

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MÉTODO DE PARTÍCULAS HIDRODINÂMICAS E
ALGORITMO DE PRÉ-SUAVIZAÇÃO BASEADO NA
VELOCIDADE COM ATRITO TRANSIENTE PARA A
ANÁLISE DE ESCOAMENTOS EM CONDUTOS
FORÇADOS**

IAGO QUIRINO E SILVA

ORIENTADOR: ALEXANDRE KEPLER SOARES
COORIENTADOR: JOEL ROBERTO GUIMARÃES VASCO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2025

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MÉTODO DE PARTÍCULAS HIDRODINÂMICAS E ALGORITMO
DE PRÉ-SUAVIZAÇÃO BASEADO NA VELOCIDADE COM
ATRITO TRANSIENTE PARA A ANÁLISE DE ESCOAMENTOS EM
CONDUTOS FORÇADOS**

IAGO QUIRINO E SILVA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Alexandre Kepler Soares, Dr. (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Sergio Koide (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Iran Eduardo Lima Neto (UFC)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, NOVEMBRO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, IAGO QUIRINO

Método de partículas hidrodinâmicas e algoritmo de pré-suavização baseado na velocidade com atrito transiente para a análise de escoamentos em condutos forçados [Distrito Federal] 2025. xvi, 75p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2025).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.CSPM

2.Pré-suavização

3.Dados experimentais

4.Atrito transiente

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, I. Q. (2025). Método de partículas hidrodinâmicas e algoritmo de pré-suavização baseado na velocidade com atrito transiente para a análise de escoamentos em condutos forçados. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PPGTARH. DM – 283/2025, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Iago Quirino e Silva.

TÍTULO: Método de partículas hidrodinâmicas e algoritmo de pré-suavização baseado na velocidade com atrito transiente para a análise de escoamentos em condutos forçados.

GRAU: Mestre

ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Iago Quirino e Silva
agoquirino@hotmail.com

Dedico este trabalho a Deus, minha família e meus irmãos em Cristo.

“Portanto, também nós, visto que temos a rodear-nos tão grande nuvem de testemunhas, desembaraçando-nos de todo peso e do pecado que tenazmente nos assedia, corramos, com perseverança, a carreira que nos está proposta, olhando firmemente para o Autor e Consumador da fé, Jesus, o qual, em troca da alegria que lhe estava proposta, suportou a cruz, não fazendo caso da ignomínia, e está assentado à destra do trono de Deus.”

(Hebreus 12:1-2)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao Deus Todo Poderoso, criador dos céus e da terra. A Ele, somente a Ele, seja todo o louvor e adoração. Se eu tenho alguma condição de escrever esta dissertação ou, até mesmo, pensar, falar e agir, é porque Ele permite. Graças dou a Jesus Cristo, o autor e consumidor da nossa fé. Ele, suportou a cruz e se assentou à direita do trono de Deus.

Agradeço à minha família, em especial meus pais, por todo o suporte que me deram nesse período. Sou grato a Deus por tê-los como pais, e clamo para poder retribuir tudo o que fizeram por mim, todos os sacrifícios que me permitiram chegar até aqui. Que Deus os abençoe grandemente, pois eles foram primordiais para a conclusão dessa dissertação. Agradeço também ao meu irmão, por todo o apoio nessa caminhada.

Agradeço ao meu orientador, o professor Alexandre, por todo o apoio e suporte que me concedeu durante essa jornada. Sempre, com muita paciência e dedicação, instruiu-me nas atividades, artigos e simulações. Mais que um docente, o professor Alexandre é um grande mentor e amigo, pelo qual sou grato a Deus pela oportunidade de ter conhecido.

Agradeço ao meu coorientador, o professor Joel, por todo o suporte ao longo do desenvolvimento dessa dissertação. Sempre, com muita atenção e paciência, auxiliou-me na modelagem numérica e no entendimento de pontos primordiais para o desenvolvimento da dissertação. Sou grato a Deus pela vida dele.

Agradeço a todo o corpo docente do PTAHR, o qual é composto por exímios professores. Foi um imenso privilégio ter sido aluno dessas pessoas tão excepcionais, as quais dedicam suas vidas ao ensino, atividade tão desvalorizada neste país.

Agradeço aos meus colegas do mestrado, que me apoiaram o tempo todo e me incentivaram a concluir a dissertação.

Agradeço aos meus amigos da igreja, verdadeiros irmãos em Cristo. Sou grato pelas orações e pelo cuidado ao longo dessa caminhada.

