INFLUÊNCIA DA TENSÃO SUPERFICIAL DO ESGOTO NA ESTABILIDADE HIDRODINÂMICA E NA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CALHAS PARSHALL

Bruno de Oliveira Lázaro[(1)]
Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil. Doutorando em Engenharia Mecânica. Técnico responsável pelo Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Coordenador do GEHA – Grupo de Estudos em Hidráulica Aplicada.
João Marcelo Vedovotto[(2)]
Engenheiro Mecânico. Mestre em Engenharia Mecânica. Doutor em Engenharia Mecânica. Coordenador do Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
Jonathan Utzig[(3)]
Engenheiro Químico. Mestre em Engenharia Química. Doutor em Engenharia Mecânica. Coordenador do Laboratório de Fluidodinâmia Computacional e do Laboratório de Verificação e Validação. Departamento de Engenharia Química. Fundação Universidade Regional de Blumenau.

Endereço[(1)]**:** Avenida João Naves de Ávila, 2121, *Campus* Santa Mônica, Bloco 1Y, Sala 1Y113, Laboratório de Hidráulica, Bairro Santa Mônica – Uberlândia – Minas Gerais – CEP: 38408-000 – Brasil. E-mail: bruno.lazaro@ufu.br.

RESUMO

A medição de vazão em sistemas de esgotamento sanitário é fundamental para o controle operacional, monitoramento hidráulico e eficiência de estações de tratamento de esgoto. Entretanto, as equações clássicas empregadas em calhas Parshall são tradicionalmente baseadas em condições idealizadas de escoamento e em propriedades típicas da água limpa, desconsiderando as particularidades físico-químicas do esgoto sanitário. Neste trabalho, investigou-se a influência das propriedades interfaciais do esgoto na estabilidade hidrodinâmica e na medição de vazão em uma calha Parshall em escala próxima à real por meio de simulações CFD tridimensionais, transientes e bifásicas utilizando o método dos volumes finitos. A interface ar-líquido foi modelada pelo método *Volume of Fluid* (VOF), enquanto a turbulência foi representada pelo modelo k–ω SST. Foram avaliadas diferentes tensões superficiais representativas de esgoto sanitário (0,030 N/m, 0,040 N/m e 0,050 N/m), utilizando como referência a água limpa (0,072 N/m). Os resultados demonstraram que menores tensões superficiais intensificaram as oscilações da superfície livre, ampliaram as regiões de instabilidade hidráulica e modificaram parâmetros associados à medição de vazão, produzindo diferenças estimadas de até 4,6% na vazão calculada. Os resultados reforçam a importância da consideração explícita das propriedades físico-químicas do esgoto em análises hidráulicas e metrológicas de sistemas de saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: Calha Parshall, CFD bifásico, Esgoto sanitário.

INTRODUÇÃOCONTEÚDO DO TRABALHO

A medição de vazão em sistemas de esgotamento sanitário constitui uma etapa fundamental para o monitoramento operacional, controle hidráulico e avaliação de desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Desta maneira, entende-se que informações confiáveis de vazão são indispensáveis para o dimensionamento de unidades, controle de processos, estimativa de cargas poluidoras e gerenciamento operacional de sistemas de saneamento (BOS, 1989).

Entre os dispositivos mais empregados para esse tipo de aplicação, a calha Parshall (Figura 1) destaca-se pela simplicidade construtiva, baixa perda de carga, ausência de partes móveis e capacidade de operação sob escoamento à superfície livre, sendo amplamente utilizada em ETEs e redes coletoras de esgoto (FERZIGER e PERIC, 2002).

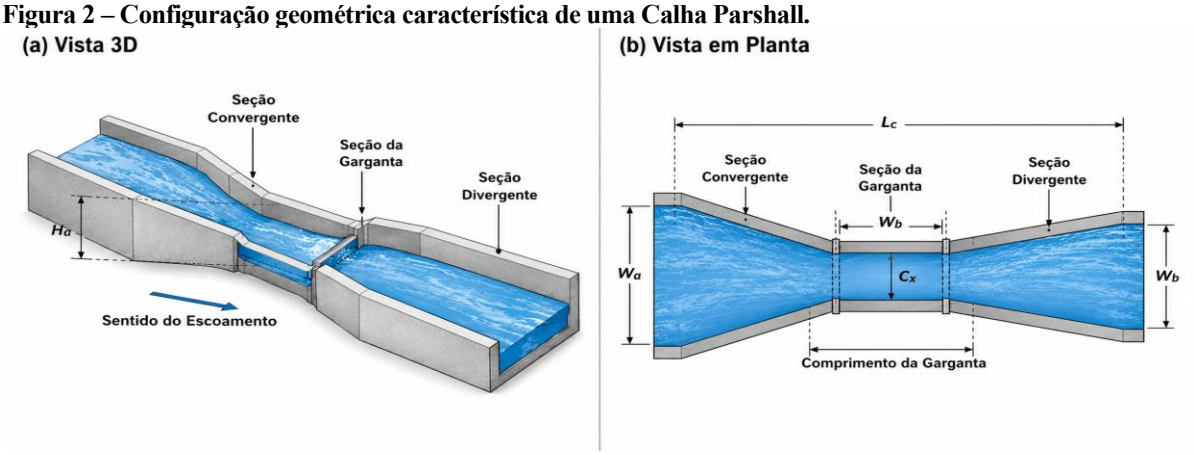
O princípio de funcionamento da calha Parshall baseia-se na aceleração do escoamento na região convergente e na garganta da estrutura, promovendo a formação de uma seção de controle hidráulico a partir da qual a vazão pode ser estimada por relações empíricas entre a altura da lâmina d'água e a descarga escoada (Figura 2).

Figura 1 – Exemplos de calhas Parshall para ETE, ETA e irrigação agrícola.



Fonte: Os autores, 2026.

Figura 2 – Configuração geométrica característica de uma Calha Parshall.



Fonte: Os autores (auxílio de IA generativa), 2026.

Estes modelos matemáticos clássicos foram, originalmente, desenvolvidos considerando condições hidráulicas idealizadas, normalmente associadas a escoamentos permanentes, fluidos homogêneos e propriedades físicas equivalentes às da água limpa. Entretanto, em sistemas reais de esgotamento sanitário, o comportamento hidrodinâmico do efluente apresenta características significativamente mais complexas, envolvendo elevada turbulência, oscilação da superfície livre, incorporação de ar, recirculações locais e forte interação entre as fases líquida e gasosa (ABNT, 2008; KARAMI *et al.,* 2022; HEYRANI, 2022).

Além dos efeitos puramente hidráulicos, o esgoto sanitário apresenta propriedades físico-químicas distintas da água potável em função da presença de surfactantes, detergentes, sólidos suspensos, matéria orgânica dissolvida e compostos ativos de superfície. Tais características podem alterar propriedades fundamentais do escoamento, como densidade, viscosidade e, principalmente, tensão superficial (HEYRANI *et al.,* 2021; KHOSRONEJAD *et al.,* 2021).

Do ponto de vista hidrodinâmico, a tensão superficial atua diretamente na estabilidade da interface ar-líquido, influenciando a propagação de perturbações, a deformabilidade da superfície livre e a interação entre estruturas turbulentas e oscilações interfaciais. Em regiões submetidas a elevadas acelerações e intensos gradientes de velocidade, como a garganta da calha Parshall, pequenas modificações nessas propriedades podem produzir alterações relevantes no comportamento do escoamento e na estabilidade hidráulica da seção de medição (SILVEIRA NETO, 2020).

Apesar da ampla utilização das calhas Parshall em sistemas de saneamento, grande parte dos estudos disponíveis concentra-se em aplicações envolvendo água limpa, calibração hidráulica tradicional ou análises experimentais em

escala reduzida. Em muitos casos, as propriedades interfaciais do esgoto sanitário são negligenciadas, assumindo-se implicitamente que o comportamento hidráulico do escoamento permanece equivalente ao da água em condições ideais. Essa simplificação pode introduzir incertezas adicionais na determinação da altura característica utilizada nas equações de vazão, especialmente em condições operacionais marcadas por elevada turbulência e instabilidade da superfície livre (MENTER, 1994; WU *et al.,* 2017; ZHOU *et al.,* 2020).

Nesse contexto, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) apresenta-se como uma ferramenta promissora para a investigação de fenômenos hidráulicos complexos em sistemas de saneamento. Dentro dessa perspectiva, a utilização de modelos multifásicos transientes permite representar simultaneamente a dinâmica da interface ar-líquido, os mecanismos turbulentos e os efeitos associados às propriedades físico-químicas do esgoto, possibilitando análises mais próximas das condições reais de operação observadas em ETEs (SILVEIRA NETO, 2020).

Com base no exposto anteriormente, a hipótese central deste trabalho é que reduções na tensão superficial do esgoto sanitário intensificam as oscilações da superfície livre e modificam localmente os mecanismos de turbulência na região da garganta da calha Parshall, afetando a estabilidade hidráulica da seção de medição e produzindo variações na vazão estimada pelas formulações convencionais. Assim, assume-se que as propriedades interfaciais do esgoto exercem influência direta sobre a confiabilidade hidráulica e metrológica da medição de vazão.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência das propriedades físico-químicas do esgoto sanitário na estabilidade hidrodinâmica e na medição de vazão em uma calha Parshall em escala próxima à real por meio de simulações CFD tridimensionais, transientes e bifásicas. A análise concentra-se na variabilidade longitudinal da superfície livre, na distribuição de velocidades superficiais, na energia cinética turbulenta e nos parâmetros associados à estabilidade hidráulica do escoamento, buscando compreender de que maneira os efeitos interfaciais podem impactar os procedimentos convencionais de medição de vazão em sistemas de saneamento.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Medição de vazão em sistemas de esgotamento sanitário utilizando a calha Parshall

Conforme exposto anteriormente, a determinação adequada da vazão em ETEs permite avaliar cargas hidráulicas e orgânicas afluentes, analisar a eficiência de tratamento, identificar infiltrações indevidas e calibrar condições operacionais de diferentes etapas do sistema. Em canais abertos, uma das estruturas mais empregadas para essa finalidade é a calha Parshall, devido à sua robustez hidráulica, simplicidade construtiva e reduzida perda de carga em comparação com outros dispositivos de medição (PARSHALL, 1936; BOS, 1989).

