJANI e KLEINER, 2001; VAN ZYL e CLAYTON, 2007; PUUST *et al.*, 2010; RAHMAN *at al.*, 2018).

### 3.3 Equação do Orifício

A equação de Torricelli ainda é usada para estimar a vazão de vazamento em tubulações.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot H} \quad (1)$$

onde Q é o fluxo de água perdida,  $C_d$  o coeficiente de descarga, A a área do orifício, g a aceleração gravitacional e H carga total.

Embora esta equação seja derivada do balanço de energia e indique a relação entre vazão perdida e pressão, ela tem sido questionada por diversos autores ao longo da última década.

Equações mais genéricas têm sido sugeridas, a mais conhecida é a equação de potência derivada da Teoria FAVAD (MAY, 1994):

$$Q = \alpha \cdot H^\beta \quad (2)$$

onde  $\alpha$  é coeficiente de vazamento e  $\beta$  o expoente de vazamento.

Entretanto, o valor teórico do expoente  $\beta$  da equação de Torricelli de 0,5 difere dos valores experimentais relatados por Farley e Trow (2003) com valores variando entre 0,52 e 2,79, com média em torno de 1,14. Estudos experimentais mais recentes de Greyvenstein e Van zyl (2007), resumidos na Tabela 03, confirmam a variabilidade deste expoente, com variações de 0,41 a 0,53 para fissura circunferencial, 1,38 a 1,85 para fissura longitudinal, porém um valor em torno de 0,5 para orifício circular para tubos de uPVC.

**Tabela 3** - Resumo do coeficiente exponencial de vazamento da Equação 02 para diferentes materiais e formatos de orifício

| Tipo de Orifício | Material da tubulação |                 |           |
|------------------|-----------------------|-----------------|-----------|
|                  | uPVC                  | Cimento amianto | Aço       |
| Circular         | 0,52                  |                 | 0,52      |
| Longitudinal     | 1,38-1,85             | 0,79-1,04       |           |
| Circunferencial  | 0,41-0,53             |                 |           |
| Corrosão         | -                     | -               | 0,67-2,30 |

Fonte: Adaptado de Greyenstein and Van zyl, 2007

Vários autores sugerem que esta variação entre os valores experimentais do expoente  $\beta$  da Eq. (2) e o valor teórico de 0,5 poderia ser explicado pela dependência entre a carga total  $H$  e os demais termos da equação, notadamente, a área de orifício  $A$  (MAY, 1994; VAN ZYL e CLAYTON, 2007; CASSA *et al.*, 2010).

CASSA *et al.* (2010) estudaram o comportamento da área do orifício para diferentes materiais utilizando o método dos elementos finitos. Assumindo um comportamento linear elástico para os materiais da tubulação estudados, encontraram uma relação linear entre a área de vazamento e a pressão total, propondo a seguinte equação:

$$Q = Cd \cdot \sqrt{2g} \cdot (A_0 \cdot h^{0.5} + m \cdot h^{1.5}) \quad (3)$$

onde  $A_0$  é a área de orifício inicial a pressão zero,  $m$  é uma constante de proporcionalidade entre a deformação da área do orifício e a carga. Eles também estudaram a relação entre diferentes formatos de orifícios, mostrando que trincas longitudinais se deformam mais facilmente do que trincas circulares sob a mesma pressão, e que orifícios circulares sofrem menos deformação pelo aumento da pressão em relação aos demais tipos de orifício.

Apesar dos avanços nos modelos referentes ao estudo da deformação da área do orifício com o aumento da carga, vale ressaltar que a deformação da área de vazamento altera o  $C_d$ , pois pode alterar o coeficiente de contração e/ou o coeficiente de velocidade. A maioria dos estudos encontrados na literatura foca nas propriedades dos materiais e nas características da área do orifício, enquanto as características hidrodinâmicas que se manifestam no  $C_d$  são usualmente negligenciadas (FRANCHINI e LANZA, 2014).

Até hoje não há consenso quanto ao valor do  $C_d$  como foi observado na Tabela 01, e apesar disso, grande parte dos trabalhos negligenciam a sua variação como foi observado na

Tabela 02. A *American Water Works Association* (AWWA) e o *Department of Water Resources Water Conservation Office* (DWRWCO) propuseram no *Water Audit and Leak Detection Guidebook* (1992) usar uma média de 0,8 para orifícios circulares e 0,6 para rachaduras em formas de fenda. No entanto, estudos experimentais recentes como YU *et al.* (2019), que utilizam condições de contorno próximas das de campo e tubulações de DN 25 a DN 100 resumidos na Tabela 4, mostraram que os valores de  $C_d$  para orifícios circulares podem variar de 0,62 a 0,85 dependendo da relação orifício-diâmetro e do meio externo da tubulação como por exemplo tubulações aéreas ou tubulações submersas nas hipóteses de solo saturado.

Apesar de até o momento a literatura não contar com estudos que avaliem os riscos e desvios que o uso do  $C_d$  como uma constante pode trazer aos sistemas de detecção e quantificação de vazamentos, de uma maneira geral Ghorbanian e Ramezani (2018) afirmam que o vazamento calculado é sensível as incertezas no coeficiente de descarga. Assim, a precisão da taxa de vazamento calculada depende da estimativa do  $C_d$ .

**Tabela 4** - Resumo do  $C_d$  para vazamentos em tubulações a depende do meio externo e do formato do orifício

| Tipo de Orifício | Meio Externo |                 |
|------------------|--------------|-----------------|
|                  | Ar           | Água (submerso) |
| Circular         | 0,62 - 0,70  | 0,70 - 0,86     |
| Longitudinal     | 0,64 - 0,68  | -               |
| Circunferencial  | 0,60 - 0,66  | -               |

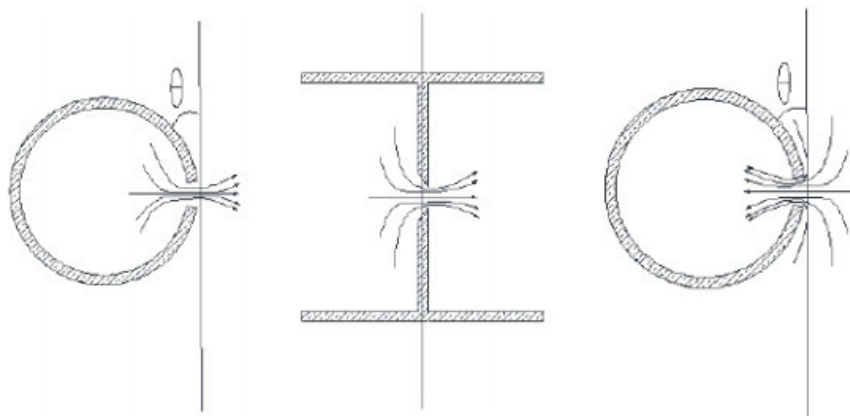
Fonte: Adaptado de YU *et al.*,2019

Em relação à interação de vazamento-solo, vários artigos propõem que o meio externo da tubulação impacta o coeficiente de descarga (COETZER *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2013; YU *et al.*, 2019). Apesar disso, os modelos normalmente assumem as tubulações em um meio externo homogêneo. Latifi *et al.*, 2017 indicam variação do  $C_d$  com o aumento da coesão para solos grossos, bem como aumento do volume de partes finas e argilominerais para siltes.

Além dos fatores citados acima, estudos recentes indicam que as condições de vazão e a convergência das linhas de vazão em direção ao orifício também podem impactar o  $C_d$ , conforme mostra a Figura 10 abaixo. Tal fenômeno é bem conhecido na literatura para placa de orifício, mas pouco reportado para tubulações (VERNNARD e STREET, 1975; THOMAS, 1986; YU *et al.*,2019).



**Figura 10** - Condições de vazamento em tubulações com diferentes curvaturas



Fonte: Yu *et al.* (2019)

### 3.4 Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)

A definição de CFD não é consenso. Para Kundu, Cohen e Dowling (2012) CFD é “encontrar soluções numéricas para as equações de Navier-Stokes ou de Euler em duas ou três dimensões, com o objetivo de obter uma visão física da dinâmica e previsões quantitativas”. Popescu (2014) define CFD da seguinte forma "o campo da ciência que usa computadores e técnicas numéricas para resolver problemas envolvendo fluxo de fluidos."

De qualquer maneira, o CFD consolidou-se na academia científica e, com os avanços tecnológicos, tem sido uma das principais ferramentas para o estudo da hidráulica. Diversos trabalhos na última década utilizando esta ferramenta para estudar vazamentos e intrusões em sistemas de abastecimento de água (MARTINS *et al.*, 2016; AZIMI *et al.*, 2017; ALIHOSSEINI e THAMSEN, 2019).

Trabalhos recentes como de Chen *et al.* (2021) se proem a utilizar o CFD para estudar o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) em vazamentos de gases, e propor equações empíricas e semiempíricas para o  $C_d$  em função de parâmetros geométricos e hidráulicos.

#### 3.4.1 Modelos de Turbulência RANS

Modelos computacionais baseados em simulação numérica direta (*direct numerical simulation* - DNS) resolvem numericamente todo o espectro de equações de Navier-Stokes sem nenhum modelo de turbulência. No entanto, o custo computacional desse tipo de simulação ainda é muito alto, exigindo supercomputadores que não são compatíveis com a rotina da engenharia. Além disso, há casos relatados na literatura e razões para acreditar que em muitos

casos podemos modelar o efeito de pequenas escalas em grandes escalas ou usando médias sem resolver em detalhes todo o espectro das equações (KUNDU, COHEN e DOWLING, 2012). Assim, os modelos de turbulência baseados em *Reynolds averaged Navier-Stokes equation* - RANS são mais usados na prática (WILCOX, 2006; LESCHZINER, 2010).

Na abordagem RANS as flutuações de turbulência são menos importantes, cada variável é decomposta em uma média (média de conjunto ou média de tempo) e componentes flutuantes, assim para qualquer variável escalar  $\theta$  temos:

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad (4)$$

onde  $\theta$  denota uma variável escalar como pressão, energia ou concentração (POPESCU, 2014).

Aplicando essa ideia nas equações de continuidade e conservação do momento de Navier-Stokes, e com um pouco de manipulação matemática, temos as equações RANS apresentadas abaixo em coordenadas cartesianas onde  $u$  representa a velocidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (6)$$

Agora, todas as soluções podem ser descritas por valores de média (ou média de tempo). Entretanto, o termo  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  conhecido como tensões de Reynolds (*Reynolds stresses*) por ter a dimensão de uma tensão deve ser modelado para permitir a solução das equações apresentadas acima.

O método mais usual para modelar este termo é conhecido como hipótese de Boussinesq (Eq. 7). Tal hipótese é usada nos modelos de turbulência RANS e apresenta como principal vantagem um custo computacional relativamente baixo associado ao cálculo da viscosidade turbulenta  $\mu_t$  (*turbulent viscosity* ou *eddy viscosity*) (ANSYS FLUENT, 2018).

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (7)$$

onde  $k$  é a energia cinética de turbulência (*turbulence kinetic energy*).

Uma visão geral dos principais modelos de turbulência RANS é apresentada a seguir.

#### 3.4.1.1 Modelo k-ε

Proposto por Launder e Spalding (1972), o modelo é baseado em duas equações de transporte para a energia cinética de turbulência -  $k$  (Eq.8) e sua taxa de dissipação (*Turbulent dissipation rate* -  $\varepsilon$ ) (Eq.9). A viscosidade turbulenta (Eq.10) é estimada pela combinação de  $k$  e  $\varepsilon$ . Uma das principais hipóteses deste modelo é que o fluido é considerado totalmente turbulento, de modo que os efeitos da viscosidade molecular são desprezados (ANSYS FLUENT, 2018). Apesar da complexidade das equações 7 e 8, a implementação de tal modelo em um computador é relativamente fácil (FERZIGER *et al.*, 2020).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (9)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

onde  $G_k$  é a geração de energia cinética de turbulência devido aos gradientes médios de velocidade,  $G_b$  é a geração de energia cinética de turbulência devido ao empuxo,  $Y_M$  é a dilatação flutuante em turbulência compressível,  $\sigma_k$  é o número de Prandtl turbulento para  $k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  é o número de Prandtl turbulento para  $\varepsilon$ ,  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são termos de origem definidos pelo usuário,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  e  $C_\mu$  são constantes adimensionais empíricas. Mais informações sobre as variáveis apresentadas podem ser consultadas no manual do ANSYS FLUENT.