Também sou grato à CAPES e ao Decanato de Pós-Graduação (DPG) da UnB pela bolsa de mestrado e pelo auxílio financeiro para a participação em eventos, os quais foram de suma importância para meu crescimento pessoal.

RESUMO

CSPM E ALGORITMO DE PRÉ-SUAVIZAÇÃO BASEADO NA VELOCIDADE COM ATRITO TRANSIENTE PARA A ANÁLISE DE ESCOAMENTOS EM CONDUTOS FORÇADOS

O regime transiente é governado por um par de equações diferenciais parciais hiperbólicas (EDPs). Usualmente, empregam-se métodos numéricos para solucioná-las, dentre os quais se destaca o Método das Características (MOC). Esse é euleriano e utiliza uma malha característica para converter as EDPs governantes em equações diferenciais ordinárias (EDOs). De modo similar a outros métodos baseados em malhas, o MOC apresenta limitações, especialmente quando há problemas com superfície livre, contorno deformável e interface móvel. Nesse contexto, surgem os métodos sem malhas (meshfree), destacando-se o Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Esse é lagrangiano e permite que as EDPs governantes sejam convertidas em EDOs. Todavia, sua formulação gera erros numéricos expressivos. Para mitigá-los, vários métodos foram propostos, em que se destaca o Corrective Smoothed Particle Method (CSPM). Esse é baseado em uma expansão em série de Taylor, fornecendo aproximações corrigidas para uma função e suas derivadas. A fim de avaliar a eficiência de métodos com e sem malhas para a representação de transitórios hidráulicos, MOC e CSPM foram utilizados para simular um sistema reservatório-tubo-válvula sujeito a escoamento transiente. Nas simulações, foram incorporadas perdas por atrito transiente, utilizando-se o modelo de Vardy, e um algoritmo de pré-suavização para mitigar picos de pressão. Os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais, em que os parâmetros dos métodos e os efeitos relacionados às perdas por atrito transiente foram discutidas. Desenvolveram-se, também, três parâmetros para avaliar um número de partículas otimizado nas simulações com CSPM. Notou-se que, embora ambos os métodos tenham sido capazes de representar com precisão a amplitude da onda de pressão, erros de fase foram observados à medida que o evento transiente prosseguiu. Erros médios quadráticos (RMSE) e o coeficiente de eficiência de Nash (NSE) indicaram que o MOC gera resultados mais precisos. Verificou-se que a consideração de perdas por atrito transiente nas simulações contribuiu para a compatibilização entre os resultados numéricos e dados experimentais.

Palavras-chave: CSPM; dados experimentais; método das características; pré-suavização; escoamento transiente; atrito transiente.

ABSTRACT

CSPM AND A VELOCITY-BASED PRE-SMOOTHING ALGORITHM WITH UNSTEADY FRICTION FOR THE ANALYSIS OF FLOWS IN CLOSED-CONDUIT PIPES

Transient flow is governed by a pair of partial differential equations (PDEs). Usually, numerical methods are applied to solve them. The long-established one is the Method of Characteristics (MOC), which is based on the Euler mesh method. It allows the conversion of the governing PDEs into ordinary differential equations (ODEs). Similar to other grid-based methods, MOC has limitations, especially when there are problems with free surface, deformable boundary, and mobile interface. In this context, different meshfree methods were proposed. Amongst them, the smoothed particle hydrodynamics (SPH) stands out. It is Lagrangian and allows that the PDEs may be converted into ODEs. However, its formulation may present loss of accuracy and stability problems. In order to solve them, several techniques were developed, including the Corrective Smoothed Particle Method (CSPM). It extends the kernel estimate concept to the Taylor series expansion, resulting in corrective approximations for a function and derivatives. In order to evaluate the efficiency of grid-based and meshfree methods, MOC and CSPM were used to simulate a reservoir-pipe-valve system during a hydraulic transient. Vardy unsteady friction model (UFM) was used to incorporate friction losses, and a pre-smoothing algorithm was developed to mitigate overshoots at the wave fronts. Numerical results were compared with experimental data and method's parameters and effects related to the unsteady friction losses were discussed. Besides, three parameters were developed to evaluate an optimized number of particles in the CSPM simulations. It is found that, although both methods have been able to accurately reproduce the amplitude of the pressure wave, phase errors were visible as the transient event progresses. Root-mean-square-errors (RMSE) and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) indicated that MOC leads to more accurate values. Considering unsteady friction losses in the simulations contributes to the matching between numerical results and experimental data in terms of shift and shape of the pressure wave.

Keywords: CSPM; experimental data; method of characteristics; pre-smoothing; transient flow; unsteady friction.

1. SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GERAL.....	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS	5
3.2. MÉTODOS E DISPOSITIVOS PARA CONTROLE DE TRANSITÓRIOS.....	9
3.2.1. Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático (RHO)	9
3.2.2. Chaminé de equilíbrio	10
3.2.3. Tanque alimentador unidirecional (TAU)	11
3.2.4. Volante de inércia.....	12
3.2.5. Válvula de alívio de pressões.....	14
3.2.6. Ventosas.....	14
3.2.7. Válvula de retenção	15
3.3. EQUAÇÕES GOVERNANTES DO REGIME TRANSITÓRIO	16
3.4. TENSÃO DE ATRITO TRANSIENTE.....	18
3.5. MÉTODOS PARA SOLUCIONAR AS EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	20
3.6. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS (MOC)	21
3.6.1. Incorporação do fator de atrito variável na formulação do MOC	26
3.7. SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH)	27
3.7.1. Aproximação Kernel de uma função.....	28
3.7.2. Aproximação Kernel para a primeira derivada de uma função	31
3.7.3. Aproximação por partículas.....	32
3.7.4. Funções de suavização.....	34
3.8. CORRECTIVE SMOOTHED PARTICLE METHOD (CSPM).....	36
3.9. APLICAÇÃO DO CSPM A UM TRANSITÓRIO HIDRÁULICO.....	40
3.9.1. Método de Integração Temporal	40
3.9.2. Viscosidade Artificial.....	41
3.9.3. Incorporação do fator de atrito variável.....	42
3.9.4. Pré-suavização.....	42
4. METODOLOGIA	44
4.1. DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS NO SISTEMA	47

4.2. DETERMINAÇÃO DA VIZINHANÇA DE UMA PARTÍCULA	47
4.3. ALGORITMO DE PRÉ-SUAVIZAÇÃO	48
4.4. ESTUDO DE CASO	49
4.5. MÉTRICAS DE COMPARAÇÃO	51
4.5.1. Erros médios quadráticos (RMSE).....	52
4.5.2. <i>Nash–Sutcliffe</i> efficiency (NSE)	52
4.6. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PARTÍCULAS PARA O CSPM.....	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS DADOS EXPERIMENTAIS.....	53
5.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO CSPM	58
5.2.1. Número de partículas.....	58
5.2.2. Determinação do número de partículas	59
5.2.3. Função de suavização	61
5.2.4. Viscosidade artificial	62
5.3. INFLUÊNCIA DA PRÉ-SUAVIZAÇÃO.....	64
5.4. INFLUÊNCIA DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL.....	66
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Transitório hidráulico em sistema reservatório-tubo-válvula (Tsutiya, 2014) ..6	6
Figura 3.2 - Colapso de penstock na UHE de Oigawa (Chaudhry, 2014)8	8
Figura 3.3 - Mobilização de material aderido a tubulação durante transitório hidráulico (Weston <i>et al.</i> , 2021, modificado)9	9
Figura 3.4 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença do RHO (Tsutiya, 2014, modificado)..... 10	10
Figura 3.5 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença de chaminé de equilíbrio (Tsutiya, 2014)..... 11	11
Figura 3.6 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença de chaminé de equilíbrio (Tsutiya, 2014)..... 12	12
Figura 3.7 - Efeito causado nas frentes de onda devido à presença de um volante de inércia (Tsutiya, 2014) 13	13
Figura 3.8 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença de um volante de inércia (Tsutiya, 2014) 13	13
Figura 3.9 - Esquemática de uma válvula de alívio de pressões (Riasi e Tazraei, 2017) 14	14
Figura 3.10 - Foto e representação esquemática de uma ventosa do tipo tríplice função (SGPAM, 2021, modificado) 15	15
Figura 3.11 - Foto e representação esquemática de uma válvula de retenção do tipo portinhola (SGPAM, 2025, modificado)..... 16	16
Figura 3.12 - Comportamento da função peso (Diniz, 2020)..... 19	19
Figura 3.13 - Linhas características representadas num plano x-t (Soares, 2007) 22	22
Figura 3.14 - Malha regular fornecida pelo MOC (Soares, 2007)..... 23	23
Figura 3.15 - Razão de abertura da válvula de jusante (Wang <i>et al.</i> , 2017, modificado).... 25	25
Figura 3.16 - Resultados da compatibilização entre MOC e OpenFoam para uma seção um metro a montante da válvula de descarga (Wang <i>et al.</i> , 2017, modificado)..... 25	25
Figura 3.17 – Influência do comprimento de suavização (Hou <i>et al.</i> , 2012, modificado)... 30	30
Figura 3.18 - Aplicação da função kernel sobre um domínio S (Fernandes Júnior, 2021).. 30	30
Figura 3.19 - Domínio bidimensional Ω com superfície S preenchido por um conjunto de partículas (Liu e Liu, 2010)..... 33	33