A calha Parshall é composta por três regiões principais: seção convergente com fundo plano, garganta com fundo descendente e seção divergente com rampa ascendente de fundo. O estreitamento geométrico da garganta promove aceleração do escoamento e formação de uma seção de controle hidráulico, permitindo que a vazão seja estimada por relações empíricas entre a altura da lâmina líquida medida a montante e a geometria da estrutura.

Em condições de escoamento livre, o modelo matemático de descarga pode ser expresso pela Equação 1 (PARSHALL, 1936; ISO, 1992; ABNT, 2008).

$$\mathbf{Q = C.b.H_a^n} \qquad \text{Equação (1)}$$

Em que Q é a vazão descarregada pela calha Parshall (m^3/s), b é a largura da garganta da calha (m), H_a é a altura da superfície livre no ponto de medição (m), e C e n são coeficientes empíricos associados às dimensões geométricas de cada calha estabelecidas conforme padrão construtivo normativo (ISO, 1992; ABNT 2008).

Embora normatizada e amplamente utilizada, a formulação exposta na Equação 1 assume hipóteses simplificadoras associadas à estabilidade da superfície livre, ao comportamento homogêneo do fluido e à ausência de perturbações interfaciais significativas. Em geral, considera-se que o escoamento apresenta comportamento equivalente ao da água limpa, com propriedades físicas constantes e distribuição relativamente uniforme da lâmina líquida ao longo da região de medição.

Contudo, em aplicações reais envolvendo esgoto sanitário, tais hipóteses podem não ser completamente válidas devido à natureza multifásica e altamente turbulenta do escoamento. Do ponto de vista prático, sistemas de esgoto apresentam presença de sólidos suspensos, compostos orgânicos, surfactantes, bolhas de ar e flutuações hidráulicas transientes que podem alterar o comportamento da superfície livre.

Além disso, oscilações locais da lâmina líquida próximas à região convergente e à garganta podem introduzir incertezas adicionais na determinação da carga hidráulica utilizada nas equações de vazão. Estudos recentes têm demonstrado que essas instabilidades podem afetar a confiabilidade metrológica de estruturas de medição em sistemas sanitários, especialmente sob condições de elevada turbulência e escoamentos multifásicos (KARAMI *et al.*, 2022; KHOSRONEJAD *et al*., 2021).

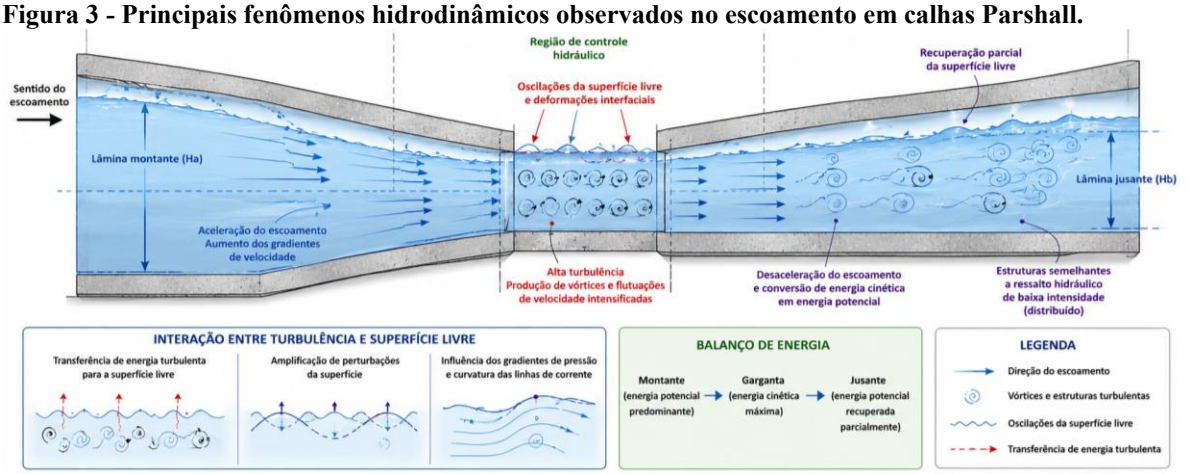
Hidrodinâmica de superfícies livres turbulentas

Escoamentos em superfície livre submetidos a elevados gradientes de velocidade apresentam comportamento hidrodinâmico complexo, resultante da interação entre forças inerciais, viscosas, gravitacionais e interfaciais. Em estruturas hidráulicas como calhas Parshall, o estreitamento geométrico promove aceleração significativa do escoamento, intensificando mecanismos turbulentos e aumentando a susceptibilidade da interface ar-líquido a instabilidades locais.

A turbulência exerce papel central nesse comportamento, uma vez que estruturas de vórtices e flutuações de velocidade transferem energia continuamente para a superfície livre. Em regiões de aceleração intensa, como a seção convergente e a garganta, os elevados gradientes de velocidade promovem aumento da produção turbulenta e intensificação das flutuações interfaciais. Como consequência, existe uma grande tendência de surgimento e propagação de oscilações da lâmina líquida, deformações locais da interface e variações espaciais do perfil hidráulico longitudinal.

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática simplificada dos principais mecanismos hidrodinâmicos associados ao escoamento em uma calha Parshall, destacando as regiões de aceleração do escoamento, intensificação turbulenta, deformação da superfície livre e reorganização hidráulica após a garganta.

Figura 3 - Principais fenômenos hidrodinâmicos observados no escoamento em calhas Parshall.



Fonte: Os autores (auxílio de IA generativa), 2026.

Em determinadas condições hidráulicas, especialmente após a passagem pela seção crítica da garganta, ocorre a desaceleração parcial do escoamento e a conversão de energia cinética em energia potencial. Esse fenômeno pode resultar em uma recuperação gradual da superfície livre na região divergente da calha, comportamento frequentemente associado à formação distribuída de estruturas semelhantes a ressaltos hidráulicos de baixa intensidade.

Embora nem sempre ocorra um ressalto clássico plenamente desenvolvido, a presença de oscilações e elevação parcial da lâmina líquida constitui importante indicativo da reorganização hidrodinâmica do escoamento após a região de controle.

Atualmente, a literatura compreende que a estabilidade da interface ar-líquido depende diretamente da capacidade do fluido em resistir às deformações induzidas pela turbulência. Em escoamentos multifásicos turbulentos, pequenas perturbações superficiais podem ser amplificadas por mecanismos hidrodinâmicos associados à curvatura das linhas de corrente, gradientes de pressão e transferência turbulenta de quantidade de movimento (ZHOU *et al.,* 2020; KARAMI *et al.*, 2022; KHOSRONEJAD *et al*., 2021). Dessa forma, a superfície livre passa a atuar como uma região dinâmica de interação entre turbulência e forças interfaciais, tornando-se altamente sensível às propriedades físico-químicas do fluido.

Propriedades interfaciais e tensão superficial em escoamentos com efluentes sanitários

A tensão superficial representa uma das propriedades interfaciais mais importantes em escoamentos multifásicos envolvendo superfície livre, pois controla a coesão molecular na interface ar-líquido e atua como mecanismo restaurador contra deformações superficiais. Em água limpa sob condições padrão, a tensão superficial apresenta valor aproximado de 0,072 N/m. Entretanto, em esgotos sanitários reais, esse parâmetro pode sofrer reduções significativas devido à presença de compostos surfactantes, detergentes, óleos, matéria orgânica dissolvida e substâncias tensoativas provenientes de atividades domésticas e industriais (CHENG *et al*., 2018; ZHOU *et al*., 2020).

Os surfactantes reduzem as forças coesivas intermoleculares na interface líquida, diminuindo a energia necessária para deformação da superfície livre. Como consequência, escoamentos com menores valores de tensão superficial tornam-se mais suscetíveis à propagação de ondas superficiais, instabilidades interfaciais e amplificação de perturbações induzidas pela turbulência. Em sistemas de esgoto sanitário, valores típicos de tensão superficial podem variar aproximadamente entre 0,030 e 0,060 N/m, dependendo da composição físico-química do efluente e das condições operacionais do sistema.

Do ponto de vista hidráulico, reduções na tensão superficial influenciam diretamente a estabilidade da interface ar-líquido, alterando padrões de oscilação da lâmina líquida, comportamento das ondas superficiais e distribuição longitudinal da altura do escoamento. Em estruturas hidráulicas submetidas a fortes acelerações, como calhas Parshall, esses efeitos tornam-se particularmente relevantes devido à intensa interação entre turbulência e deformabilidade interfacial.

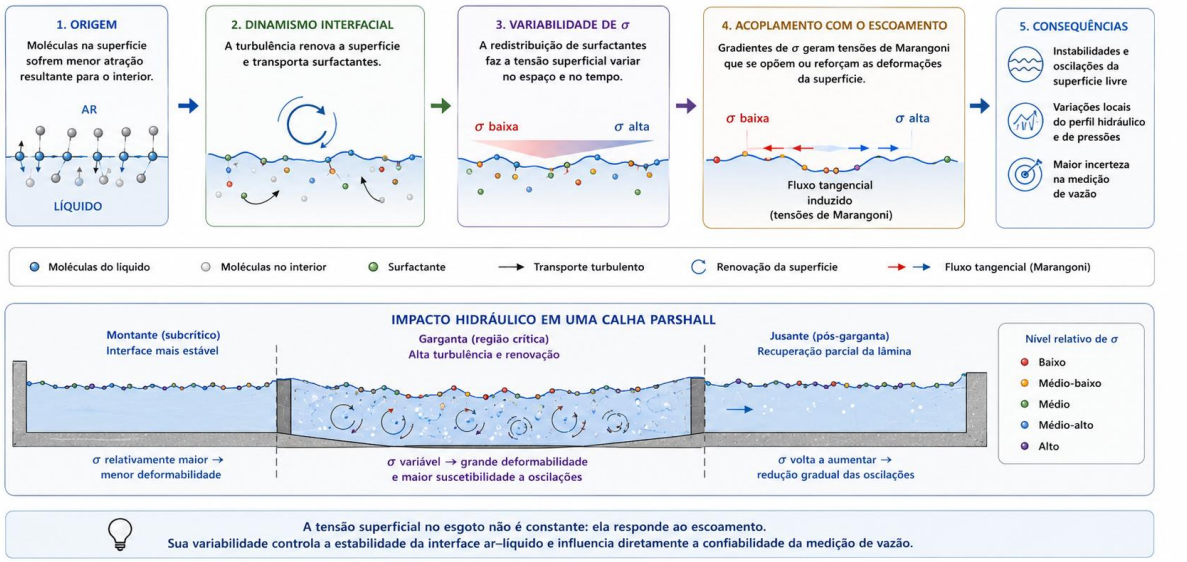
Além das alterações no comportamento hidrodinâmico, a modificação das propriedades interfaciais pode afetar indiretamente a confiabilidade da medição de vazão. Como a determinação da descarga depende da medição da altura hidráulica característica a montante da garganta, oscilações superficiais associadas à redução da tensão superficial podem introduzir variabilidade adicional nos valores medidos de carga hidráulica, impactando as estimativas de vazão obtidas pelas formulações empíricas tradicionais.