Os pontos fortes deste modelo e suas limitações são bem conhecidos na literatura, então o ANSYS FLUENT já disponibiliza duas versões mais avançadas deste modelo: o modelo RNG k-ε e o modelo k-ε realizável.

O modelo k-ε de turbulência é considerado um dos melhores e mais confiáveis entre aqueles na família de modelos de duas equações, exceto em regiões com gradientes de pressão adversos, agilização significativa, alta curvatura e alto cisalhamento (CHAMBERS e WILCOX,

1977; BARDINA, 1997)

### 3.4.1.2 Modelo k- $\omega$

Apesar da semelhança das equações com a família de modelos k- $\varepsilon$ , os modelos k- $\omega$  apresentam melhores resultados para fluidos complexos envolvendo grandes gradientes de pressão adversos e separações. Tal modelo oferece vantagens para escoamentos com gradiente de pressão adverso e para escoamentos onde a integração através da subcamada é preferida (WILCOX, 1991).

O segundo modelo mais utilizado após o k- $\varepsilon$ , foi proposto por Wilcox (1998) e se baseia no modelo de duas equações de transporte: energia cinética de turbulência (*turbulence kinetic energy* - k) (Eq.11) e taxa de dissipação específica (*specific dissipation rate* -  $\omega$ ) (Eq.12). Não existe uma definição matemática estrita de  $\omega$ , no entanto, ele pode ser pensado como a razão de  $\varepsilon$  e k (FERZIGER *et al.*, 2020).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (12)$$

onde  $\Gamma_k$  é a difusividade efetiva de k,  $\Gamma_\omega$  é a difusividade efetiva de  $\omega$ ,  $Y_k$  é a dissipação de k devido à turbulência e  $Y_\omega$  é a dissipação de  $\omega$  devido à turbulência. Mais informações sobre as variáveis apresentadas podem ser consultadas no manual do ANSYS FLUENT.

A viscosidade turbulenta é calculada combinando k e  $\omega$  (Eqs. 13 e 14).

$$\mu_t = a^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (13)$$

$$a^* = a_\infty^* \left( \frac{a_0^* + Re_t/R_K}{1 + Re_t/R_K} \right) \quad (14)$$

onde  $Re_t$  é o número de Reynolds turbulento definido como a razão entre as forças turbulentas e as forças viscosas ( $\rho k^2 / \mu \epsilon$ ), e  $a_0^*$ ,  $R_k$  são constantes adimensionais empíricas.

Uma vez que as limitações deste modelo já foram bem relatadas na literatura, o ANSYS FLUENT fornece duas versões avançadas deste modelo: Modelo k- $\omega$  *Baseline* (BSL) e Modelo k- $\omega$  *Shear-Stress Transport* (SST). Os modelos desta família são conhecidos pela sensibilidade das soluções aos valores de k e  $\omega$  fora da camada de cisalhamento (sensibilidade de fluxo livre). No entanto, estratégias e formulações têm sido buscadas para reduzir essa dependência no ANSYS FLUENT (ANSYS FLUENT, 2018).

#### 3.4.1.2.1 Modelo k- $\omega$ SST

O modelo k- $\omega$  SST inclui todos os refinamentos do modelo BSL e ainda leva em consideração o transporte da tensão de cisalhamento de turbulência na definição da viscosidade turbulenta (*turbulence shear stress*) onde origina-se seu nome. Essas novas implementações permitem que esse modelo seja mais preciso e confiável para uma classe mais ampla de fluxos complexos tais como fluxos de gradiente de pressão adversos (MENTER, 1994; ANSYS FLUENT, 2018).

A grande implementação desse modelo é a implementação de um limitador para a formulação da viscosidade turbulenta (Eq. 15). Os demais modelos da família k- $\omega$  não consegue prever adequadamente o início e a quantidade de separação de fluxo de superfícies lisas uma vez que eles não levam em conta o transporte da tensão de cisalhamento turbulenta o que resulta em uma previsão exagerada da viscosidade turbulenta (ANSYS FLUENT, 2018).

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (15)$$

onde  $S$  é a magnitude da taxa de deformação, e  $a^*$  e  $F_2$  são definidos da seguinte maneira:

$$a^* = a_\infty^* \left( \frac{a_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (16)$$

onde  $R_k = 6$ ,  $a_0^* = \beta_i/3$  e  $\beta_i = 0,072$  são constantes adimensionais empíricas.

$$F_2 = \tanh (\phi_2^2) \quad (17)$$

$$\phi_2 = \max \left[ 2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (18)$$

onde  $y$  é a distância até a superfície mais próxima.

Todas as demais constantes de modelo ( $a_\infty^*$ ,  $a_\infty$ ,  $a_0$ ,  $\beta_\infty^*$ ,  $R_\beta$ ,  $R_k$ ,  $\zeta^*$  e  $M_{t0}$ ) têm os mesmos valores que para modelo k- $\omega$  padrão.

### 3.4.2 Estudo de Vazamento de Água com CFD

Usando modelagem CFD, Shehadeh *et al.* (2012) concluíram que a intensidade da turbulência é diretamente proporcional à vazão mássica de vazamento. Tais resultados podem auxiliar na detecção de vazamentos e na estimativa da perda de água, uma vez que a intensidade da turbulência pode ser estimada por meio de métodos acústicos de detecção de vazamentos.

A modelagem e os experimentos CFD mostram a influência do vazamento no gradiente de pressão ao longo dos diferentes caminhos de fluxo dentro da tubulação, que podem ser integrados a um modelo ou ferramenta para detecção de vazamento por perda de pressão (BEN-MANSOUR *et al.*, 2012; YU *et al.*, 2019).

Simulações de computador usando modelagem CFD mostram-se promissoras na estimativa do coeficiente de descarga para diferentes condições de contorno (AZIMI *et al.*, 2017). No entanto, o uso de CFD para estudos de vazamento ainda é restrito a vazamentos de gás e óleo (CHEN *et al.* 2021).

O avanço do poder computacional e a popularidade de softwares comerciais como o ANSYS FLUENT podem levar a futuros estudos que busquem integrar CFD em modelos de detecção de vazamentos e estudo do coeficiente de descarga como de Ferraiuolo *et al.* (2020).

## 4 MATERIAL E MÉTODO

Os estudos CFD foram realizados no software ANSYS FLUENT para simular os dados experimentais disponíveis na literatura, como os de Yu *et al.* (2019). Dessa maneira, as condições de contorno introduzidas e simuladas no presente trabalho são relacionadas a estes dados experimentais.

### 4.1 Material

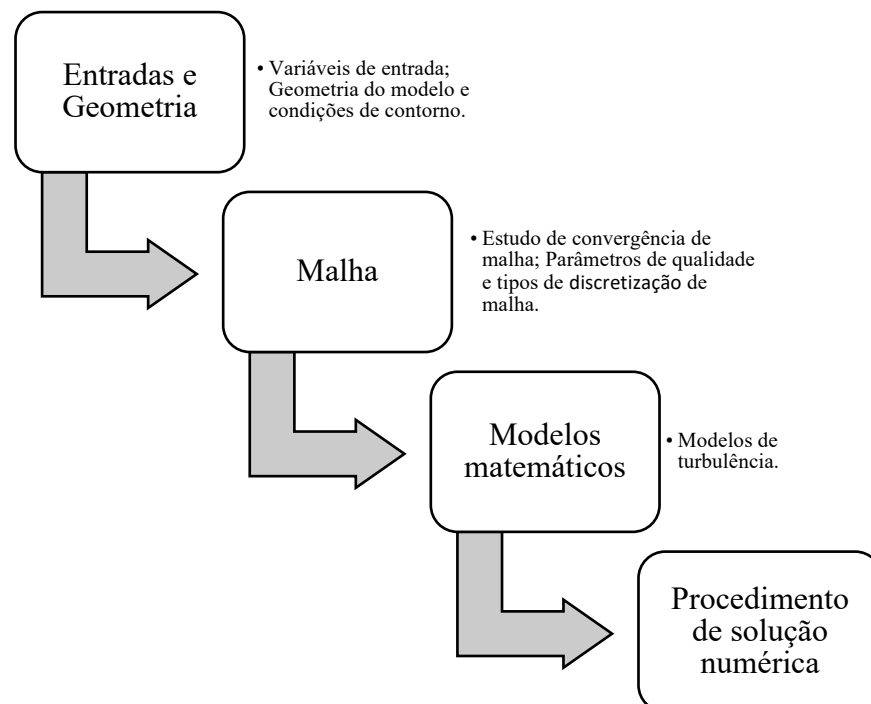
Os seguintes softwares foram utilizados na pesquisa:

- ANSYS FLUENT 2020 R1 versão estudantil
- Anaconda IDE – uso da linguagem de programação Python
- Microsoft Excel Version 2017
- LAB Fit
- Software Global Mapper

### 4.2 Estudo Computacional CFD

Um sumário dos principais passos chaves da modelagem CFD é apresentada no fluxograma abaixo.

**Figura 11** - Sumário dos passos chaves de uma modelagem CFD



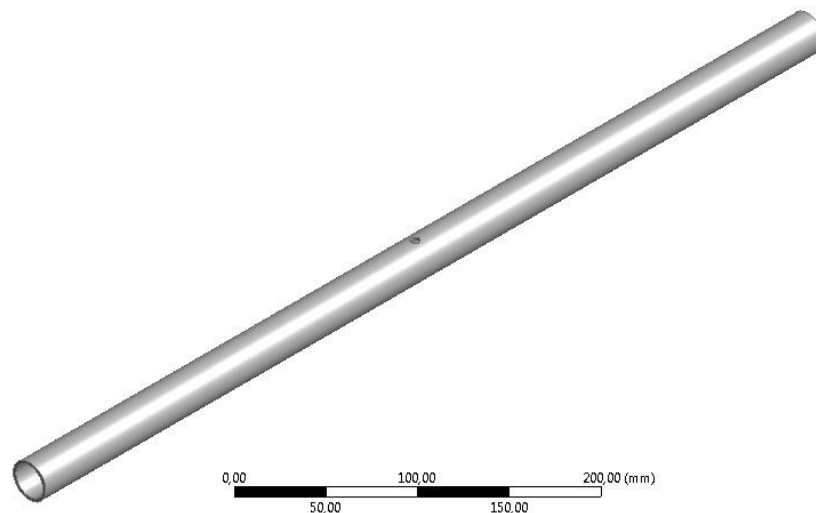
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.2.1 Entradas e Geometrias

As variáveis de entrada para o modelo foram escolhidas baseada em dois critérios: quais variáveis estão disponíveis nos dados experimentais disponíveis na literatura e quais variáveis e combinações de variáveis são aceitas pelo software ANSYS FLUENT. Dessa maneira, as condições de contorno e a geometria das simulações foram limitadas pelos dados experimentais disponíveis. Assim, as entradas foram as pressões e velocidades a 30 cm a montante e a jusante dos orifícios nas tubulações de DN 25, DN 50 e DN 100 com orifícios circulares de 3 e 6 mm de diâmetro como apresentado no trabalho experimental de Yu *et al.* (2019).

A seguir é apresentada a geometria para a tubulação de DN 25 com orifício circular de 3 mm de diâmetro (Figura 12). Na Tabela 05 são apresentadas as principais condições de contorno adotadas nestas geometrias.

**Figura 12** - Geometria da tubulação DN 25 com orifício circular de 3mm de diâmetro com comprimento total de 60 cm (30 cm a montante e a jusante do orifício)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 5** - Resumo das condições de contorno escolhidas por localização

| Localização da condição de contorno | Tipo de condição de contorno |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Entrada                             | <i>mass-flow-inlet</i>       |
| Saída                               | <i>pressure outlet</i>       |
| Orifício                            | <i>pressure outlet</i>       |
| Superfície da tubulação             | <i>wall</i>                  |
| Interior da tubulação               | <i>interior</i>              |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.