Figura 3.20 - Função Kernel proposta por Lucy (1977) e sua derivada (Fernandes Júnior, 2021)	35
Figura 3.21 - Função Kernel proposta por Monaghan e Lattanzio (1985) e sua derivada (Fernandes Júnior, 2021).....	36
Figura 3.22 - Função kernel proposta por Hou <i>et al.</i> (2012).....	36
Figura 3.23 - Representação em que o domínio compacto intercepta o domínio do problema (Liu e Liu, 2010, modificado).....	37
Figura 3.24 - Limitação de fronteira do domínio compacto (Fernandes Júnior, 2021)	37
Figura 3.25 - Representações esquemáticas de aproximações por partículas em espaços unidimensionais (Liu e Liu, 2010)	38
Figura 3.26 - Inserção de partículas virtuais no contorno de um domínio S (Fernandes Júnior, 2021).....	38
Figura 3.27 - Influência da pré-suavização nos dados de pressão (seção de jusante) e velocidade (seção de montante) obtidos pelo CSPM (Hou <i>et al.</i> , 2012, modificado)	43
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia adotada para implementação do CSPM.....	45
Figura 4.2 - Fluxograma do fluxo de trabalho adotado nas comparações entre os resultados numéricos e dados experimentais	46
Figura 4.2 - Distribuição das partículas ao longo da tubulação (Fernandes Júnior, 2021) ..	47
Figura 4.3 – Distribuição das partículas no interior da tubulação e suas respectivas funções Kernel (Fernandes Júnior, 2021)	48
Figura 4.4 – Representação esquemática do sistema reservatório-tubo-válvula	49
Figura 4.5 - Aparato experimental: (a) tubulação; (b) válvula de jusante responsável pelo transitório; (c) reservatório de montante. (Martins <i>et al.</i> , 2016, modificado)...	49
Figura 4.6 - Sistema de aquisição de dados: (a) visão geral; (b) esquematização. (Martins <i>et al.</i> , 2016, modificado).....	50
Figura 4.6 - Razão de fechamento da válvula de jusante para o cenário 1	51
Figura 4.7 - Razão de fechamento da válvula de jusante para o cenário 2	51
Figura 5.1 - Cenário 1: carga de pressão na seção central	53
Figura 5.2 - Cenário 1: carga de pressão na seção da válvula de jusante	54
Figura 5.3 - Cenário 2: carga de pressão na seção central	54
Figura 5.4 - Cenário 2: carga de pressão na seção da válvula de jusante	55
Figura 5.5 - Cenário 1: velocidade na seção central	55
Figura 5.6 - Cenário 2: velocidade na seção central	56

Figura 5.7 - Influência do número de partículas na simulação com CSPM: carga de pressão na seção da válvula	58
Figura 5.8 – Influência do número de partículas na simulação com CSPM: velocidade na seção central	59
Figura 5.9 – RMSE em função de PAR_1 : seção da válvula	60
Figura 5.10 – RMSE em função de PAR_2 : seção da válvula	60
Figura 5.11 – RMSE em função de PAR_3 : seção da válvula	61
Figura 5.12 - Influência da função de suavização: seção da válvula.....	62
Figura 5.10 - Influência da viscosidade artificial: seção da válvula.....	63
Figura 5.11 - Influência do parâmetro α : seção da válvula.....	63
Figura 5.12 - Influência do parâmetro β : seção da válvula.....	64
Figura 5.13 - Influência do parâmetro de pré-suavização: carga de pressão na seção da válvula.....	65
Figura 5.14 - Influência do parâmetro de pré-suavização: velocidade na seção central.....	65
Figura 5.15 - Influência do fator de atrito variável: carga de pressão na seção da válvula ..	66
Figura 5.16 - Influência do fator de atrito variável: velocidade na seção central.....	66
Figura 5.17 - Influência do fator de atrito variável no primeiro segundo de simulação: carga de pressão na seção da válvula.....	67
Figura 5.18 - Influência do fator de atrito variável no primeiro segundo de simulação: velocidade na seção central	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores sugeridos para os coeficientes (Vardy <i>et al.</i> , 1993, modificado).....	19
Tabela 4.1 - Exemplo de matriz de vizinhança	48
Tabela 4.2 – Cenários testados nos experimentos	50
Tabela 5.1 – RMSE e NSE para o cenário 1	56
Tabela 5.2 – RMSE e NSE para o cenário 2	56
Tabela 5.3 - Cargas de pressão máximas e mínimas para ambos os cenários: seção da válvula.....	56