Mais recentemente, a literatura tem avançado no entendimento de que a tensão superficial não deve ser interpretada apenas como uma propriedade físico-química constante do fluido, mas sim como uma variável termodinâmica dinâmica acoplada ao próprio escoamento. Em sistemas multifásicos turbulentos, especialmente aqueles envolvendo esgoto sanitário, a interface ar-líquido encontra-se continuamente submetida a processos de deformação, renovação superficial, transferência de massa e redistribuição local de compostos surfactantes (SILVEIRA NETO, 2020; KARAMI *et al.,* 2022; HEYRANI, 2022).

Nessas condições, a tensão superficial passa a apresentar comportamento espacial e temporalmente variável, dependendo da intensidade turbulenta, da taxa de deformação da interface e da concentração local de espécies tensoativas. A Figura 4 apresenta uma síntese conceitual dos principais mecanismos físicos associados ao comportamento dinâmico da tensão superficial em escoamentos turbulentos de esgoto sanitário, destacando os efeitos da turbulência, da renovação interfacial, da redistribuição de surfactantes e das variações espaço-temporais da interface ar-líquido.

Sob essa perspectiva, a superfície livre deixa de atuar como uma fronteira passiva do escoamento e passa a constituir uma região termodinamicamente ativa, caracterizada por trocas permanentes de energia e matéria entre as fases. Flutuações turbulentas podem promover concentração diferencial de surfactantes ao longo da interface, alterando localmente os gradientes de tensão superficial e induzindo fenômenos conhecidos como tensões de Marangoni. Esses mecanismos podem intensificar ou amortecer deformações interfaciais, dependendo da distribuição das propriedades físico-químicas do fluido e da dinâmica local do escoamento.

Figura 4 –Mecanismos físicos associados ao comportamento dinâmico da tensão superficial.



Fonte: Os autores (auxílio de IA generativa), 2026.

Em escoamentos acelerados, como aqueles presentes em calhas Parshall, a elevada produção turbulenta e os fortes gradientes de velocidade favorecem a renovação contínua da interface ar-líquido, potencializando o caráter dinâmico da tensão superficial. Dessa forma, regiões distintas da calha podem apresentar diferentes respostas hidrodinâmicas associadas à própria reorganização interfacial do escoamento. Na prática, isso significa que a tensão superficial pode variar localmente em função do campo turbulento, da aeração, da presença de bolhas, da concentração de matéria orgânica e até mesmo do histórico hidrodinâmico do fluido ao longo da estrutura hidráulica.

Essa abordagem representa uma mudança importante em relação aos modelos hidráulicos clássicos, nos quais as propriedades do fluido são frequentemente assumidas constantes e homogêneas. Em sistemas reais de saneamento, contudo, o esgoto constitui um meio multifásico complexo, não newtoniano em determinadas condições e sujeito a intensas variações físico-químicas. Assim, a interpretação da tensão superficial como uma propriedade dinâmica do escoamento amplia significativamente a capacidade de compreensão dos mecanismos responsáveis pela instabilidade da superfície livre, pelas oscilações hidráulicas e pelas incertezas associadas à medição de vazão.

Modelagem CFD aplicada ao saneamento

A modelagem CFD tem se consolidado como uma importante ferramenta para investigação de fenômenos hidráulicos complexos em sistemas de saneamento, permitindo a análise detalhada de campos de velocidade, distribuição de pressão, estruturas turbulentas e comportamento da superfície livre. Em comparação com abordagens exclusivamente experimentais, a CFD possibilita elevada resolução espacial e temporal, além de maior flexibilidade na avaliação de diferentes condições operacionais e propriedades do fluido (FERZIGER e PERIĆ, 2002; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Em escoamentos multifásicos envolvendo interface ar-líquido, tais como o escoamento de esgoto em calhas Parshall, uma das abordagens mais utilizadas é o método *Volume of Fluid* (VOF), originalmente proposto por HIRT e NICHOLS (1981). O método baseia-se no rastreamento da fração volumétrica das fases presentes no domínio computacional, permitindo representar explicitamente deformações da superfície livre, propagação de ondas e interações interfaciais complexas. Essa abordagem apresenta elevada aplicabilidade em problemas hidráulicos envolvendo canais abertos, vertedores, calhas de medição e escoamentos transientes.

A representação adequada da turbulência constitui outro aspecto fundamental em simulações CFD aplicadas ao saneamento. Entre os modelos de fechamento turbulento disponíveis, o modelo k-ω SST proposto por MENTER (1994) destaca-se por combinar as vantagens dos modelos k-ε e k-ω, apresentando bom desempenho em regiões sujeitas a gradientes adversos de pressão, aceleração do escoamento, separação e

curvatura das linhas de corrente. Essas características tornam o modelo particularmente adequado para a simulação hidrodinâmica de calhas Parshall.

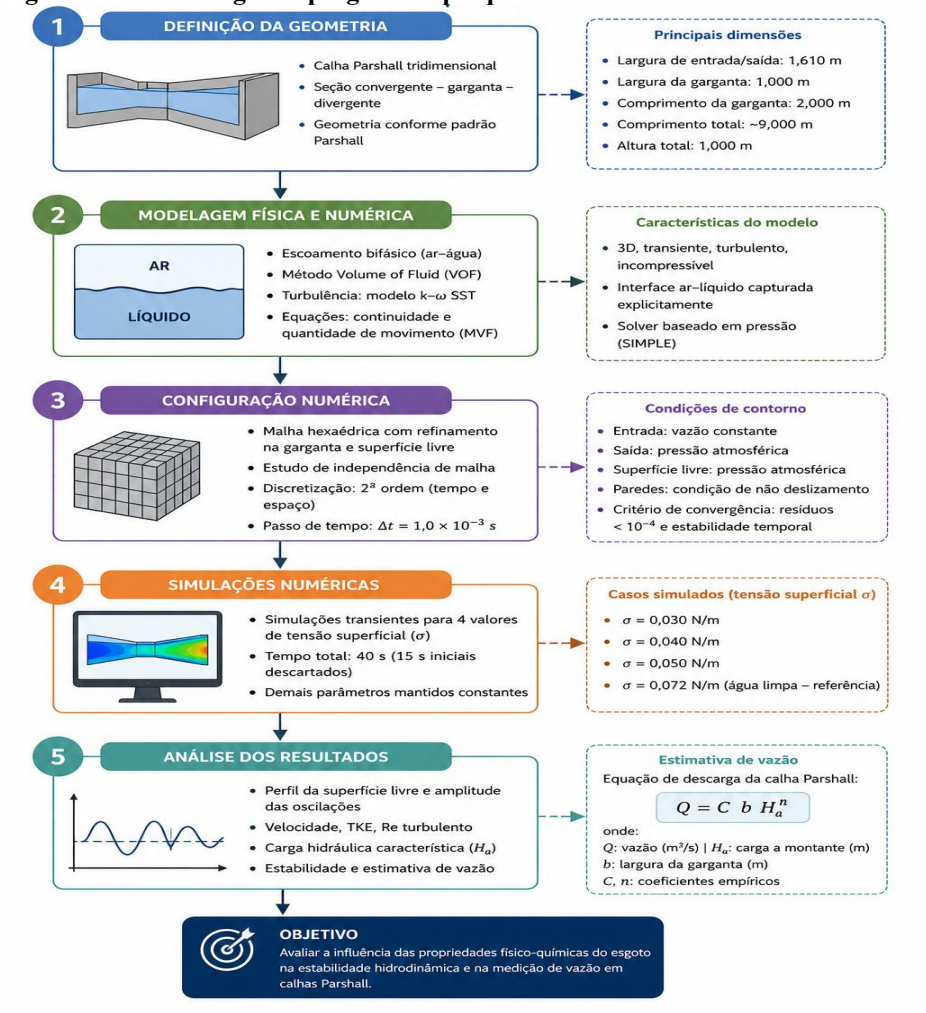
Apesar das vantagens associadas à CFD, diversos desafios ainda estão presentes na modelagem de escoamentos sanitários multifásicos. A representação numérica adequada da interface livre requer refinamento de malha próximo à superfície do escoamento, pequenos passos temporais e critérios rigorosos de convergência numérica.

Além disso, a elevada sensibilidade das instabilidades interfaciais às propriedades físico-químicas do fluido torna necessária a consideração explícita de parâmetros como tensão superficial, viscosidade e interação turbulência-interface, especialmente quando se busca representar condições próximas às observadas em sistemas reais de esgotamento sanitário.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de modelagem numérico-computacional utilizando técnicas de CFD para investigar a influência das propriedades físico-químicas do esgoto sanitário sobre a estabilidade hidrodinâmica do escoamento e sobre os parâmetros hidráulicos empregados na medição de vazão em calhas Parshall. Em especial, buscou-se analisar a influência da tensão superficial e das propriedades interfaciais no escoamento multifásico ao longo da calha considerando propriedades representativas de esgoto sanitário doméstico reportadas na literatura técnica. A Figura 5 ilustra, através de um fluxograma, a metodologia empregada.

Figura 5 – Metodologia empregada na pesquisa.



Fonte: Os autores, 2026.