#### 4.2.2 Malha

Uma estimativa inicial do tamanho dos elementos da malha foi feita por meio das equações empíricas de Schlichting e Gersten (2017). Após essa primeira estimativa, foi feita um estudo de convergência da malha onde foi observada a convergência dos resultados, e os parâmetros de qualidade da malha, no quais os dois principais parâmetros analisados foram *Skewnees* que deve ser menor que 0,50 e *Orghogonal Quality* que deve ser maior que 0,70 para garantir uma convergência de modelos testados (ANSYS FLUENT, 2018). Vale ressaltar que a versão estudantil do software utilizado tem uma limitação no número de elementos de malha de 512.000, portanto, o procedimento de estudo de convergência de malha foi interrompido na maioria das simulações avaliadas por conta dessa limitação.

Além disso, outro parâmetro analisado para definir o tamanho do elemento malha foi o parâmetro adimensional  $y^+$  uma vez que cada modelo de turbulência exige uma faixa desse parâmetro para garantir a sua confiabilidade e acurácia (ANSYS FLUENT, 2018). Em seguida, diferentes tipos de discretização de malha foram testados a fim de obter a melhor qualidade nos parâmetros citados acima. Os melhores resultados foram obtidos com a discretização do tipo *smooth transition inflation* onde foi concentrado mais elementos de malha na parede da tubulação, região importante para o estudo.

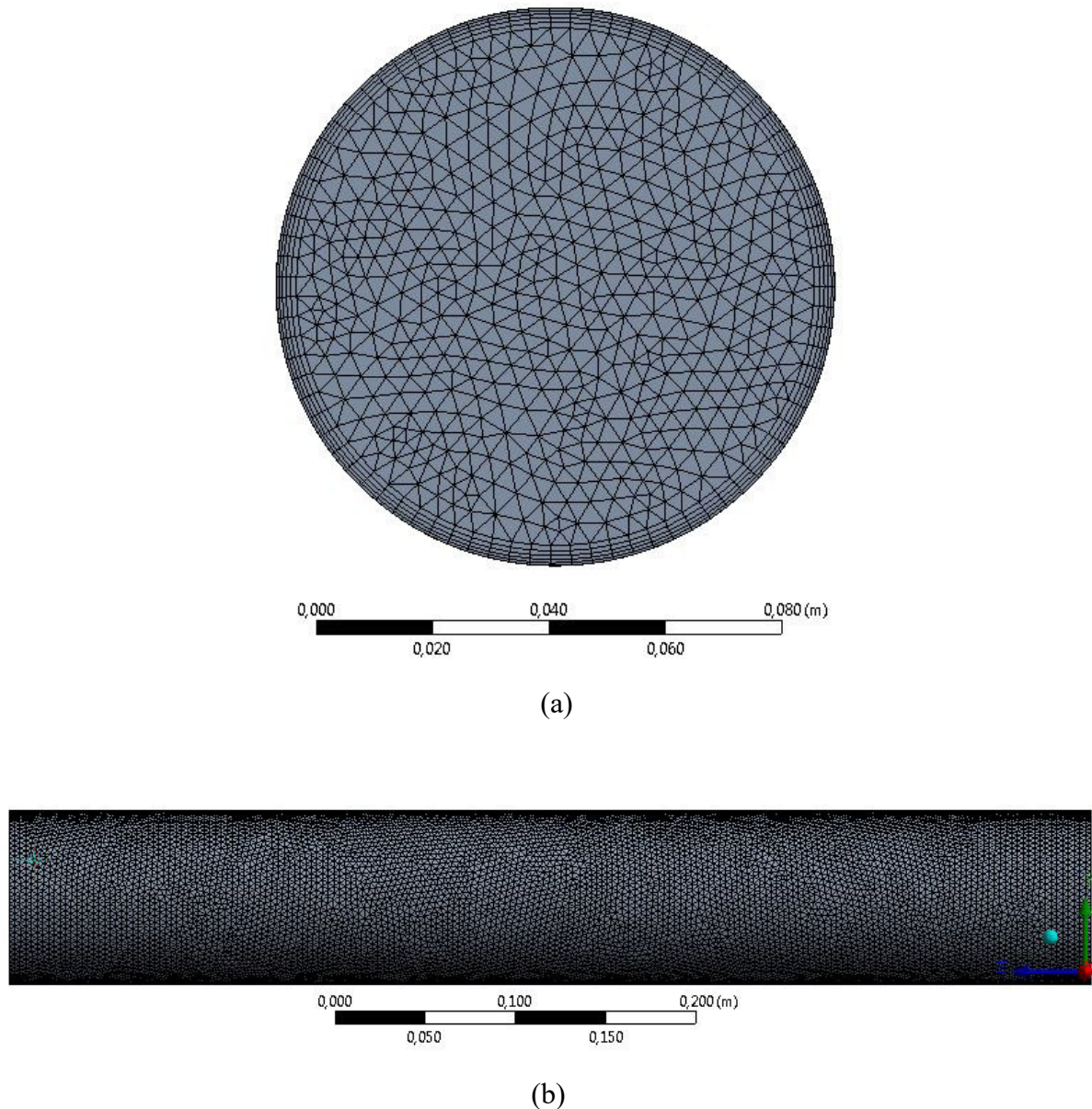
A malha de uma geometria é apresentada na Figura 13, e os principais parâmetros são apresentados na Tabela 06.

**Tabela 6** - Principais parâmetros de qualidade de malha analisados neste trabalho

| Geometria | Elemento de malha (mm) | <i>Skewnees</i> |           | <i>Orghogonal Quality</i> |           |
|-----------|------------------------|-----------------|-----------|---------------------------|-----------|
| DN25      | 1,6                    | 0,25            | Very good | 0,76                      | Very good |
| DN50      | 2,3                    | 0,21            | Excellent | 0,81                      | Very good |
| DN100     | 3,5                    | 0,21            | Excellent | 0,80                      | Very good |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 13** - Secção longitudinal (a) e circunferencial (b) da geometria DN 100: aproximadamente 512.000 elementos lançados na malha do ANSYS FLUENT.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.2.3 Modelos de Turbulência

Devido à limitação computacional, os principais modelos RANS foram testados, ou seja, as famílias de modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ . A escolha dos modelos é limitada pela malha, pois cada modelo possui a faixa do parâmetro  $y^+$  definida. Os modelos estão bem descritos na literatura, portanto os benefícios e limitações de cada modelo também foram considerados na escolha final

do melhor modelo.

O software ANSYS FLUENT permite a alteração dos modelos, porém, neste trabalho de conclusão de curso apenas as alterações já disponíveis no software foram testadas pois a calibração das variáveis adimensionais empírica dos modelos de turbulência exigiria uma grande base de dados de resultados experimentais.

As alterações realizadas foram feitas por meio de funções bem conhecidas na literatura como *production Kato-Launder* e *production limiter*. Tais alterações são usualmente usadas para evitar o acúmulo de energia cinética turbulenta nas regiões de estagnação uma vez que uma desvantagem das famílias dos modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  é a geração excessiva de energia de turbulência  $G_k$  próximos aos pontos de estagnação (KATO e LAUNDER, 1993; ANSYS FLUENT, 2018).

O modelo  $k-\varepsilon$  é solucionado em todo o domínio incluindo as células adjacentes à parede, assim todas as condições de contorno de parede para as variáveis de solução, tais como velocidade média, temperatura, concentração,  $k$  e  $\varepsilon$  são todas resolvidas através de *wall functions*. O software ANSYS FLUENT apresenta várias *wall functions*, foi utilizada a *Scalable Wall Functions* por ser a sugerida pelo software e uma das mais utilizadas na engenharia. Tal função evita a modelagem errônea das regiões laminar e *buffer* da camada limite, deslocando efetivamente o ponto de malha próximo à parede para  $y^+$  igual 11,126 independentemente da proximidade da parede (GROTJANS e MENTER, 1998; ANSYS FLUENT, 2018).

Na Tabela 07 são apresentados os parâmetros gerais da análise CFD desse trabalho, e na Tabela 08 são apresentados os principais modelos de turbulência utilizados e as principais configurações atribuídas a esses modelos.

**Tabela 7** - Parâmetros gerais do CFD usados neste trabalho

| Parâmetro | Setting                |
|-----------|------------------------|
| Dimensão  | 3D                     |
| Tipo      | Pressure-Based         |
| Tempo     | Steady                 |
| Gravidade | -9,81 m/s <sup>2</sup> |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 8** - Principais parâmetros dos principais modelos de turbulência utilizados

| Configuração modelos de turbulência |   |                            |                                |
|-------------------------------------|---|----------------------------|--------------------------------|
| Modelo                              | k- $\omega$                                       | Modelo                     | k- $\epsilon$                  |
| Tipo do modelo                      | SST   | Tipo do modelo             | Standard                       |
|                                     |   | <i>Near-Wall Treatment</i> | <i>Scalable Wall Functions</i> |
| Modificações                        | <i>Production Kato-Lauder; Production Limiter</i> | Modificações               | <i>Production Kato-Lauder</i>  |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.2.4 Método de Solução Numérica

As etapas apresentadas até o momento contemplam a decomposição do domínio do volume de controle; a formulação de equações de transporte para cada volume de controle; a aproximação numérica das integrais; a aproximação dos valores das variáveis nas faces e das derivadas com as informações das variáveis nodais, agora, é necessário montar e resolver o sistema algébrico obtido.

**Tabela 9** - Principais parâmetros do método de inicialização e de solução do sistema de equações

| Método de solução                |  |
|----------------------------------|--|
| Tipo                             | <i>Pressure-Velocity Coupling</i>  |
| Esquema                          | SIMPLEC  |
| Discretização Espacial           |  |
| Gradiente                        | <i>Least Squares Cell Based</i>  |
| Pressão                          | <i>Second Order</i>  |
| Momento                          | <i>Second Order Upwind</i>   |
| <i>Turbulent Kinetic Energy</i>  | <i>Second Order Upwind</i>   |
| <i>Specific Dissipation Rate</i> | <i>Second Order Upwind</i>   |
| Inicialização                    |  |
| Tipo                             | <i>Hybrid Initialization</i>   |
| Critério de convergência         | $10^{-3}$ (Q, V <sub>x</sub> , V <sub>y</sub> , V <sub>z</sub> , k, $\omega$ ou $\epsilon^*$ ) |
| Número máximo de iterações       | 10.000   |

\* A depender do modelo de turbulência adotado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para resolver o sistema algébrico obtido, precisa-se escolher o procedimento de solução numérica. Para entradas de velocidade e pressão (*Pressure-Based*), quatro tipos de algoritmos de solução estão disponíveis no ANSYS FLUENT: SIMPLE, SIMPLEC, PISO e Fractional Step (FSM). Assim, os algoritmos mais simples com um grau de discretização de ordem 1 foram usados inicialmente.

Em seguida, foram testados os algoritmos mais robustos com maiores graus de discretização levando em consideração a relação desvio numérico e custo computacional.

Na Tabela 09 são apresentados os principais parâmetros da etapa de solução numérica do presente trabalho.

### 4.3 Verificação, Calibração e Validação dos Resultados

Apesar do uso intercambiável entre verificação, calibração e validação, em estudos computacionais os termos representam etapas importantes diferentes (POPESCU, 2014). Dessa maneira, essa etapa do presente trabalho se divide nas etapas de verificação e validação dos modelos e, quando oportuno, calibrações de parâmetros foram realizadas respeitando os limites propostos na literatura antes da etapa de validação uma vez que os modelos de turbulência por definição apresentam certo grau de empirismo. A Figura 14 apresenta um resumo dessas etapas.

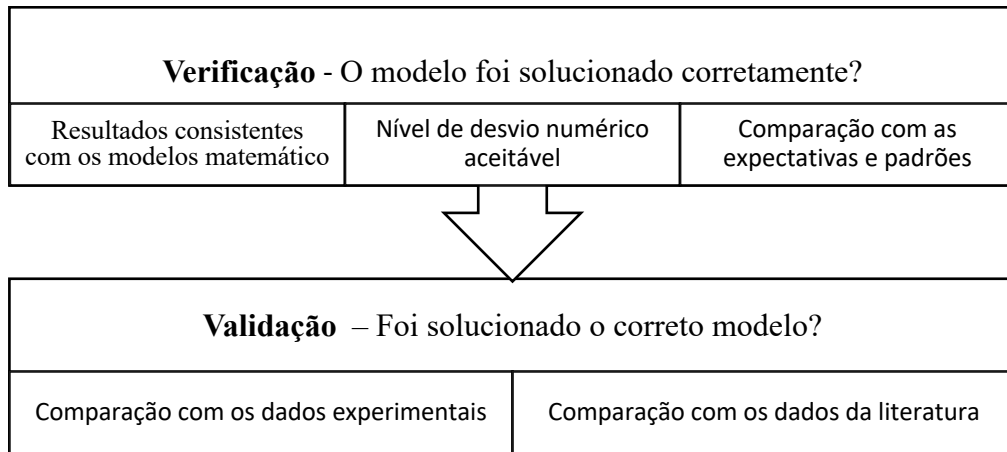
Entretanto, antes de avaliar os resultados, é necessário definir quando o modelo converge. A convergência de um procedimento numérico é geralmente definida como a combinação de duas propriedades: consistência e estabilidade. Para a maioria dos softwares, incluindo o usado neste trabalho final do curso, a convergência padrão é estabelecida quando os resíduos são menores que  $10^{-3}$  (TU *et al*, 2018).

Ainda assim, as simulações que possuem os seguintes aspectos também foram consideradas como estabilizadas e consistentes:

- Balanços gerais de massa, quantidade de movimento, energia e escalares alcançados;
- A energia residual escalonada foi inferior a  $10^{-6}$  (para o solucionador baseado em pressão (*Pressure-Based*) que é o caso deste trabalho);
- Variáveis-chave como pressão e velocidade permanecem constantes.

Uma vez estabelecido o critério de convergência, foi realizada as etapas de verificação e validação das simulações.

Figura 14 - Resumo das etapas de verificação e validação em uma modelagem CFD



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.3.1 Verificação

Nesta etapa, a questão a ser respondida é se o modelo foi resolvido corretamente. Para isso, foi avaliado se os resultados foram consistentes com o modelo matemático, uma vez que se conhece as limitações e hipóteses de cada modelo escolhido.

Foi avaliado se o desvio numérico apresentado foi aceitável, limitado a um desvio de 5%. A avaliação desse foi feita conhecendo as condições de contorno e os modelos escolhidos, por exemplo, sabe-se que as *Essential Boundary Conditions* devem apresentar resultados exatos uma vez que estão integradas no sistema algébrico de equações, porém, as *Natural Boundary Conditions* apresentam resultados mais precisos quanto mais bem definida for a malha e mais robusto for o algoritmo de solução numérica.

Ao final, foi avaliado se os resultados atendem às expectativas e as tendências esperadas de cada modelo.

Ou seja, os três passos abaixo foram seguidos para verificar cada simulação:

- Avaliar a consistência dos resultados com as hipóteses e limitações dos modelos de turbulência escolhidos;
- Avaliar o desvio numérico das simulações através das condições de contorno;
- Avaliar a coerência dos resultados com base nas tendências esperadas.

### 4.3.2 Validação

Após a etapa de verificação, pode-se passar a etapa de validação das simulações. Para isso, cada simulação para cada condição de contorno foi calibrada com os dados experimentais disponíveis através dos parâmetros *Turbulent Intensity* e *Turbulent Viscosity Ratio*, respeitando os limites estabelecidos na literatura.

Onde *Turbulent Intensity* é definida como a razão entre a raiz quadrada média (*root-mean-square*) das flutuações de velocidade  $u'$  e a velocidade média do fluxo  $u_{avg}$ . Para o caso desse trabalho de escoamentos interno, tal parâmetro é totalmente dependente do comportamento a montante. Uma primeira estimativa foi realizada seguindo a correlação empírica abaixo (Eq. 19) (ANSYS FLUENT, 2018).

$$I := \frac{u'}{u_{avg}} = 0,16 Re^{-1/8} \quad (19)$$

*Turbulent Viscosity Ratio* é definida como a razão entre a viscosidade turbulenta  $\mu_t$  e a viscosidade dinâmica  $\mu$ . Uma primeira estimativa foi realizada seguindo o valor padrão do ANSYS FLUENT de 10 (ANSYS FLUENT, 2018).

Em seguida, os resultados de saída das simulações foram comparados com os resultados experimentais disponíveis na literatura, como os de Yu *et al.* (2019), e com as faixas de valores encontradas na literatura a fim de validar os modelos de turbulência utilizados.

## 4.4 Pós-processamento

Considerou-se a hipótese de que a área do orifício não varia com a pressão, pois: o trabalho se propõe a estudar tubulações de aço; as cargas simuladas não excederam 50 m.c.a; os orifícios circulares não deformam com facilidade com o aumento da pressão; o valor teórico de  $\beta$  se mantém próximo de 0,5 para orifícios circulares (GREYVENSTEIN e VAN ZYL, 2007; CASSA *et al.* 2010)

Dessa maneira, pode-se calcular o  $C_d$  através da Equação de Torricelli (Eq.1) apresentada na introdução deste trabalho, uma vez que os demais parâmetros da equação são conhecidos através das simulações.

De posse dos modelos calibrados e validados, simulou-se a hidrodinâmica de vazamentos para os dados experimentais disponíveis na literatura, como os de Yu *et al.* (2019), considerando mais de 120 diferentes condições de contorno relacionadas a fatores geométricos, hidráulicos e hidrodinâmicos.

Foram realizados pós-processamentos que consistem na coleta dos dados de velocidade, pressão, turbulência, entre outras grandezas, e na análise, por exemplo, de gradientes de pressão e velocidade, linhas de corrente, e esforços gerados nas tubulações. Tais pós-processamentos foram realizados de modo a identificar as principais variáveis que influenciam nos vazamentos em tubulações.

#### 4.5 Equações Empíricas

A fim de encontrar correlações entre o coeficiente de descarga e parâmetros adimensionais propostos na presente pesquisa foi feita uma análise de regressão múltipla não-linear utilizando o Algoritmo de Levenberg–Marquardt com auxílio da linguagem de programação Python, e dos softwares Excel e LabFit. Foram escolhidos os adimensionais que melhor explicam o fenômeno de vazamento de água em tubulações com base no parâmetro R-quadrado.

Um resumo dos principais parâmetros utilizados análise de regressão múltipla não-linear é apresentado na tabela 10, abaixo:

**Tabela 10** - Principais parâmetros da análise de regressão múltipla não-linear

| Análise de regressão múltipla não-linear |                     |
|--|---------------------|
| Algoritmo                                | Levenberg–Marquardt |
| Número de Parâmetros                     | 3 e 4*              |
| Número máximo de iterações               | 300                 |
| Critério de convergência                 | $10^{-6}$           |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.6 Aplicação dos Resultados

Como aplicação prática deste trabalho, foram selecionadas e avaliadas cinco adutoras localizadas no Estado do Ceará. As principais informações dessas adutoras constam na Tabela 11, as quais foram extraídas do atlas da COGERH (2021). As adutoras são representadas em



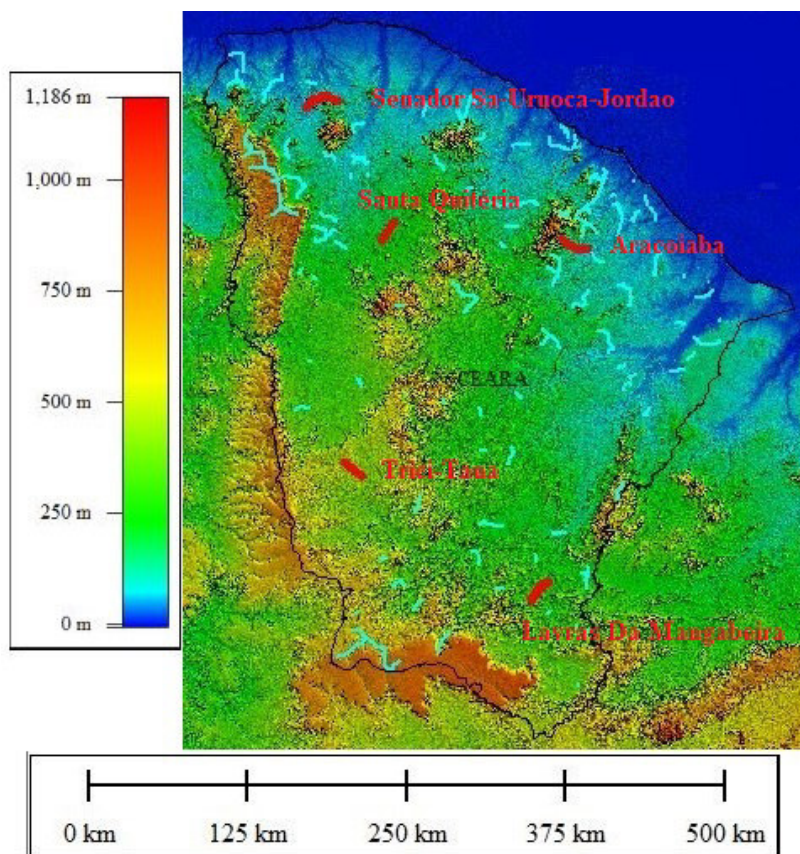
vermelho na Figura 15.

**Tabela 11** - Principais características das adutoras selecionadas

| Adutora                  | Municípios           | Fonte Hídrica       | População Beneficiada (hab.) | Vazão (l/s) | Extensão (km) | D (mm) |
|--------------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|-------------|---------------|--------|
| Santa Quitéria           | Santa Quitéria       | Açude Edson Queiroz | 14.000                       | 30,00       | 16,87         | 200    |
| Aracoiaba                | Aracoiaba;Baturité   | Açude Aracoiaba     | 50.719                       | 133,60      | 24,89         | 350    |
| Senador Sa-Uruoca-Jordao | Uruoca; Senador Sá   | Rio Coreau          | 9.625                        | 17,93       | 33,03         | 150    |
| Trici-Taua               | Tauá                 | Açude Trici         | 26.000                       | 52,00       | 19,60         | 300    |
| Lavras Da Mangabeira     | Lavras da Mangabeira | Açude Rosário       | 20.634                       | 40,5        | 25,96         | 250    |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 15** - MDE do Estado do Ceará com as principais adutoras da COGERH destacado em vermelho as cinco adutoras utilizadas neste trabalho



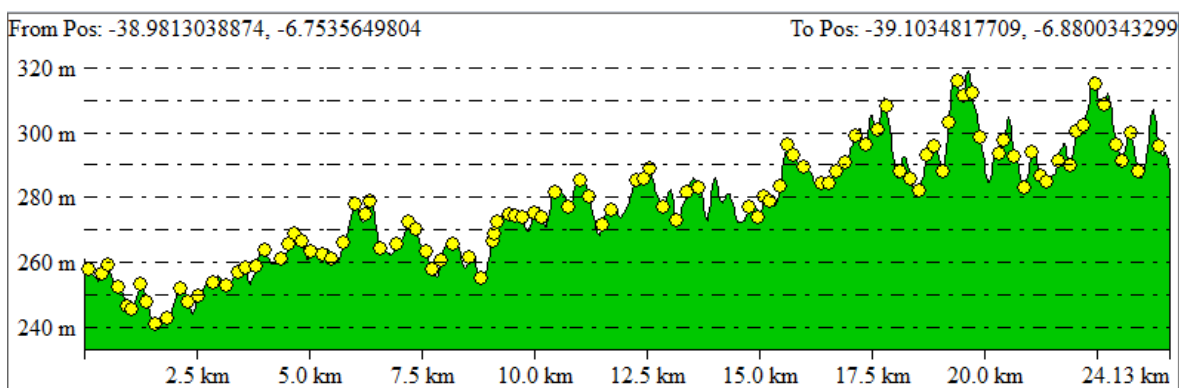
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir das informações do traçado das adutoras, e do Modelo Digital de Elevação (MDE) extraído do projeto Topodata, pode-se estimar as pressões de operação máxima das adutoras (VALERIANO *et al.*, 2008).