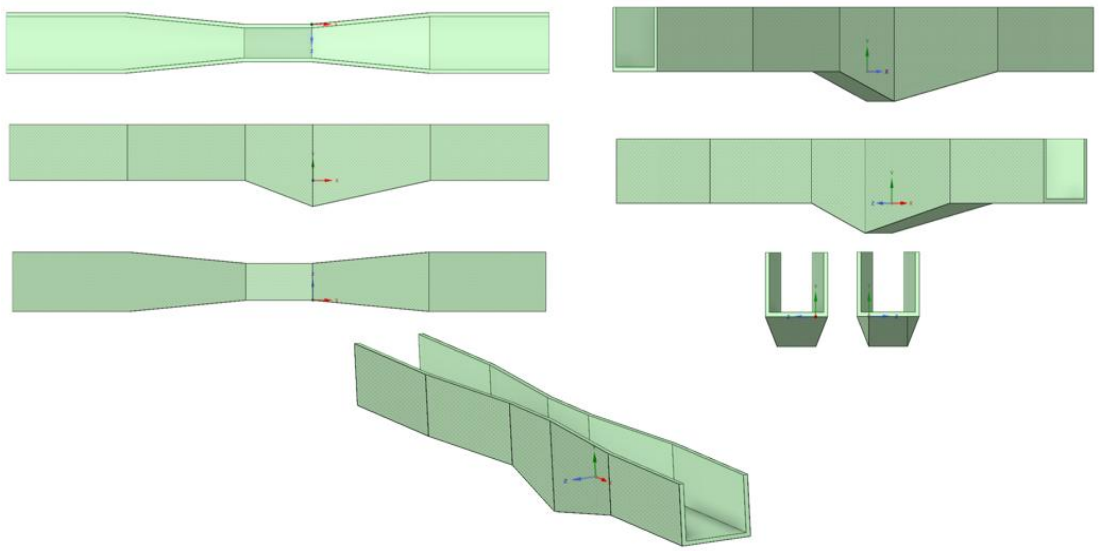
A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: (i) definição da geometria hidráulica da calha Parshall; (ii) modelagem física e numérica do escoamento multifásico; (iii) realização das simulações transientes considerando diferentes propriedades interfaciais do esgoto; e (iv) análise dos indicadores hidrodinâmicos associados à estabilidade da superfície livre e à estimativa de vazão.

Geometria da calha Parshall modelada

Foi adotada uma geometria tridimensional representativa de uma calha Parshall em escala próxima à real, compatível com aplicações em sistemas de esgotamento sanitário. O domínio computacional foi construído no *software* ANSYS *SpaceClaim* considerando seção convergente, garganta e seção divergente, preservando as características geométricas clássicas propostas por Parshall (1936).

A geometria utilizada apresentou largura de entrada e saída de 1,610 m, largura de garganta de 1,000 m, comprimento de garganta de 2,000 m e comprimento total aproximado de 9,000 m. A altura total da estrutura foi definida em 1,000 m, permitindo adequada representação do escoamento em superfície livre. A Figura 6 apresenta a geometria tridimensional adotada nas simulações numéricas.

Figura 6 – Geometria tridimensional da calha Parshall modelada computacionalmente.



Fonte: Autores (2026).

Modelagem computacional do escoamento

O escoamento foi modelado como tridimensional, transiente, turbulento, incompressível e bifásico, envolvendo as fases esgoto sanitário e ar. Para representar de forma mais realista o comportamento hidráulico do esgoto, alguns parâmetros físico-químicos da água foram modificados na base de materiais do ANSYS *Fluent*, permitindo a definição de um fluido com propriedades compatíveis às observadas em esgotos sanitários reais, conforme recomendações reportadas na literatura técnica. As propriedades adotadas encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades características do esgoto utilizadas para a simulação computacional.

Propriedade	Unidade	Esgoto Doméstico (típico)	Esgoto Industrial (típico)
Massa específica	kg/m³	998 a 1020	1000 a 1100
Viscosidade dinâmica	Pa.s	$1x10^{-3}$ a $1,2x10^{-3}$	$1,2x10^{-3}$ a $3,0x10^{-3}$
Viscosidade cinemática	m²/s	$1,0x10^{-6}$ a $1,2x10^{-6}$	$1,1x10^{-6}$ a $2,7x10^{-6}$
Tensão superficial	N/m	0,040 a 0,072	0,030 a 0,050
Difusividade de massa (O_2 na água)	m²/s	$2,0x10^{-9}$	$1,5x10^{-9}$ a $2,0x10^{-9}$

Fonte: Os autores, 2026.

A interface ar-líquido foi modelada explicitamente devido à necessidade de representar adequadamente as oscilações da superfície livre e as deformações interfaciais ao longo da calha Parshall. As equações

governantes de conservação de massa e quantidade de movimento foram resolvidas pelo Método dos Volumes Finitos (MVF), utilizando o *software* comercial ANSYS *Fluent*. Para o rastreamento da interface entre as fases foi empregado o método *Volume of Fluid* (VOF), amplamente utilizado em escoamentos multifásicos com superfície livre devido à sua capacidade de capturar a evolução temporal da interface ar-líquido e representar deformações superficiais associadas às variações hidrodinâmicas do escoamento.

A modelagem da turbulência foi realizada por meio do modelo k–ω SST (*Shear Stress Transport*), escolhido em função de sua robustez em escoamentos submetidos a elevados gradientes de velocidade, aceleração do fluxo, curvatura de linhas de corrente e possíveis regiões de separação, fenômenos frequentemente observados nas regiões convergente e de garganta de calhas Parshall. As equações de energia cinética turbulenta e da taxa específica de dissipação foram discretizadas utilizando esquemas numéricos de segunda ordem, visando maior estabilidade e precisão na resolução das estruturas turbulentas do escoamento.

Malha computacional e independência numérica

A discretização espacial do domínio foi realizada por meio de malha predominantemente hexaédrica estruturada, com refinamentos locais concentrados na região da garganta e próximos à superfície livre, onde se esperava maior intensidade de gradientes hidráulicos e instabilidades interfaciais.

Foram avaliadas três malhas progressivamente refinadas contendo aproximadamente $4{,}2 \times 10^5$; $8{,}7 \times 10^5$ e, por fim, $1{,}6 \times 10^6$ volumes de controle. O critério de independência de malha foi baseado na estabilidade do perfil longitudinal da superfície livre e na variação da carga hidráulica característica.

Diferenças inferiores a 1,5% entre as duas malhas mais refinadas indicaram convergência numérica satisfatória. Dessa forma, adotou-se a malha intermediária contendo aproximadamente $8{,}7 \times 10^5$ elementos, considerando o equilíbrio entre custo computacional e precisão dos resultados.

Condições de contorno e parâmetros numéricos de modelagem

As simulações numéricas foram realizadas em regime transiente utilizando *solver* baseado em pressão, com acoplamento pressão–velocidade por meio do algoritmo SIMPLE. A discretização temporal foi conduzida pelo método implícito de segunda ordem, enquanto a interpolação de pressão empregou o esquema PRESTO!, adequado para escoamentos em superfície livre submetidos a elevados gradientes de pressão e intensas deformações interfaciais.

Adotou-se um passo temporal de $1{,}0 \times 10^{-3}$ s, garantindo números de Courant inferiores à unidade nas regiões refinadas próximas à superfície livre e adequada resolução temporal das oscilações interfaciais. Cada simulação foi executada para um tempo físico total de 40 s, sendo os primeiros 15 s desconsiderados com o objetivo de eliminar efeitos transientes iniciais e assegurar condições hidrodinâmicas estatisticamente estabilizadas.

Na seção de entrada da calha foi imposta condição de vazão constante representativa da operação típica de sistemas de esgotamento sanitário. Na saída do domínio e na região superior exposta ao ambiente foram prescritas condições de pressão atmosférica, enquanto todas as paredes sólidas foram modeladas utilizando condição de não deslizamento (*no-slip*).

O critério de convergência numérica adotado consistiu na redução dos resíduos normalizados das equações governantes para valores inferiores a 10^{-4}. Além do monitoramento dos resíduos, também foi verificada a estabilização temporal das principais variáveis hidráulicas analisadas, incluindo altura da lâmina líquida, velocidade superficial e energia cinética turbulenta, garantindo consistência física e estabilidade dos resultados obtidos.

Avaliação da tensão superficial e das propriedades interfaciais no escoamento

A influência das propriedades interfaciais do esgoto foi investigada por meio da variação da tensão superficial da fase líquida, parâmetro diretamente associado à presença de surfactantes, detergentes, matéria orgânica dissolvida e compostos tensoativos presentes em esgotos sanitários reais. Neste sentido, foram analisados quatro valores distintos de tensão superficial, a saber: 0,030 N/m; 0,040 N/m; 0,050 N/m e 0,072 N/m.

O valor de 0,072 N/m corresponde aproximadamente à água limpa sob condições padrão e foi adotado como caso de referência. Os demais valores representam faixas típicas reportadas para esgoto sanitário na literatura técnica, associadas à alteração das propriedades interfaciais do fluido.

Embora a tensão superficial tenha sido o principal parâmetro analisado neste estudo, a modelagem também considerou propriedades hidráulicas representativas do esgoto sanitário, permitindo maior aproximação das condições operacionais reais observadas em sistemas de saneamento. Todos os demais parâmetros geométricos, hidráulicos e numéricos foram mantidos constantes entre os casos simulados, permitindo avaliar isoladamente os efeitos das propriedades interfaciais sobre a estabilidade hidrodinâmica do escoamento.

Variáveis analisadas

A análise hidrodinâmica dos resultados foi conduzida a partir da avaliação integrada do perfil longitudinal da superfície livre, da amplitude das oscilações interfaciais, do comprimento das regiões instáveis e da evolução espacial da velocidade superficial do escoamento ao longo da calha Parshall. Adicionalmente, foram analisados os campos de Energia Cinética Turbulenta (*Turbulent Kinetic Energy* – TKE) e número de Reynolds turbulento, visando compreender a relação entre produção turbulenta, deformabilidade da interface ar-líquido e estabilidade hidráulica do escoamento.

Também foi investigada a estabilidade da carga hidráulica característica, utilizada nos procedimentos convencionais de medição de vazão, bem como a influência das oscilações da superfície livre sobre as estimativas de descarga hidráulica. Por fim, visando avaliar quantitativamente a influência dos efeitos interfaciais na estimativa da vazão escoada ao longo da calha Parshall, foram determinadas as vazões correspondentes a cada um dos cenários de tensão superficial analisados nesta pesquisa.

Do ponto de vista computacional, a vazão foi obtida automaticamente após a convergência das simulações numéricas no ANSYS *Fluent*, a partir do balanço de massa calculado nas seções de controle do domínio computacional. Dessa forma, os valores obtidos incorporam diretamente os efeitos associados à tensão superficial, à deformabilidade da interface ar-líquido, às oscilações da superfície livre e às interações turbulentas multifásicas características do escoamento de esgoto sanitário em condições próximas às observadas em sistemas reais.

Adicionalmente, realizou-se a estimativa analítica da vazão por meio da formulação empírica clássica da calha Parshall apresentada na Equação 1. Os coeficientes hidráulicos C e n foram determinados por interpolação com base em geometrias normatizadas de calhas Parshall compatíveis com a configuração adotada nesta investigação. Para a determinação da carga hidráulica característica foi considerada a média temporal da altura da superfície livre obtida numericamente no ponto de medição recomendado pela ABNT NBR ISO 9826 (2008). Essa abordagem permitiu comparar os efeitos das oscilações interfaciais sobre a estimativa convencional da vazão, estabelecendo uma relação direta entre a variabilidade hidrodinâmica da superfície livre e a confiabilidade metrológica do dispositivo hidráulico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

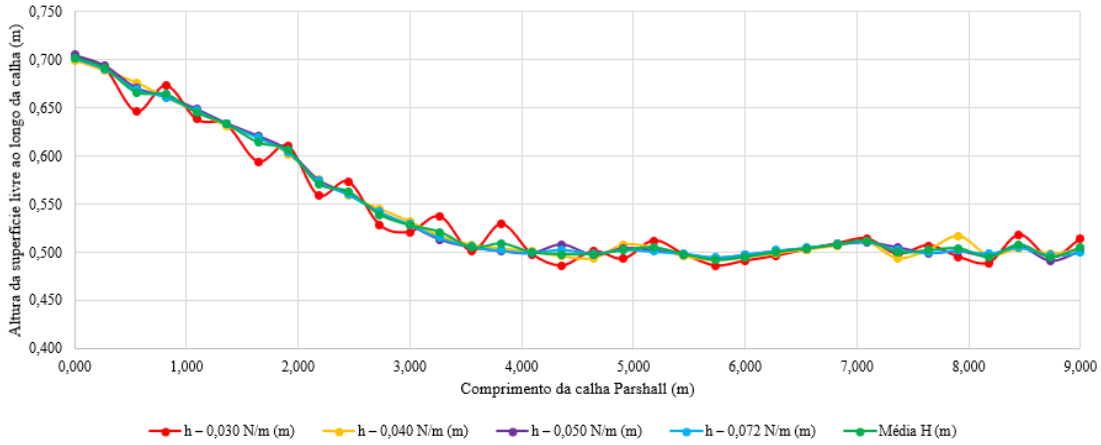
Variabilidade longitudinal da superfície livre

Os perfis longitudinais da superfície livre obtidos para os diferentes valores de tensão superficial são apresentados na Figura 7. Estes valores foram obtidos diretamente através dos modelos CFD gerados no ANSYS *Fluent* e editados na forma de um gráfico bidimensional.

Os resultados evidenciam influência direta das propriedades interfaciais sobre a estabilidade hidrodinâmica do escoamento ao longo da calha Parshall, especialmente nas regiões convergente e de garganta, onde ocorrem intensificação dos gradientes de velocidade, aceleração do fluxo e aumento da produção turbulenta.

De maneira geral, todos os casos apresentaram o comportamento hidráulico típico de calhas Parshall operando em regime livre, caracterizado pela redução progressiva da lâmina líquida em direção à garganta e posterior recuperação parcial da superfície livre na região divergente. Entretanto, a intensidade das oscilações interfaciais e o grau de estabilidade da superfície livre variaram significativamente em função da tensão superficial adotada.

Figura 7 – Variabilidade longitudinal da superfície livre para diferentes valores de tensão superficial.



Fonte: Os autores, 2026.

O cenário correspondente à menor tensão superficial analisada (0,030 N/m) apresentou as maiores amplitudes de oscilação da superfície livre, com deformações mais intensas e distribuição espacial mais irregular ao longo da região convergente. Esse comportamento tornou-se particularmente evidente entre aproximadamente x = 1,5 m e x = 5,5 m, região associada à aceleração do escoamento e à proximidade da seção de controle hidráulico da calha.

Fisicamente, esse comportamento está associado à redução das forças coesivas atuantes na interface ar-líquido. Em menores valores de tensão superficial, a energia necessária para deformar a superfície livre torna-se menor, aumentando a susceptibilidade da interface às perturbações induzidas pela turbulência. Como consequência, vórtices e flutuações turbulentas passam a transferir energia de maneira mais intensa para a superfície livre, favorecendo a amplificação de ondas superficiais e deformações locais da interface.

Em contrapartida, os casos associados a maiores tensões superficiais apresentaram comportamento hidrodinâmico mais estável, com menor amplitude de oscilação e recuperação mais uniforme da lâmina líquida após a garganta. Esse resultado demonstra que o aumento das forças interfaciais atua como mecanismo estabilizador da superfície livre, reduzindo a propagação de perturbações hidrodinâmicas ao longo da calha.

Ainda com base na Figura 7, os resultados obtidos corroboram a hipótese central desta pesquisa e indicam que propriedades físico-químicas do esgoto capazes de modificar a tensão superficial podem alterar significativamente a dinâmica da superfície livre em estruturas hidráulicas utilizadas para medição de vazão.

Indicadores de estabilidade hidrodinâmica da superfície livre

Com o objetivo de quantificar os efeitos hidrodinâmicos observados nos perfis longitudinais da superfície livre tanto na modelagem CFD quanto na Figura 7, foram determinados indicadores associados à intensidade das oscilações interfaciais e à extensão espacial das regiões instáveis. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros obtidos para os diferentes cenários simulados.

Tabela 2 – Indicadores hidrodinâmicos de estabilidade da superfície livre.

Tensão superficial σ (N/m)	Oscilação máxima (m)	Comprimento instável (m)	Distância de estabilização (m)
0,030	0,044	5,60	7,20
0,040	0,031	4,90	6,60
0,050	0,026	4,30	6,10
0,072	0,021	3,80	5,70

Fonte: Os autores, 2026.

Os resultados demonstram tendência consistente de aumento da instabilidade hidrodinâmica com a redução da tensão superficial. O caso correspondente a tensão superficial de 0,030 N/m apresentou a maior amplitude de oscilação da superfície livre e a maior extensão longitudinal da região instável, evidenciando maior persistência das perturbações interfaciais ao longo da calha.

Observa-se ainda que a estabilização da superfície livre ocorreu progressivamente mais distante da garganta para os casos de menor tensão superficial. Esse comportamento indica que a redução das forças interfaciais dificulta a dissipação das perturbações geradas na região de aceleração do escoamento, prolongando os efeitos das oscilações superficiais mesmo após a passagem pela seção crítica.

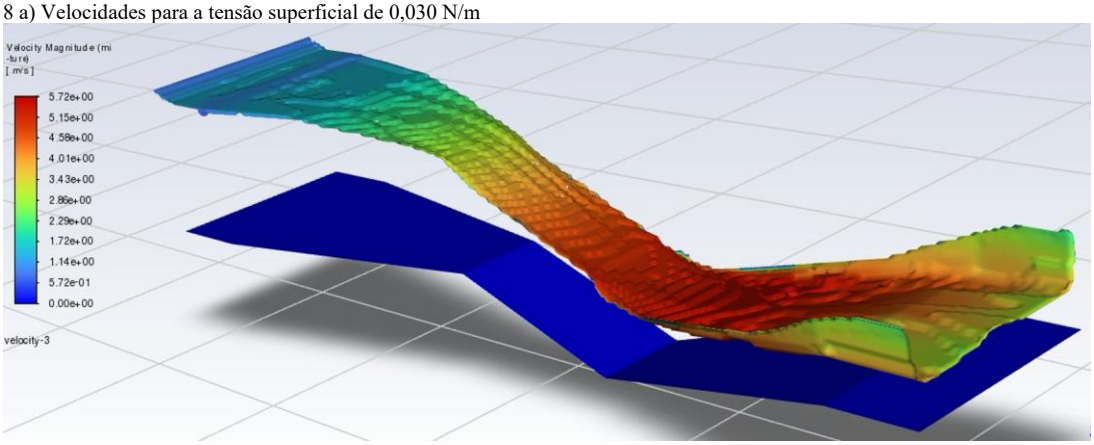
Na região divergente da calha verificou-se recuperação gradual da superfície livre em todos os cenários simulados. Entretanto, para menores valores de tensão superficial, essa recuperação ocorreu de forma mais irregular e oscilatória, sugerindo persistência de mecanismos turbulentos associados à reorganização hidrodinâmica do escoamento após a garganta. Do ponto de vista hidráulico, esses resultados evidenciam que propriedades interfaciais do esgoto podem modificar significativamente a estabilidade longitudinal da superfície livre, alterando a distribuição espacial da lâmina líquida em regiões diretamente relacionadas à medição de vazão.