Utilizando o software Global Mapper, verificou-se a elevação das adutoras como mostrado na Figura 16. Foi considerada a hipótese de que a carga nos reservatórios é constante e igual a 2 m.c.a, e que a rugosidade absoluta das tubulações de aço é de 1,0 mm (PORTO, 2006). Em seguida, o fator de atrito foi calculado pela equação de Swamee-Jain, a perda de carga pela equação universal de Darcy-Weibach, e a carga nas adutoras pelo princípio da conservação da Energia, como no trabalho de Yao *et al.* (2020).

Ao final, foi realizado um estudo com cenários de vazamentos, bem como uma comparação entre as correlações obtidas neste trabalho e os valores de  $C_d$  tradicionais tais como as constantes de 0,8, indicada pela *Department of Water Resources Water Conservation Office* (DWRWCO) para orifícios circulares, e de 0,67, usualmente adotada em trabalhos acadêmicos e na prática (GREYVENSTEIN e VAN ZYL, 2007; CASSA *et al.*, 2010).

**Figura 16** - Exemplo de elevação da adutora de Lavras Da Mangabeira extraída com auxílio do software Global Mapper.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da família de modelos de turbulência k- $\epsilon$ , o k- $\epsilon$  *standard* apresentou os melhores resultados e convergiu nas seis geometrias simuladas. Na família de modelos k- $\omega$ , o modelo k- $\omega$  SST apresentou os melhores resultados, convergindo nas três geometrias com orifícios circulares de 6 mm. O k- $\omega$  SST certamente não convergiu para as geometrias com orifício de 3 mm pela limitação da malha.

De uma maneira geral o  $C_d$  das simulações apresentou um desvio positivo máximo de em torno de 7% em comparação com os dados experimentais disponíveis na literatura e utilizados neste trabalho. Tais valores apresentaram uma faixa de variação de 0,67 a 0,75, ou seja, maiores do que os valores usualmente utilizados como reportado na Tabela 02, entretanto em coerência com os trabalhos experimentais de Shao *et al.* (2019a, b) e Yu *et al.* (2019).

O modelo k- $\omega$  SST apresentou um desvio médio em torno de 3,88%, enquanto o modelo k- $\epsilon$  *standard* apresentou um desvio médio de 4,80%, quando comparados com o  $C_d$  dos dados experimentais de Yu *et al.* (2019) nas geometrias com orifício circular de 6 mm, como apresentado na Figura 17.

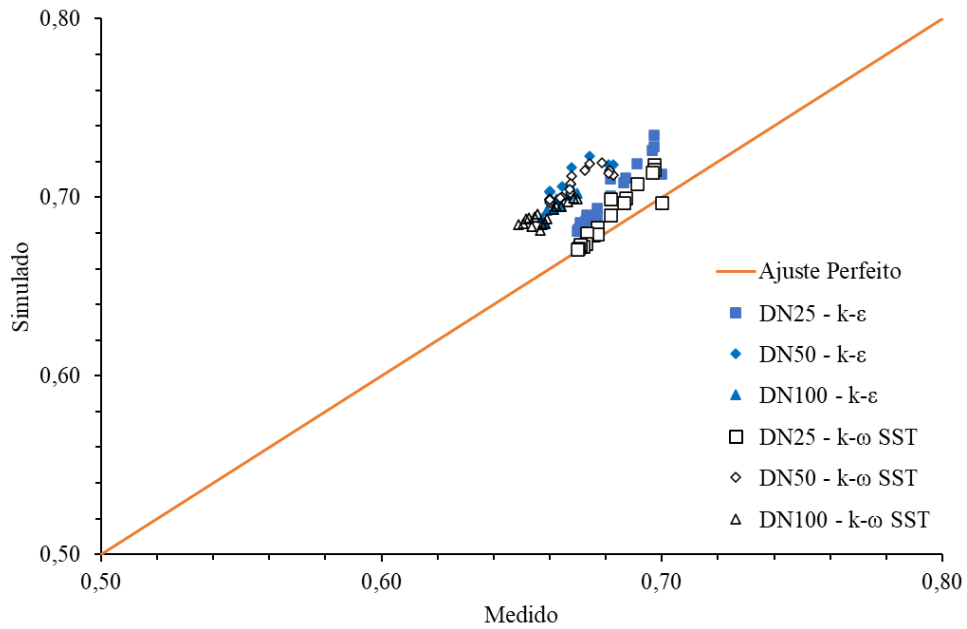
Apesar de o modelo k- $\epsilon$  ser um dos primeiros modelos formulados, para situações em que o comportamento do fluxo não é significativamente afetado pela estrutura de turbulência, o modelo apresenta bons resultados para as tendências no campo de fluxo em um orifício como apresentado em estudos 2D de Erdal e Andersson (1997).

O melhor resultado do modelo k- $\omega$  SST para o caso de separação de fluidos em comparação a família k- $\epsilon$  já está bem reportado na literatura. Entretanto, a limitação da malha comprometeu o total desenvolvimento deste modelo, uma vez que o  $y^+$  médio ficou na faixa de 5 a 8, enquanto as recomendações praticas são de  $y^+ < 1$  para o aproveitamento máximo deste modelo (MENTER 1994; ANSYS FLUENT, 2018; LOYSEAU *et al.*, 2018).

Em relação aos resultados para o k- $\epsilon$  *standard* apresentados na Figura 18, percebe-se que o modelo apresentou melhores resultados para as geometrias com orifícios de 6 mm em comparação aos de 3mm, e melhores resultados para as geometrias DN 25. Isso se deve à deterioração da qualidade da malha por conta da limitação do número de elementos, como apresentado na Tabela 06.

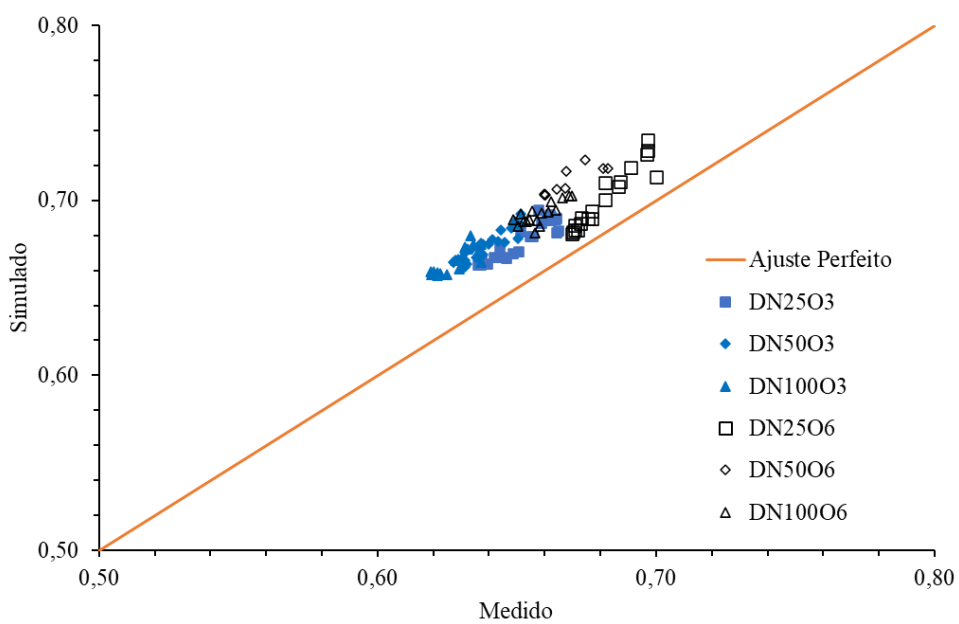
Os resultados indicam que a modelagem CFD pode ser uma ferramenta para o estudo de vazamentos e do coeficiente de descarga como mostrado por BEN-MANSOUR *et al.* (2012) e AZIMI *et al.* (2017) em trabalhos para tubulações de óleo e gás.

**Figura 17** - Comparação entre o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  e modelo de turbulência  $k-\omega$  SST através do  $C_d$  simulado e experimental para os casos com orifício circular de 6 mm em função do diâmetro da tubulação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 18** - Comparação do desempenho do modelo de turbulência  $k-\epsilon$  através do  $C_d$  simulado e experimental entre os casos com orifício circular de 3mm (O3) e de 6mm (O6) em função do diâmetro da tubulação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

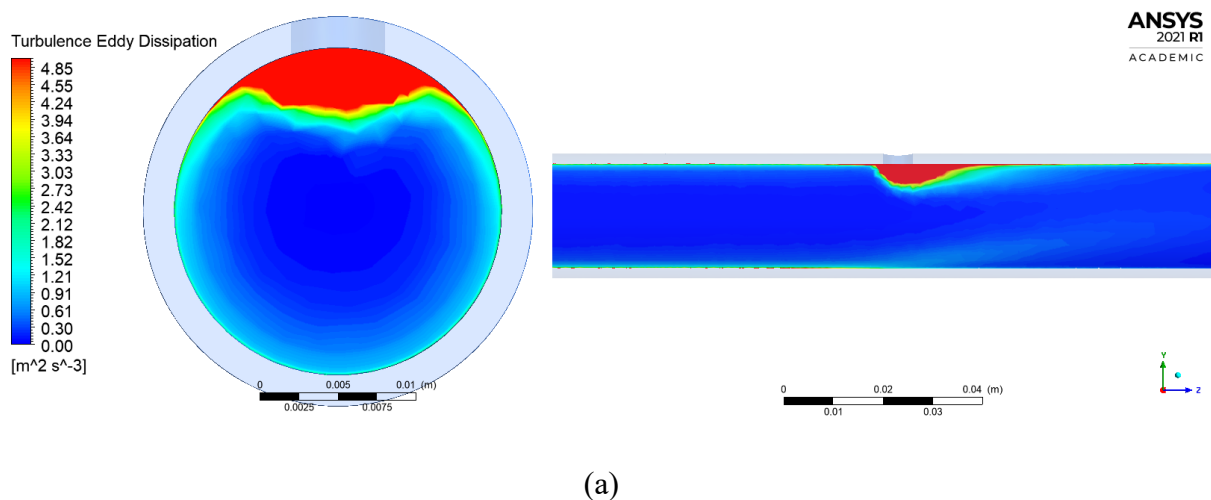
#### 4.1 Implicação das Linhas de Fluxo no $C_d$

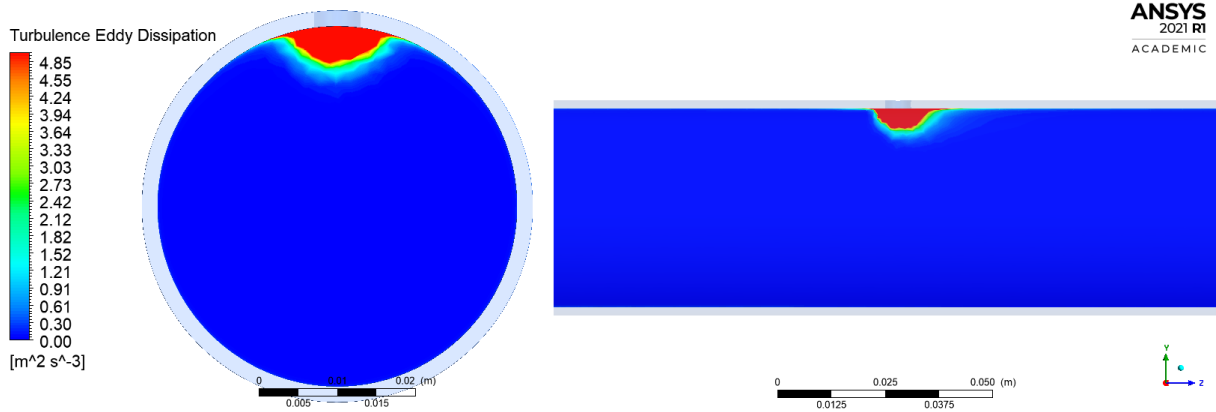
Ao todo foram simuladas mais de 20 condições de contorno para cada geometria, totalizando mais de 120 simulações. Nas Figuras 19 e 20 é apresentado um pós-processamento típico, como observado nas demais simulações utilizando o modelo *k-ε standard*.