Distribuição da velocidade superficial ao longo da calha Parshall

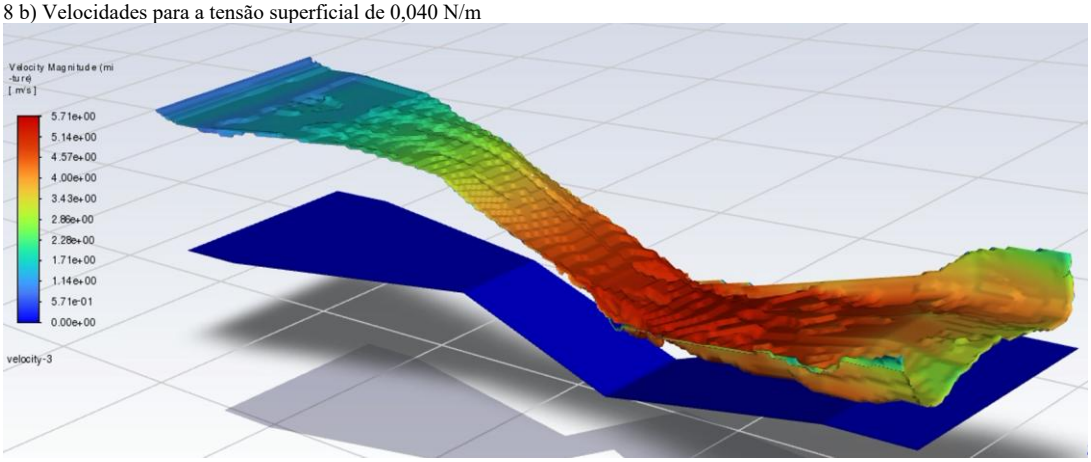
A Figura 8 apresenta os resultados de modelagem CFD para a velocidade superficial do escoamento ao longo da calha Parshall para os diferentes cenários simulados.

Figura 8 – Distribuição da velocidade superficial.

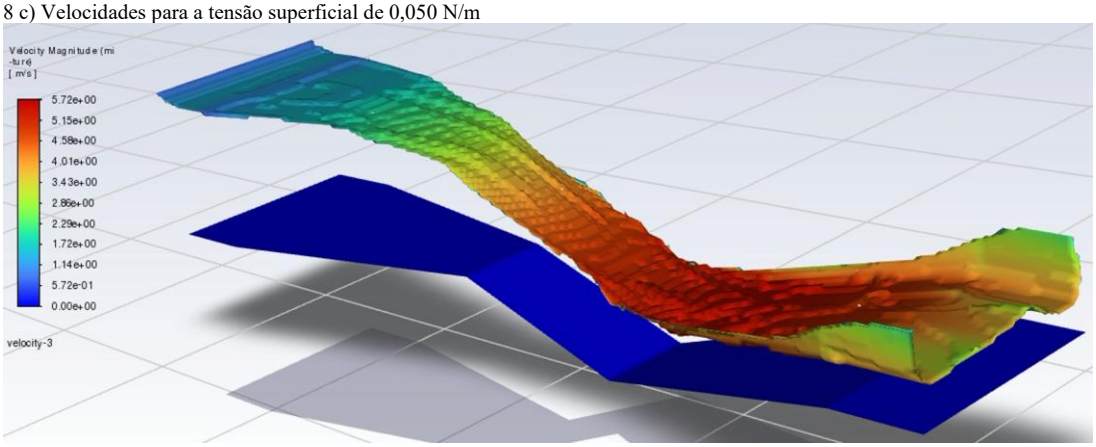
8 a) Velocidades para a tensão superficial de 0,030 N/m



8 b) Velocidades para a tensão superficial de 0,040 N/m



8 c) Velocidades para a tensão superficial de 0,050 N/m



Fonte: Os autores, 2026.

Os resultados evidenciam aceleração progressiva do escoamento em direção à garganta da calha, onde foram observadas as maiores magnitudes de velocidade superficial, superiores a aproximadamente 5,00 m/s. Esse comportamento é compatível com a redução da seção transversal efetiva do escoamento e com a consequente concentração de quantidade de movimento na região de controle hidráulico.

Os maiores gradientes de velocidade concentraram-se na região convergente e nas proximidades da garganta, coincidindo espacialmente com as regiões de maior instabilidade da superfície livre observadas anteriormente. Tal comportamento permite evidenciar um forte acoplamento entre aceleração do escoamento, produção turbulenta e deformabilidade interfacial.

Nos cenários associados às menores tensões superficiais observou-se aumento da irregularidade local dos campos de velocidade próximos à superfície livre, indicando maior interação entre as estruturas turbulentas e as deformações interfaciais. Esse resultado sugere que a redução das forças coesivas na interface favorece mecanismos de redistribuição de quantidade de movimento na superfície livre, intensificando a variabilidade hidrodinâmica do escoamento.

Após a garganta verificou-se desaceleração parcial do fluxo na região divergente, acompanhada de recuperação gradual da lâmina líquida. Essa fenomenologia está associada à conversão parcial de energia cinética em energia potencial após a seção crítica da calha.

Energia cinética turbulenta e número de Reynolds turbulento

A distribuição da energia cinética turbulenta na superfície livre do escoamento para as diferentes condições de tensão superficial simuladas encontra-se exposta na Figura 9.

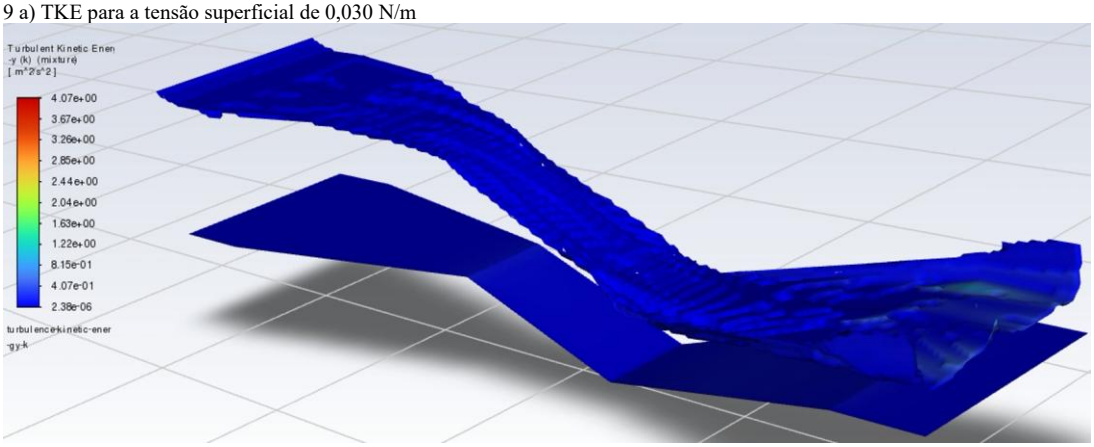
Os resultados indicaram concentração dos maiores níveis de TKE predominantemente na região da garganta e na transição para a seção divergente, onde os elevados gradientes de velocidade intensificaram os mecanismos de produção turbulenta.

Embora os campos turbulentos tenham permanecido espacialmente confinados às regiões de maior aceleração do fluxo, observou-se aumento localizado da energia turbulenta próximo à interface ar-líquido, especialmente nos cenários associados às menores tensões superficiais. Esse comportamento sugere transferência mais intensa de energia turbulenta para a superfície livre, favorecendo amplificação de oscilações interfaciais e deformações locais da interface.

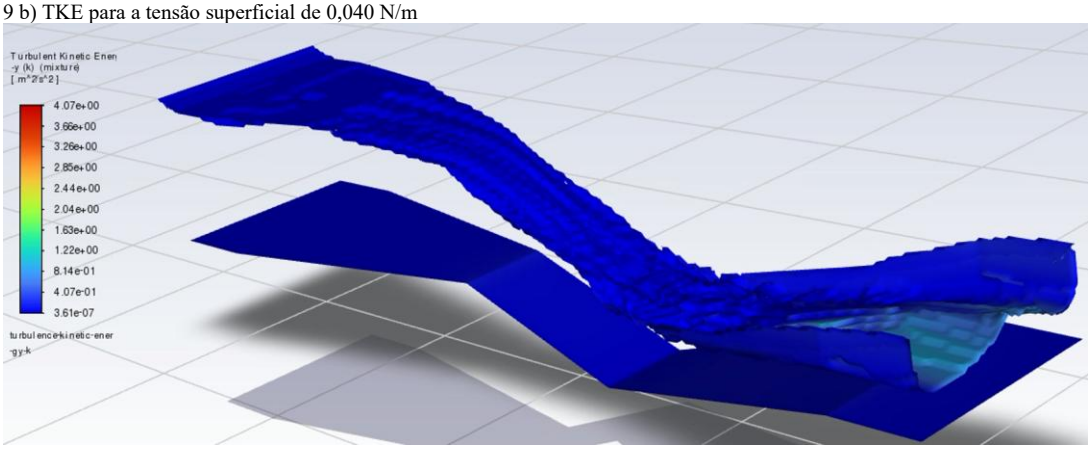
Somado à TKE, a Figura 10 apresenta os resultados correspondentes à modelagem computacional do número de Reynolds turbulento ao longo da calha Parshall sob diferentes condições de tensão superficial.

Figura 9 – Distribuição da energia cinética turbulenta ao longo da superfície livre da calha.

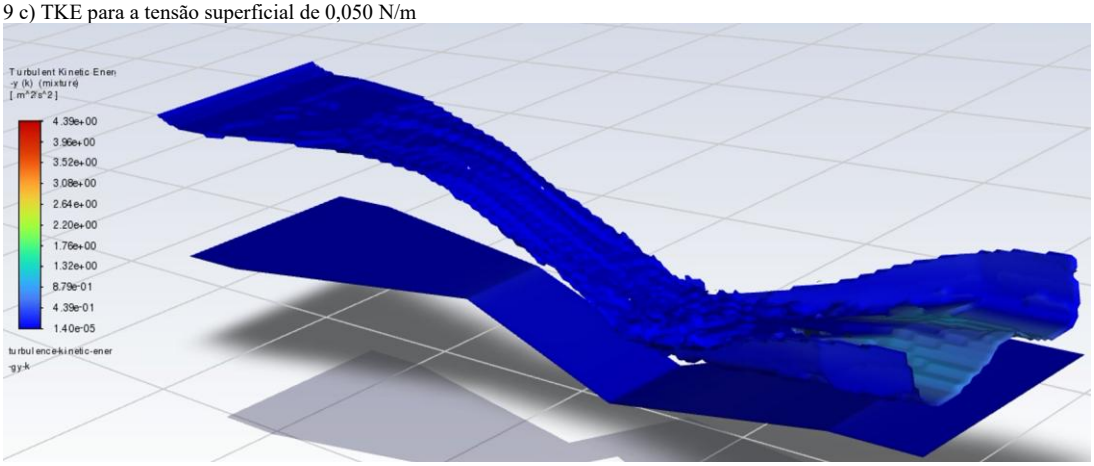
9 a) TKE para a tensão superficial de 0,030 N/m