A Figura 19 indica o comportamento de  $\epsilon$  nas simulações que representa as cascatas de energia de grandes a pequenos redemoinhos que são eventualmente convertidas em energia térmica interna (KUNDU, COHEN e DOWLING, 2012). Quando analisados em conjunto com a Figura 20 os resultados indicam que o orifício circular de 6 mm tem maior capacidade de ação no menor diâmetro, causando um desvio mais eficiente das linhas de fluxo, e por consequência, maior turbulência para uma mesma carga, como observado na Figura 19.

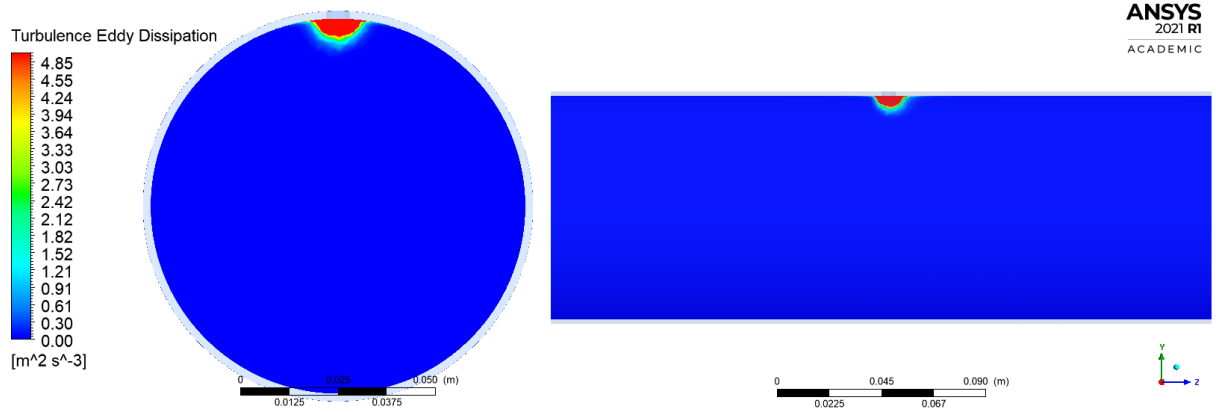
A quantificação desses resultados é apresentada na Tabela 12 que indica a tendência de que para uma mesma carga e um mesmo orifício, quanto menor o diâmetro, maior a quantidade de linhas de fluxo que convergem para o orifício, sendo maior o coeficiente de descarga. Tal resultado é coerente com os resultados experimentais apresentados por Shao *et al.* (2019b) e Yu *et al.* (2019).

**Figura 19** - Simulação de  $\epsilon$  na seção circunferência e longitudinal do orifício nas geometrias com orifício circular de 6 mm para carga em torno de 4 m.c.a em função do diâmetro: (a) DN 25; (b) DN 50; (c) DN 100





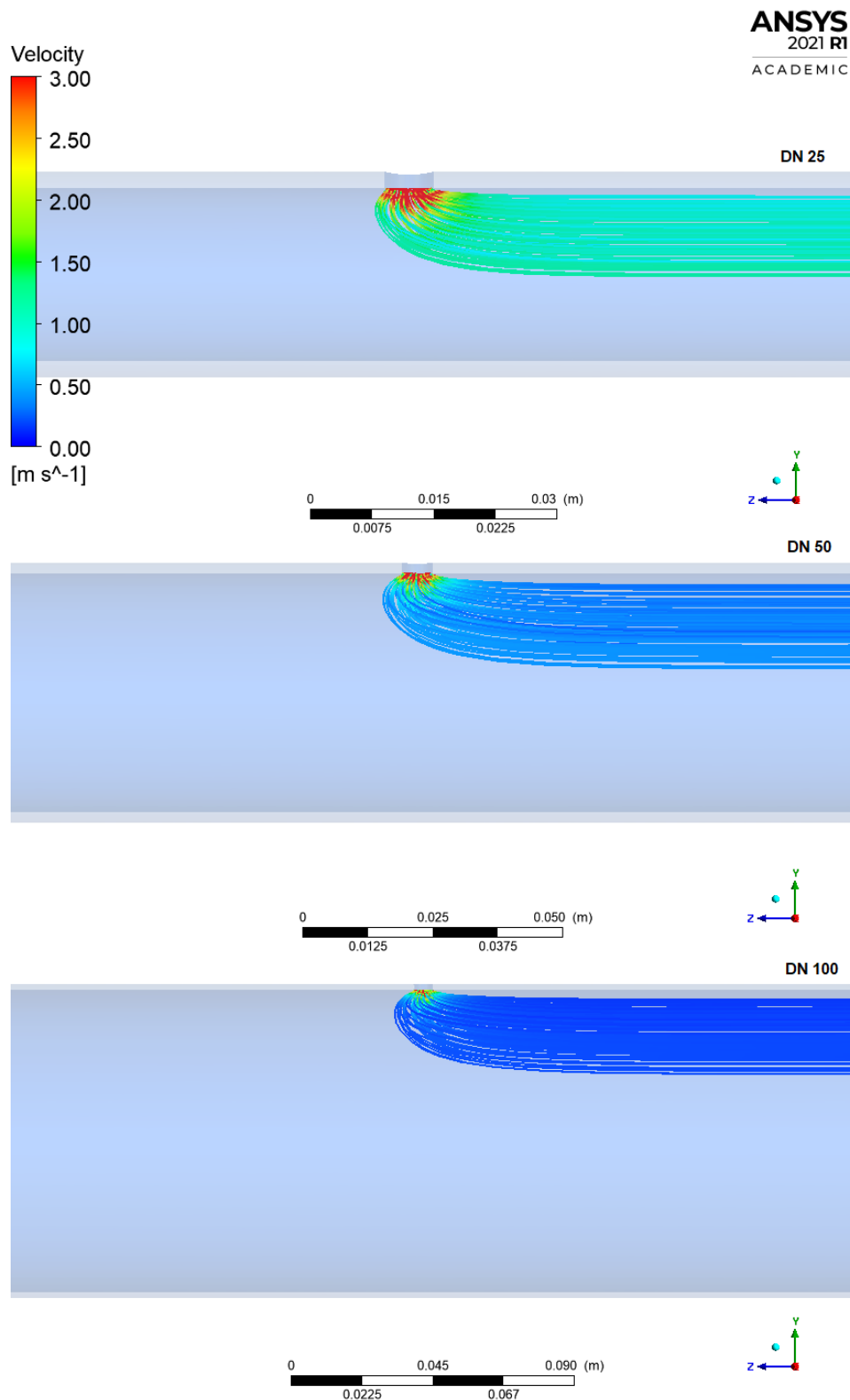
(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 20** - Linhas de corrente em direção ao orifício nas geometrias com orifício circular de 6 mm para carga em torno de 4 m.c.a em função do diâmetro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 12** - Principais dados do pós-processamento para um caso típico de geometria com orifício circular de 6 mm para carga em torno de 4 m.c.a em função do diâmetro.

|       | $\Delta H$<br>(m.c.a) | $C_d$<br>Medido | $C_d$<br>Simulado | Quantidade<br>de fluxo<br>saindo pelo<br>orifício<br>(%) | Integral de $\varepsilon$ na<br>seção<br>circunferencial do<br>orifício<br>[[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]/(m <sup>2</sup> )]<br>(10e <sup>-3</sup> ) | Integral de $\varepsilon$ no<br>volume<br>[[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]/(m <sup>3</sup> )]<br>(10e <sup>-5</sup> ) |
|-------|-----------------------|-----------------|-------------------|--|--|---|
| DN25  | 4,07                  | 0,6971          | 0,7346            | 49,30  | 8,1805   | 9,8683  |
| DN50  | 4,00                  | 0,6814          | 0,7200            | 30,42  | 5,2758   | 4,7286  |
| DN100 | 4,02                  | 0,6686          | 0,7027            | 14,91  | 4,9455   | 3,6671  |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

## 4.2 Correlações Adimensionais

Uma vez estabelecido que o  $C_d$  é variável com a relação orifício-diâmetro ( $d/D$ ), buscou-se através de regressão múltipla não-linear encontrar outros parâmetros adimensionais que explicassem a variação de  $C_d$  com as condições de contorno hidráulicas-hidrodinâmicas.

Os dois melhores adimensionais encontrados foram  $\Delta H/D$  e  $Re$ . Ou seja,  $C_d$  foi expresso em função de  $d/D$ ,  $\Delta H/D$  e  $Re$  em concordância com os trabalhos experimentais de Shao *et al.* (2019b) e Yu *et al.* (2019).

Os resultados são apresentados na Tabela 13, utilizando os dados experimentais disponíveis na literatura, e na Tabela 14 utilizando os dados das simulações. As correlações oriundas das simulações apresentaram um desvio médio de 5% como apresentado na Figura 21.

Os resultados mostram que a relação orifício-diâmetro é a variável que melhor explica a variação de  $C_d$  pois apresenta o maior R-quadrado. Tal variável é usualmente empregada para descrever o  $C_d$  em problemas de orifícios internos às tubulações, como em dispositivos medidores de vazão, mas não para vazamentos gerados por orifícios na parede das tubulações, como na presente pesquisa (VENNARD, 1975).

Os resultados ainda indicam que a relação entre  $C_d$  e  $Re$  é inversamente proporcional, corroborando os dados experimentais de Shao *et al.* (2019b). Além disso, a relação entre  $C_d$  e a carga  $\Delta H$  é inversamente proporcional, consistentemente com os dados experimentais de



Yu *et al.* (2019).

**Tabela 13** - Coeficientes das correlações empíricas e seus R-quadrados para diferentes funções do tipo  $Cd = A. (d/D)^B. (\Delta H/D)^C. Re^D$  utilizando os dados experimentais.

| A (10e <sup>-2</sup> ) | B (10e <sup>-2</sup> ) | C (10e <sup>-2</sup> ) | D (10e <sup>-2</sup> ) | R <sup>2</sup> (%) | Equação  |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|----------|
| 71,6491                | 3,7916                 | -                      | -                      | 65,91              | 20 (EXP) |
| 65,4258                | -                      | -0,0633                | -                      | 0,05               | 21 (EXP) |
| 90,5533                | -                      | -                      | -3,2842                | 24,52              | 22 (EXP) |
| 81,6071                | 5,1299                 | -1,6767                | -                      | 90,54              | 23 (EXP) |
| 75,4536                | 3,5762                 | -                      | -0,5706                | 66,43              | 24 (EXP) |
| 90,2571                | -                      | 1,0573                 | -3,3124                | 24,65              | 25 (EXP) |
| 70,6890                | 6,1911                 | -2,1050                | 1,9464                 | 95,01              | 26 (EXP) |

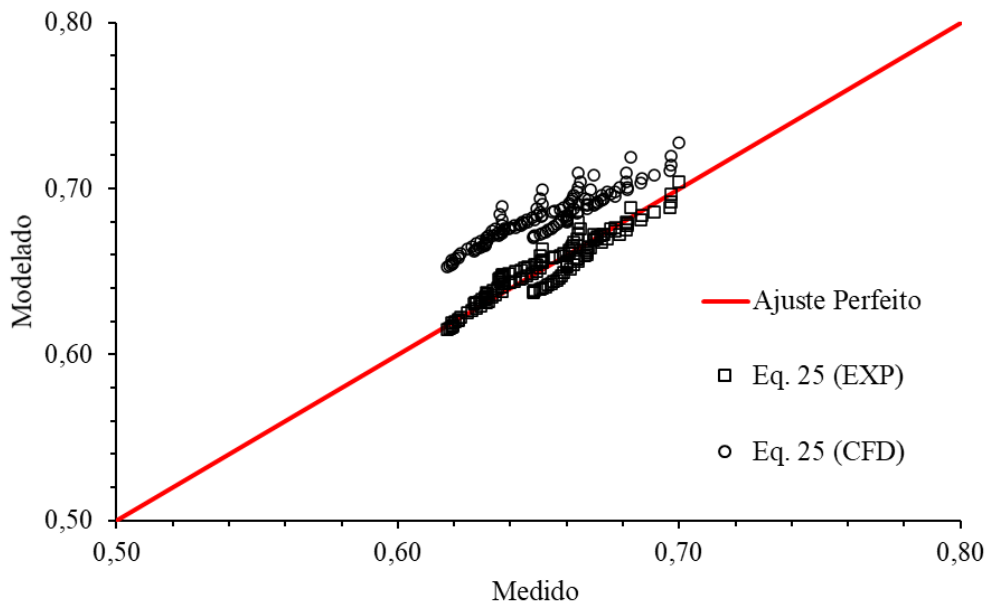
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 14** - Coeficientes das correlações e seus R-quadrados para diferentes funções do tipo  $Cd = A. (d/D)^B. (\Delta H/D)^C. Re^D$  utilizando os dados oriundos das simulações CFD.