9 b) TKE para a tensão superficial de 0,040 N/m



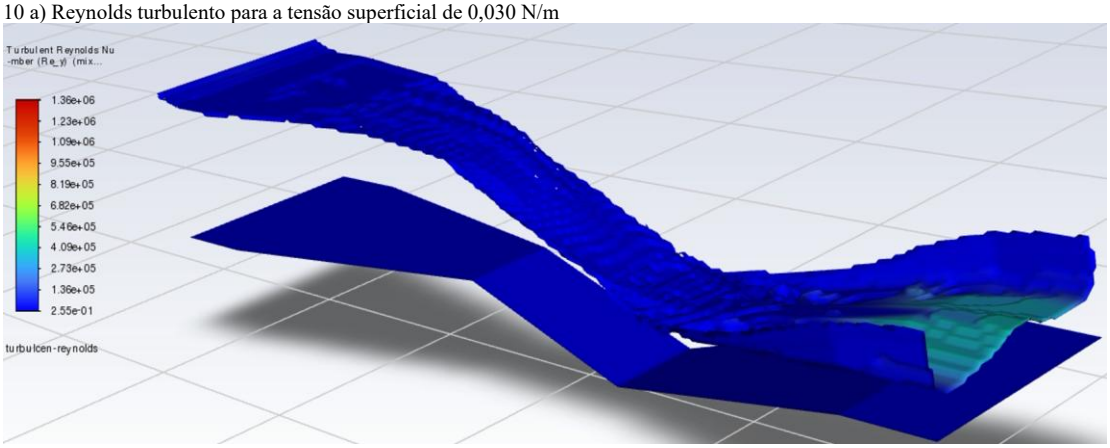
9 c) TKE para a tensão superficial de 0,050 N/m



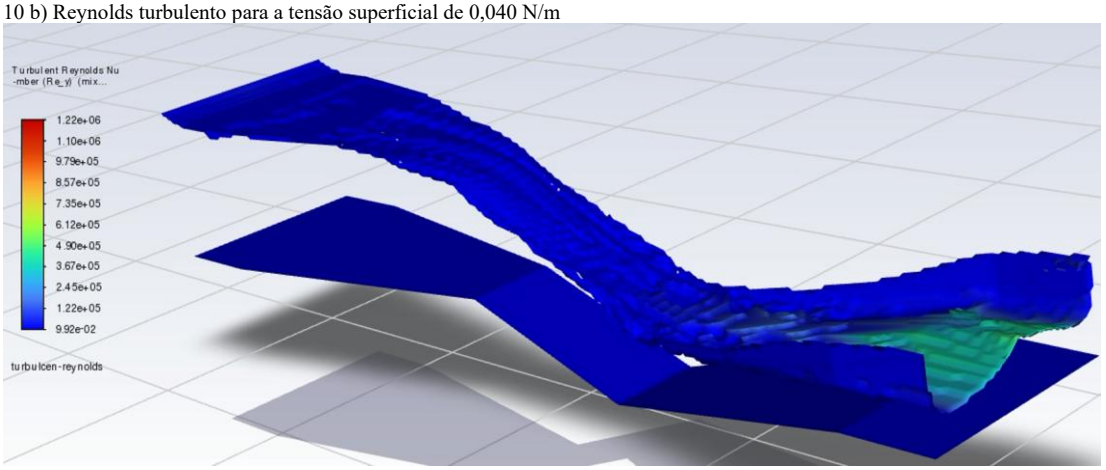
Fonte: Os autores, 2026.

Figura 10 – Distribuição do número de Reynolds Turbulento na calha Parshall.

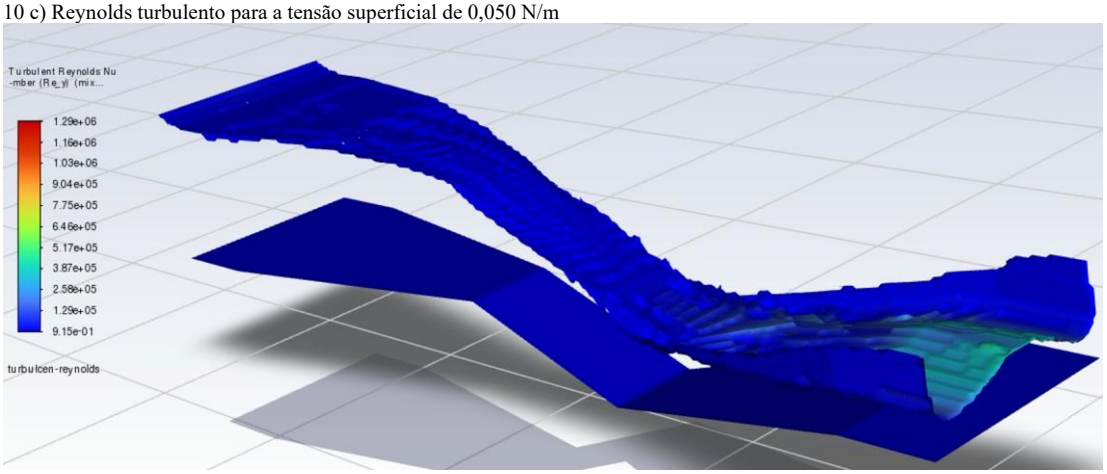
10 a) Reynolds turbulento para a tensão superficial de 0,030 N/m



10 b) Reynolds turbulento para a tensão superficial de 0,040 N/m



10 c) Reynolds turbulento para a tensão superficial de 0,050 N/m



Fonte: Os autores, 2026.

Os resultados confirmaram o caráter plenamente turbulento do escoamento em todo o domínio computacional, com números de Reynolds da ordem de 10^5 a 10^6, particularmente intensificados nas regiões convergente e de garganta. Os maiores valores concentraram-se próximos à seção de controle hidráulico, estendendo-se parcialmente à região divergente devido à persistência das estruturas turbulentas após a aceleração máxima do escoamento.

A análise conjunta dos campos de velocidade, energia cinética turbulenta e Reynolds turbulento evidencia que as instabilidades da superfície livre observadas nesta pesquisa resultam da forte interação entre mecanismos turbulentos e forças interfaciais atuantes no escoamento multifásico.

Por fim, os resultados demonstram ainda que reduções na tensão superficial aumentam a susceptibilidade da interface ar-líquido às perturbações turbulentas, intensificando a variabilidade hidrodinâmica do escoamento em regiões críticas para a medição hidráulica.

Influência das propriedades interfaciais na estimativa da vazão

Um dos aspectos mais relevantes observados nesta pesquisa refere-se à influência direta das propriedades interfaciais do esgoto sanitário sobre a determinação da descarga hidráulica característica utilizada na medição de vazão em calhas Parshall. Embora as formulações clássicas de descarga assumam implicitamente uma superfície livre estável e hidrodinamicamente bem definida, os resultados numéricos demonstraram que a presença de instabilidades interfaciais associadas à redução da tensão superficial modifica significativamente o comportamento da lâmina líquida na região de medição.

Neste sentido, a Tabela 3 apresenta os valores médios da carga hidráulica característica obtidos numericamente para cada cenário de tensão superficial, bem como as respectivas vazões estimadas por meio da formulação empírica tradicional da calha.

Tabela 3 – Influência da tensão superficial na estimativa da vazão.

Tensão superficial σ (N/m)	Altura média (H_a) (m)	Vazão estimada (Q) (m^3/s)	Diferença relativa (%)
0,030	0,535	0,652	+4,6
0,040	0,528	0,638	+2,4
0,050	0,523	0,629	+0,9
0,072	0,520	0,623	Referência

Fonte: Os autores, 2026.

As simulações computacionais evidenciaram que os menores valores de tensão superficial promoveram aumento das oscilações longitudinais da superfície livre, intensificando flutuações temporais da altura hidráulica a montante da garganta. Como consequência, a determinação do parâmetro H_a, utilizado nas equações empíricas de descarga da calha Parshall, tornou-se mais sensível às deformações interfaciais induzidas pela turbulência. Em termos físicos, isso ocorre porque a redução da tensão superficial diminui a capacidade restauradora da interface ar-líquido, permitindo maior amplificação das perturbações turbulentas transferidas da região interna do escoamento para a superfície livre.

Além da amplificação das oscilações superficiais, observou-se também maior irregularidade espacial do perfil hidráulico longitudinal nos cenários com menor tensão superficial. Esse comportamento indica que a interface ar-líquido passa a apresentar menor estabilidade hidrodinâmica global, dificultando a definição de uma condição hidráulica representativa e estacionária no ponto de medição convencional recomendado por norma. Em aplicações reais de sistemas de esgotamento sanitário, tal efeito pode contribuir para aumento das incertezas associadas à leitura da carga hidráulica, principalmente em situações de escoamento fortemente turbulento e presença elevada de surfactantes.

Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstram que pequenas variações da altura média da superfície livre foram suficientes para produzir diferenças mensuráveis nas vazões calculadas pela formulação empírica da calha Parshall. As diferenças relativas alcançaram aproximadamente 4,6% entre o caso de referência correspondente à água limpa e o cenário de menor tensão superficial analisado.

Embora aparentemente moderado, esse desvio possui elevada relevância operacional e metrológica, sobretudo em sistemas de monitoramento contínuo de vazão utilizados em estações de tratamento de esgoto, redes coletoras e processos de controle operacional. Do ponto de vista hidráulico, os resultados sugerem que parte da variabilidade normalmente atribuída a erros instrumentais ou flutuações operacionais pode, na realidade, estar associada ao próprio comportamento multifásico do esgoto sanitário. Isso reforça a necessidade de reconsiderar a hipótese clássica de superfície livre estável frequentemente adotada em metodologias convencionais de medição de vazão em canais abertos.

Outro aspecto importante observado foi a forte correlação entre regiões de elevada produção turbulenta e maior variabilidade da superfície livre. As regiões convergente e de garganta da calha apresentaram simultaneamente elevados gradientes de velocidade, aumento da Energia Cinética Turbulenta (TKE) e intensificação das deformações interfaciais. Essa interação evidencia que a resposta hidráulica do escoamento não depende exclusivamente da geometria da estrutura ou da vazão imposta, mas também das propriedades físico-químicas do fluido escoado.