| A (10e <sup>-2</sup> ) | B (10e <sup>-2</sup> ) | C (10e <sup>-2</sup> ) | D (10e <sup>-2</sup> ) | R <sup>2</sup> (%) | Equação  |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|----------|
| 72,4449                | 2,3660                 | -                      | -                      | 34,67              | 20 (CFD) |
| 70,4249                | -                      | -0,5352                | -                      | 4,63               | 21 (CFD) |
| 86,0478                | -                      | -                      | -2,3176                | 14,87              | 22 (CFD) |
| 83,0366                | 3,8218                 | -1,7446                | -                      | 71,28              | 23 (CFD) |
| 75,6221                | 2,1869                 | -                      | -0,4753                | 35,09              | 24 (CFD) |
| 87,5792                | -                      | -0,4606                | -2,2293                | 18,33              | 25 (CFD) |
| 69,6012                | 5,0848                 | -2,2179                | 2,3586                 | 79,08              | 26 (CFD) |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Figura 21** - Comparação entre as correlações Eq. 26 (EXP) e Eq. 26 (CFD) do tipo  $C_d = A \cdot (d/D)^B \cdot (\Delta H/D)^C \cdot Re^D$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 4.3 Aplicação dos Resultados

Foram testados cenários de vazamentos com orifício circular de 5, 10, 15 e 20 mm para as cinco adutoras selecionadas (ver Figura 15). A aplicação das correlações indica que o  $C_d$  proposto por DWRWCO superestima as vazões em todos os cenários analisados. O  $C_d$  usual de 0,67 superestima as vazões para o caso de 5mm, e subestima as vazões para os casos de 10 e 15 mm de diâmetro. Nas Tabelas 06 e 07 são apresentados os casos para orifícios circulares de 5 mm e 15 mm de diâmetro.

Os desvios do  $C_d$  usual de 0,67 em comparação à Eq. 26 (EXP) variaram na faixa de -6% a 6% para as adutoras analisadas, indicando que o uso de correlações para o cálculo do  $C_d$  pode melhorar o plano de intervenção das companhias de água, e por consequência a eficiência da gestão de perdas.

Usualmente, programas com domínio público para simulação de sistemas de adução e distribuição de água como EPANET 2.0 consideram o  $C_d$  como uma constante. A implementação de correlações do  $C_d$  em programas como esse poderia auxiliar as companhias de água, além de melhorar a eficiência de modelos de detecção de vazamentos de água, tais como os propostos por Tabesh *et al.* (2009), Gamboa-Medina e Reis (2017) e Yao *et al.* (2020) que utilizam o software EPANET 2.0.

**Tabela 15** - Vazões perdidas no cenário de um orifício circular de 5 mm usando diferentes correlações para o coeficiente de descarga nas adutoras analisadas

| Aduтора                      | Q<br>[Eq. 26 (EXP)]<br>[l/s] | Q<br>[Eq. 26 (CFD)]<br>[l/s] | Q<br>(DWRWCO)<br>[l/s] | Q<br>(Usual)<br>[l/s] |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| SANTA QUITÉRIA               | 0,19                         | 0,21                         | 0,23                   | 0,20                  |
| ARACOIABA                    | 0,24                         | 0,26                         | 0,30                   | 0,25                  |
| SENADOR SA-<br>URUOCA-JORDAO | 0,30                         | 0,32                         | 0,37                   | 0,31                  |
| TRICI-TAUA                   | 0,29                         | 0,31                         | 0,36                   | 0,30                  |
| LAVRAS DA<br>MANGABEIRA      | 0,27                         | 0,29                         | 0,33                   | 0,28                  |
| <b>Total</b>                 | 1,29                         | 1,38                         | 1,60                   | 1,34                  |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**Tabela 16** - Vazões perdidas no cenário de um orifício circular de 15 mm usando diferentes correlações para o coeficiente de descarga nas adutoras analisadas

| Aduтора                      | Q<br>[Eq. 26 (EXP)]<br>[l/s] | Q<br>[Eq. 26 (CFD)]<br>[l/s] | Q<br>(DWRWCO)<br>[l/s] | Q<br>(Usual)<br>[l/s] |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| SANTA QUITÉRIA               | 1,85                         | 1,96                         | 2,11                   | 1,77                  |
| ARACOIABA                    | 2,33                         | 2,50                         | 2,70                   | 2,26                  |
| SENADOR SA-<br>URUOCA-JORDAO | 2,85                         | 3,01                         | 3,30                   | 2,76                  |
| TRICI-TAUA                   | 2,78                         | 2,96                         | 3,27                   | 2,74                  |
| LAVRAS DA<br>MANGABEIRA      | 2,58                         | 2,74                         | 3,01                   | 2,52                  |
| <b>Total</b>                 | 12,39                        | 13,17                        | 14,39                  | 12,06                 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

## 5 CONCLUSÕES

A análise bibliométrica feita neste trabalho permitiu uma avaliação do comportamento e da evolução do tema de vazamentos em sistemas de distribuição de água, em especial sobre o estudo do coeficiente de descarga em tubulações. Tal análise mostrou que cada vez mais países e grupos de pesquisam se interessam sobre a temática de vazamentos, e que a modelagem CFD pode ser uma ferramenta promissora.

Assim, este trabalho se insere no grupo de trabalhos recentes que buscam analisar as características hidráulicas e hidrodinâmicas de vazamentos através do coeficiente de descarga, mas diferente dos demais trabalhos publicados até esta data, este trabalho busca tal análise através da modelagem computacional.

Dessa maneira, o presente trabalho apresenta mais de 120 simulações CFD com diferentes condições de contorno indicando a potencial desse tipo de modelagem no estudo de vazamento. Além disso, os resultados apresentados neste trabalho sugerem que os modelos de turbulência RANS descrevem o fenômeno de vazamentos com boa acurácia.

Ademais, o trabalho computacional apresentado se insere junto com trabalhos experimentais como base para o estudo do coeficiente de descarga em função de fatores geométricos, hidráulicos e hidrodinâmicos.

Mais estudos precisam ser realizados para averiguar as incertezas que a hipótese do  $C_d$  como uma constante e como uma variável aleatória normal pode trazer para os modelos de quantificação e detecção de vazamentos. Entretanto, a aplicação dos resultados deste trabalho embora limitados indica que o uso do  $C_d$  como uma constante pode induzir a equívocos nas tomadas de decisões dos órgãos gestores.

### 5.1 Recomendações

Do ponto de vista computacional, a ferramenta CFD pode ser associada com outras ferramentas estruturais e dinâmicas como o método dos elementos finitos, assim sugere-se as seguintes recomendações de trabalhos futuros:

- Avaliar a interação vazamento-solo e seu impacto no coeficiente de descarga;
- Avaliar o impacto da expansão e deformação da área do orifício no coeficiente de descarga;
- Avaliar os efeitos mecânicos e dinâmicos da rede de distribuição e de forças externas nos vazamentos.

Uma vez mais publicações sugerindo correlações para o coeficiente de descarga, sugere-se ainda os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliar o impacto do uso de correlações para o  $C_d$  nos sistemas de quantificação de perdas nos sistemas de distribuição de água;
- Avaliar o impacto do uso de correlações para o  $C_d$  nos sistemas de detecção ativa de vazamentos;
- Avaliar o impacto de correlações para o  $C_d$  nas tomadas de decisão dos órgãos gestores tais como a tomada de decisão ente o uso de canais, adutoras enterradas e adutoras aéreas nos sistemas de transferências de água.

## REFERÊNCIAS

- ALIHOSSEINI M. e THAMSEN P. U. (2019). **Analysis of sediment transport in sewer pipes using a coupled CFD-DEM model and experimental work**, Urban Water Journal, DOI: 10.1080/1573062X.2019.1669187
- ANSYS FLUENT. (2018). **ANSYS Fluent Theory Guide**, ANSYS, Inc., Release 19.2 (2018)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2017). **NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: Norma técnica, 2017.
- AWWA e DWRWCO. (1992). **Water Audit and Leak Detection Guide Book**: American Water Works Association (California-Nevada Section) and Department of Water Resources Water Conservation Office, Water Conservation Guide Book No.5.
- AZIMI, H., SHABANLOU, S., EBTEHAJ, I., BONAKDARI, H., KARDAR, S. (2017). **Combination of Computational Fluid Dynamics, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Genetic Algorithm for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Side Orifices**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 143(7), 04017015. DOI:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001190
- BANCO MUNDIAL. (2016). **The World Bank and the International Water Association to Establish a Partnership to Reduce Water Losses**. 2016. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/09/01/the-world-bank-and-the-international-water-association-to-establish-a-partnership-to-reduce-water-losses>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- BARDINA, J.E., HUANG, P.G., COAKLEY, T.J. (1997), "**Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development**", NASA Technical Memorandum 110446.
- BEN-MANSOUR, R., HABIB, M. A., KHALIFA, A., YOUCEF-TOUMI, K., e CHATZIGEORGIOU, D. (2012). **Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction**. Computers & Fluids, 57, 110–123. DOI:10.1016/j.compfluid.2011.12.016
- BESNER, M. C., PREVOST, M., & REGLI, S. (2011). **Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges**. Water Research, 45(3), 961–979. DOI: 10.1016/j.watres.2010.10.035
- BOIAN, R. F. *et al.* (2019). **Comparação entre as equações de FAVAD e geral para avaliação da vazão perdida por meio de vazamentos em sistemas urbanos de distribuição de água**. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2019, v. 24, n. 6, pp. 1073-1080. DOI: 10.1590/S1413-41522019195402.
- BRASIL. (2021). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. **ANA aponta ações e investimentos necessários em todas as cidades brasileiras para garantir abastecimento de água até 2035**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-aponta-acoes-e-investimentos-necessarios-em-todas-as-cidades-brasileiras-para-garantir-abastecimento-de-agua-ate-2035>. Acesso em: 21 out. 2021.
- BRASIL. (2020). Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de

Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.

CASSA, A. M., VAN ZYL, J. E, LAUBSCHER, R. F. (2010). **A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes**, Urban Water Journal, 7:2, 109-120, DOI: 10.1080/15730620903447613.

CHAMBERS, T. L., e WILCOX, D. C. (1977). **Critical Examination of Two-Equation Turbulence Closure Models for Boundary Layers**. AIAA Journal, 15(6), 821–828. DOI:10.2514/3.60713

CHEN, G., LI, Z., FANG, J., ZHANG, S. (2021). **Computational fluid dynamics analysis of flammable refrigerant leakage through a microcrack**. International Journal of Refrigeration. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.018

COETZER, A. J., VAN ZYL, J. E., CLAYTON, C. R. I. (2008). **An Experimental Investigation Into The Turbulent-Flow Hydraulics Of Small Circular Holes In Plastic Pipes**. Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006. DOI:10.1061/40941(247)1717

COGERH (Ceará). (2021). Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará**. 2021. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/>. Acesso em: 05 out. 2021.

DE MARCHIS, M., e MILICI, B.. (2019). **Leakage Estimation in Water Distribution Network: Effect of the Shape and Size Cracks**. Water Resources Management. DOI:10.1007/s11269-018-2173-4

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. (2021). THE WHITE HOUSE. **President Biden's Bipartisan Infrastructure Law**. 2021. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/bipartisan-infrastructure-law/#cleanwater>. Acesso em: 21 out. 2021.

ERDAL, A., ANDERSSON, H. (1997). **Numerical aspects of flow computation through orifices**. Flow Measurement and Instrumentation, 8(1), 27–37. DOI:10.1016/s0955-5986(97)00017-4

FARLEY, M., TROW, S. (2003). **Losses in water distribution networks**. London: IWA Publishing.

FERRAIUOLO, R., DE PAOLA, F., FIORILLO, D., CAROPPI, G., e PUGLIESE, F. (2020). **Experimental and Numerical Assessment of Water Leakages in a PVC-A Pipe**. Water, 12(6), 1804. DOI:10.3390/w12061804

FERRANTE, M., BRUNONE, B., MENICONI, S., CAPPONI, C., e MASSARI, C. (2014). **The Leak Law: From Local to Global Scale**. Procedia Engineering, 70, 651–659. DOI:10.1016/j.proeng.2014.02.071

FRANCHINI, M., LANZA, L. (2014). **Leakages in pipes: generalizing Torricelli's equation to deal with different elastic materials, diameters and orifice shape and dimensions**. Urban Water Journal, 11(8), 678–695. DOI:10.1080/1573062x.2013.868496

FOX, S., BOXALL, J., e COLLINS, R. (2018). **Derivation and Validation of a Leakage Model for Longitudinal Slits in Polyethylene Pipes**. Journal of Hydraulic Engineering, 144(7), 04018034. DOI:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001469

- FERZIGER, J. H. *et al.* (2020). **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 4. ed. Cham: Springer Nature Switzerland Ag 2020, 2020. 606 p.
- GAMBOA-MEDINA, M. M., e REIS, L. F. R. (2017). **Sampling Design for Leak Detection in Water Distribution Networks**. *Procedia Engineering*, 186, 460–469. DOI:10.1016/j.proeng.2017.03.255
- GHORBANIAN, V., e RAMEZANI, L. (2018). **Leakage**. *Pipelines* 2018. DOI:10.1061/9780784481653.043
- GREYVENSTEIN, B., e VAN ZYL, J. E. (2007). **An experimental investigation into the pressure - leakage relationship of some failed water pipes**. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 56(2), 117–124. DOI:10.2166/aqua.2007.065
- GROTJANS, H., and MENTER, F.R. (1998). **Wall functions for industrial applications**. In K.D. Papailiou, Editor, *Computational Fluid Dynamics'98*, Volume 1, Parte 2, pp 1112-1117, Chichester. ECCOMAS, John Wiley Sons.
- IISD. International Institute Sustainable Development. (2006). **World water forum bulletin: a summary report**. 4th World Water Forum. International Institute Sustainable Development, Mexico, 25 Março 2006.
- JIMENEZ CISNEROS, B.E. *et al.* (2014). **Freshwater resources. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and 36 Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment 37 Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, 38 M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, 39 A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, 40 Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229–269, DOI:10.1017/cbo9781107415379.008.
- KATO M. e LAUNDER B. E. (1993). **The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders**. Ninth Symposium on "Turbulent Shear Flows". Kyoto, Japan. August 16-18, 1993.
- KINGDOM, B., LIEMBERGER, R., MARIN, P. (2006). **The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries - How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting**. Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series, n. 8, 52 pp. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17238>.
- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. R.. (2012). **Fluid Mechanics**. 6. ed. London: Elsevier, 2012. 1002 p.
- LAMBERT, A., e HIRNER W. (2000). **Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures**. IWA The blue pages, IWA Publishing, London.
- LATIFI, M., NAEENI, S. T. (OMID), MAHDAVI, A. (2017). **Experimental assessment of soil effects on the leakage discharge from polyethylene pipes**. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(2), 539–554. DOI:10.2166/ws.2017.134
- LAUNDER, B. E. e SPALDING, D. B. (1972). **Lectures in Mathematical Models of Turbulence**. Academic Press, London, England. 1972.
- LESCHZINER, M. A. (2010). **Reynolds-averaged Navier-Stokes methods**. In R. Blockley



e W. Shyy (Eds.), Encyclopedia of aerospace engineering (pp. 1–13).

LOYSEAU, X. F., VERDIN, P. G., BROWN, L. D. (2018). **Scale-up and turbulence modelling in pipes**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 162, 1–11. DOI:10.1016/j.petrol.2017.12.019.

MARTINS, N. M. C., SOARES, A. K., RAMOS, H. M., e COVAS, D. I. C. (2016). **CFD modeling of transient flow in pressurized pipes**. Computers & Fluids, 126, 129–140. DOI:10.1016/j.compfluid.2015.12.002

MAY, J. (1994). **Pressure dependent leakage**. Leakage, Pressure and Control BICS International Conference on Leakage Control Investigation in underground Assets. London, October 1994

MEKONNEN, M., HOEKSTRA A. (2016). **Four billion people facing severe water scarcity**. Science Advances, Vol. 2, No. 2, e1500323, DOI: 10.1126/sciadv.1500323?

MENTER, F. R. (1994). **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications**. AIAA Journal, 32(8), 1598–1605. DOI:10.2514/3.12149

MORA-RODRÍGUEZ, J., DELGADO-GALVÁN, X., ORTIZ-MEDEL, J., RAMOS, H. M., FUERTES-MIQUEL, V. S., e LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A. (2015). **Pathogen intrusion flows in water distribution systems: according to orifice equations**. Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua, 64(8), 857–869. DOI:10.2166/aqua.2015.121

OLIVEIRA, GESNER *et al* (org.). (2020). **PERDAS DE ÁGUA 2020 (SNIS 2018): desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico. DESAFIOS PARA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E AVANÇO DA EFICIÊNCIA DO SANEAMENTO BÁSICO**. 2020. Disponível em: [http://tratabrasil.org.br/images/estudos/Relat%C3%B3rio\\_Final\\_\\_Estudo\\_de\\_Perdas\\_2020\\_-\\_JUNHO\\_2020.pdf](http://tratabrasil.org.br/images/estudos/Relat%C3%B3rio_Final__Estudo_de_Perdas_2020_-_JUNHO_2020.pdf). Acesso em: 15 jan. 2021.

OPPENHEIMER, M., CAMPOS, R. WARREN, J. BIRKMANN, G. LUBER, B. O'NEILL, e TAKAHASHI K. (2014). **Emergent risks and key vulnerabilities**. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1039-1099.

PORTO, R. M. (2006). **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

POPESCU, I. (2014). **Computational Hydraulics: numerical methods and modelling**. London: Iwa Publishing, 2014. 185 p.

PUUST R., KAPELAN Z., SAVIC D. A e KOPPEL T. (2010). **A review of methods for leakage management in pipe networks**, Urban Water Journal, 7:1, 25-45, DOI: 10.1080/15730621003610878

RAJANI, B., e KLEINER, Y. (2001). **Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models**. Urban Water, 3(3), 151–164. DOI:10.1016/s1462-0758(01)00032-2

- RAHMAN, N. A., MUHAMMAD, N. S., MOHTAR, W. H. M. (2018). **Evolution of research on water leakage control strategies: where are we now?**, Urban Water Journal, 15:8, 812-826, DOI: 10.1080/1573062X.2018.1547773
- REALI, M. A. P. *et al.* (2019). Tratamento de água para consumo humano. In: CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologias e gestão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. Cap. 17. p. 323-363.
- SCHLICHTING, H., GERSTEN, K. (2017) **Boundary-Layer Theory**. 9. ed. Braunschweig: Springer, 2017. 814 p.
- SCHWALLER, J., e VAN ZYL, J. E. (2014). **Implications of the Known Pressure-response of Individual Leaks for Whole Distribution Systems**. Procedia Engineering, 70, 1513–1517. DOI:10.1016/j.proeng.2014.02.166
- SCHWALLER, J., e VAN ZYL, J. E. (2015). **Modeling the Pressure-Leakage Response of Water Distribution Systems Based on Individual Leak Behavior**. Journal of Hydraulic Engineering, 141(5), 04014089. DOI:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000984
- SHAO, Y., SHIPENG, C., DANG, C., e YU, T. (2019a). **Effects of leakage points on intrusion volume in a simulated water distribution system**. Water Supply. DOI:10.2166/ws.2019.156
- SHAO, Y., YAO, T., GONG, J. Z., LIU, J., ZHANG, T., YU, T. (2019b). **Impact of Main Pipe Flow Velocity on Leakage and Intrusion Flow: An Experimental Study**. Water: 11, DOI: 10.3390/w11010118.
- SHEHADEH M., SHARARA A., KHAMIS M. e EL-GAMAL H. (2012). **A Study of Pipeline Leakage pattern Using CFD**, Canadian Journal on Mechanical Sciences & Engineering, 3(3),2012
- STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. (1985). **Fluid Mechanics**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 1985. 586 p.
- SOUZA FILHO, F. de A. (2018). **CEARÁ 2050: diagnóstico dos recursos hídricos**. Fortaleza: UFC, 2018. 94 p.
- TABESH, M., YEKTA, A.H.A., BURROWS, R. (2009). **An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems**. Water Resour Manage 23, 477–492 (2009). DOI:10.1007/s11269-008-9284-2
- THOMAS, J. T. (1986). **Orifice Plates for Furrow Flow Measurement: Part I - Calibration**. Transactions of the ASAE 29 (1): 103–0106.  
<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=30110&t=3>.
- THORNTON, J., STURM, R., KUNKEL, G. (2008). **Water Loss Control**. 2nd Edition, McGraw-Hill, 650 pp.
- TU, J., YEOH, G.-H., e LIU, C. (2018). **CFD Solution Analysis: Essentials. Computational Fluid Dynamics**, 211–253. DOI:10.1016/b978-0-08-101127-0.00006-4.
- VALERIANO, M. de M. *et al.* (2008). **TOPODATA: banco de dados geomorfométricos do brasil**. Banco de dados geomorfométricos do brasil. 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 04 jul. 2021.
- VAN ECK, N. J., WALTMAN, L. (2009). **Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping**. Scientometrics, 84(2), 523–538. DOI:10.1007/s11192-009-0146-3

- VAN ECK, N. J., WALTMAN, L. (2021). **VOSviewer Manual**. Leiden: Cwts, 2021. 54 p. Disponível em: [https://www.vosviewer.com/documentation/Manual\\_VOSviewer\\_1.6.17.pdf](https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.17.pdf). Acesso em: 17 out. 2021.
- VAN ZYL, J. E., e C. R. I. CLAYTON. (2007). **The Effect of Pressure on Leakage in Water Distribution Systems**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management 160 (2): 109–114. Thomas Telford Ltd. DOI:10.1680/wama.2007.160.2.109.
- VENNARD, JOHN K.; STREET, ROBERT L. (1975). **Elementary Fluid Mechanics**. 5. ed. New York: John Wiley And Sons, 1975. 687 p.
- WILCOX, D. C. (1991). **A half century historical review of the k-omega model**. 29th Aerospace Sciences Meeting. DOI:10.2514/6.1991-615
- WILCOX D. C. (1998) **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, Inc. La Canada, California. 1998.
- WILCOX, D. C. (2006) **Turbulence Modeling for CFD**. 3. ed. San Diego: Dcw Industries, 2006. 550 p.
- YANG, Y., ZHANG, T., e ZHU, D. Z. (2013). **Influence of porous media on intrusion rate into water distribution pipes**. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 63(1), 43–50. DOI:10.2166/aqua.2013.213
- YAO, H., ZHANG, T., SHAO, Y., YU, T., e LIMA NETO, I. E. (2020). **Improved modularity-based approach for partition of Water Distribution Networks**. Urban Water Journal, 1–10. DOI:10.1080/1573062x.2020.1857801
- YU, T., ZHANG, X., E. LIMA NETO, I., ZHANG, T., SHAO, Y., e YE, M. (2019). **Impact of Orifice-to-Pipe Diameter Ratio on Leakage Flow: An Experimental Study**. Water, 11(10), 2189. DOI:10.3390/w11102189.