Nesse contexto, os resultados obtidos reforçam a importância da utilização de modelagens multifásicas transientes em estudos envolvendo esgoto sanitário. Modelos simplificados baseados exclusivamente em propriedades da água limpa podem não representar adequadamente a dinâmica interfacial presente em condições reais de operação, especialmente em sistemas com elevada concentração de detergentes, matéria orgânica dissolvida e compostos surfactantes.

Sob a perspectiva da engenharia sanitária, os resultados desta pesquisa contribuem para ampliar a compreensão acerca dos mecanismos hidrodinâmicos que afetam a confiabilidade da medição de vazão em sistemas de esgotamento sanitário. Além disso, indicam que futuras metodologias de calibração hidráulica e modelagem computacional de calhas Parshall podem se beneficiar da incorporação explícita das propriedades interfaciais do esgoto, possibilitando estimativas mais representativas das condições reais de operação.

Embora o presente estudo tenha sido desenvolvido exclusivamente por meio de modelagem CFD, a magnitude das diferenças observadas entre os cenários simulados permite inferir que os efeitos associados à variação da tensão superficial possuem relevância física e potencial impacto metrológico. A maior diferença relativa de vazão observada entre os casos analisados foi da ordem de 4,6%, valor suficientemente elevado para indicar uma alteração sistemática da resposta hidráulica da calha decorrente exclusivamente da modificação das propriedades interfaciais do fluido.

Além disso, essa tendência apresentou comportamento monotônico e consistente para todos os cenários simulados, reforçando que as variações observadas não decorrem de flutuações numéricas aleatórias, mas da influência física exercida pela tensão superficial sobre a estabilidade da interface ar-líquido e, consequentemente, sobre a determinação da carga hidráulica característica.

Sob a perspectiva da modelagem numérica, buscou-se minimizar a influência das incertezas inerentes ao método computacional por meio da adoção de malha previamente submetida ao estudo de independência numérica, discretização espacial e temporal de segunda ordem, controle do número de Courant, monitoramento da convergência dos resíduos e análise da estabilização temporal das principais variáveis hidráulicas.

Dessa forma, todos os casos foram simulados mantendo-se rigorosamente constantes a geometria, as condições de contorno, o modelo de turbulência e os parâmetros numéricos, alterando-se exclusivamente a tensão superficial do fluido. Assim, as diferenças observadas podem ser atribuídas, predominantemente, ao efeito físico da propriedade interfacial investigada, reduzindo a possibilidade de que sejam decorrentes de artefatos numéricos do processo de simulação.

Do ponto de vista da instrumentação hidráulica, os resultados também apresentam interesse prático quando comparados às incertezas normalmente associadas aos sistemas convencionais de medição de vazão em calhas Parshall. Em aplicações reais, a determinação da altura hidráulica pode ser afetada por fatores como resolução e calibração de sensores ultrassônicos ou de pressão, posicionamento do sensor, oscilações naturais da superfície livre, tolerâncias construtivas da calha, condições de instalação, deposição de sólidos, além das próprias variações operacionais do escoamento.

Nesse contexto, a variabilidade adicional produzida pelas alterações da tensão superficial tende a somar-se às demais fontes de incerteza já presentes no processo de medição, podendo contribuir para ampliar a dispersão das estimativas de vazão obtidas em campo.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa sugerem que parte das diferenças frequentemente atribuídas exclusivamente à instrumentação ou às condições operacionais pode, na realidade, estar relacionada às propriedades físico-químicas do próprio esgoto sanitário. Embora este trabalho não tenha realizado uma propagação formal de incertezas experimentais, a análise numérica evidencia que a tensão superficial constitui

um fator de influência capaz de produzir variações de magnitude comparável às incertezas encontradas em sistemas reais de monitoramento hidráulico.

Esse resultado reforça a necessidade de futuras investigações experimentais envolvendo sensores de nível, análise metrológica completa e procedimentos de validação em escala laboratorial e operacional, permitindo quantificar de forma integrada a contribuição das propriedades interfaciais e das incertezas instrumentais na medição de vazão em calhas Parshall.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou a influência das propriedades físico-químicas do esgoto sanitário, com ênfase na variabilidade da tensão superficial, sobre o comportamento hidrodinâmico do escoamento e sobre os parâmetros associados à medição de vazão em calhas Parshall. A partir de modelagem numérico-computacional tridimensional, transiente, turbulenta e multifásica, foi possível analisar de forma integrada os efeitos interfaciais na estabilidade da superfície livre e na resposta hidráulica do escoamento em condições representativas de sistemas reais de esgotamento sanitário.

Os resultados demonstraram que reduções na tensão superficial aumentam significativamente a deformabilidade da interface ar-líquido, favorecendo a amplificação de oscilações superficiais e intensificando instabilidades hidrodinâmicas ao longo da seção convergente e da garganta da calha Parshall. Observou-se que os menores valores de tensão superficial produziram maiores amplitudes de oscilação da lâmina líquida, maior extensão longitudinal das regiões instáveis e maior tempo de estabilização hidrodinâmica do escoamento.

A análise dos campos de velocidade superficial, Energia Cinética Turbulenta (TKE) e número de Reynolds turbulento evidenciou forte acoplamento entre produção turbulenta e dinâmica interfacial. As regiões de maior aceleração do escoamento apresentaram intensificação simultânea dos gradientes de velocidade, da turbulência e das deformações da superfície livre, indicando que a estabilidade hidráulica da interface depende diretamente da interação entre forças inerciais, viscosas e interfaciais.

Do ponto de vista metrológico, verificou-se que as oscilações da superfície livre influenciaram diretamente a determinação da carga hidráulica característica utilizada nas equações empíricas de descarga da calha Parshall. Mesmo sob condições geométricas e operacionais idênticas, a variação da tensão superficial foi capaz de produzir diferenças de aproximadamente 4,6% nas vazões estimadas. Esse resultado demonstra que propriedades interfaciais frequentemente negligenciadas em abordagens clássicas podem introduzir incertezas adicionais na medição de vazão em sistemas de esgoto sanitário.

Os resultados obtidos reforçam a importância da utilização de abordagens multifásicas transientes em estudos hidráulicos aplicados ao saneamento, especialmente quando se busca representar condições operacionais mais próximas da realidade dos esgotos sanitários. Além disso, evidenciam que hipóteses simplificadoras baseadas em propriedades da água limpa podem não ser suficientes para descrever adequadamente a dinâmica hidráulica observada em sistemas reais contendo surfactantes, matéria orgânica dissolvida e compostos tensoativos.

De maneira geral, o trabalho contribui para ampliar a compreensão dos mecanismos hidrodinâmicos associados à interação entre turbulência e propriedades interfaciais em escoamentos em superfície livre, fornecendo subsídios técnicos relevantes para aplicações envolvendo modelagem computacional, instrumentação hidráulica e monitoramento de sistemas de esgotamento sanitário.

Como perspectivas para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de validações experimentais em escala laboratorial e operacional utilizando esgoto sanitário real, bem como a investigação de outras propriedades físico-químicas capazes de influenciar a dinâmica interfacial, como viscosidade, concentração de sólidos suspensos e presença de bolhas de ar. Também se sugere o desenvolvimento de modelos de tensão superficial variável espacial e temporalmente acoplados ao transporte de surfactantes, visando representar de forma ainda mais realista os fenômenos multifásicos presentes em sistemas hidráulicos de saneamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao MFLAB

da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC/UFU) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR ISO 9826: Medição de Vazão de Líquido em Canais Abertos — Calhas Parshall e SANIIRI. Rio de Janeiro, 2008.

2. BOS, Martin G. Discharge Measurement Structures. 3.ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), 1989.

3. CHENG, Xiang; LI, Yong; WANG, Zhiyuan. Surface Tension Effects in Wastewater Free-Surface Flows. Journal of Environmental Engineering, v.144, n.3, p.1-10, 2018.

4. FERZIGER, Joel H.; PERIĆ, Milovan. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3.ed. Berlin: Springer, 2002.

5. HEYRANI, Mehdi. Numerical Modeling of Flow in Parshall Flume Using Various Turbulence Models. 2022. PhD Thesis – University of Ottawa, Ottawa, Canada, 2022.

6. HEYRANI, Mehdi; MOHAMMADIAN, Abdolmajid; NISTOR, Ioan. Numerical Simulation of Flow in Parshall Flume Using Selected Nonlinear Turbulence Models. Hydrology, v.8, n.4, p.151, 2021. DOI: 10.3390/hydrology8040151.

7. HIRT, Cyril W.; NICHOLS, Brian D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics, v.39, n.1, p.201-225, 1981. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.

8. KARAMI, Hamed; ABDOLLAHI, Alireza; MOUSAVI, Seyed Javad. Computational Analysis of Free-Surface Turbulence and Sensor Reliability in Wastewater Parshall Flumes. Water Science and Technology, v.85, n.7, p.2119-2130, 2022.

9. KHOSRONEJAD, Ali; HERB, William; SOTIROPOULOS, Fotis; KANG, Seokkoo; YANG, Xiaolei. Assessment of Parshall Flumes for Discharge Measurement of Open-Channel Flows: A Comparative Numerical and Field Case Study. Measurement, v.167, p.108292, 2021. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108292.

10. MENTER, Florian R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, v.32, n.8, p.1598-1605, 1994. DOI: 10.2514/3.12149.

11. PARSHALL, Ralph L. The Parshall Measuring Flume. Bulletin 423. Fort Collins, CO: Colorado Agricultural Experiment Station, 1936.

12. SILVEIRA NETO, Aristeu da. Escoamentos Turbulentos: Análise Física e Modelagem Teórica. 1.ed. Uberlândia, 2020.

13. VERSTEEG, Henk K.; MALALASEKERA, Weeratunge. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2.ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

14. WU, Shuang; SUN, Jian; ZHAO, Xiaodong; LI, Yong. Effects of Wastewater Physical Properties on Free-Surface Instabilities in Parshall Flumes. Journal of Hydraulic Engineering, v.143, n.6, p.04017016, 2017.

15. ZHOU, Yan; ZHANG, Jun; CHEN, Kai. Physical Properties of Sanitary Sewage and Implications for Hydraulic Modeling. Water Research, v.169, p.115241, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115241.