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Celeridade
A	Área de seção transversal
A_o	Área da seção transversal da válvula
AAT	Adutora de Água Tratada
A_1, A_2, B_1 e B_2	Coefficientes do método de Vardy
B	Parâmetro que é função das propriedades do fluido
C	Constante que depende do coeficiente de Poisson
C^+	Característica positiva
C^-	Característica negativa
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEPE	Conselho de Ensino Pesquisa e Extensão
CSPM	<i>Corrective Smoothed Particle Method</i> – Método Corretivo de Partículas Suavizadas
D	Diâmetro interno
D_{VR}	Diâmetro da válvula de retenção
DN	Diâmetro nominal
ΔH	Variação de carga hidráulica
ΔV	Variação de velocidade
Δx e dx	Discretização espacial
e	Espessura da parede da tubulação
E	Módulo de elasticidade do material da tubulação
f	Fator de atrito
f^*	Fator de atrito de Fenning
g	Aceleração da gravidade
h	Comprimento de suavização
H_o	Carga hidráulica no regime permanente
H	Carga piezométrica
HMOC	<i>Hybrid Method of Characteristics</i> - Método das Características Híbrido
k	Módulo de elasticidade do fluido; constante do SPH
K_{VR}	Coefficiente de perda de carga localizada dimensional
l	Litro
L	Comprimento da tubulação
m	Metro
MOC	<i>Method of Characteristics</i> - Método das Características
ρ	Massa específica do fluido
PSA	Pressão de Serviço Admissível
PMS	Pressão Máxima de Serviço
PN	Pressão nominal
p	Pressão
Q	Vazão
R	Coefficiente de resistência; Distância relativa entre partículas
r	Distância entre partículas; Resíduo
r_0	Raio da tubulação
RHO	Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático
s	Segundo

SPH suavizadas	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i> – Hidrodinâmica de partículas
t	Tempo
t*	Discretização temporal
TAU	Tanque Alimentador Unidirecional
V	Velocidade
ν	Coefficiente de Poisson
W	Função peso, função de suavização
x	Coordenada que representa distância
Ψ	Tempo adimensional
δ	Delta de Dirac
Re	Número de Reynolds
Y_1 e Y_2	Coefficientes do método de Vardy
Ω	Domínio Compacto

1. INTRODUÇÃO

Redes de condutos forçados são elementos essenciais na composição de vários sistemas de transporte de fluidos, tais como redes de distribuição de água para consumo humano, gasodutos, oleodutos e sistemas de irrigação (Soares, 2007). Tsutiya (2014) destaca que uma rede de distribuição de água compreende cerca de 50 a 75% do custo total de todas as obras de abastecimento.

Durante a vida útil de um sistema, espera-se que ele opere em regime permanente, situação na qual suas condições permanecem estáveis ao longo do tempo, garantindo segurança operacional. Caso ocorram perturbações, tais como o desligamento abrupto de um conjunto motor-bomba ou o fechamento rápido de uma válvula, o sistema passa a operar em regime transitório, em que as condições do escoamento variam ao longo do tempo. Essa variação perdura até o instante em que o equilíbrio é atingido e o sistema se estabiliza, situação na qual um novo regime permanente é estabelecido (Chaudhry, 2014). De modo geral, o regime permanente é um caso particular de regime transitório (Wylie; Streeter, 1993).

Durante o transitório, ocorrem variações acentuadas nas pressões e velocidades do sistema, o que pode levar à ruptura ou colapso de seus componentes. Também é possível que haja vazamentos e contaminação do fluido transportado (Weston *et al.*, 2021). Para evitar que isso ocorra, dispositivos de proteção são instalados no sistema. Destacam-se o reservatório hidropneumático (RHO), chaminé de equilíbrio e volante de inércia.

O regime transitório é governado por duas equações diferenciais parciais (EDPs) hiperbólicas, as quais se referem à conservação de quantidade de movimento linear (momentum) e conservação de massa (continuidade). Usualmente, empregam-se métodos numéricos para solucioná-las.

O método mais difundido e utilizado é o Método das Características (MOC), dada sua estabilidade numérica e simplicidade de implementação computacional. O MOC é um método euleriano que transforma as EDPs em equações diferenciais ordinárias (EDOs), as quais podem ser integradas ao longo de uma malha característica.

Esse método, assim como os demais baseados em malhas, apresentam algumas limitações. As principais advêm do estabelecimento das malhas, nas quais não é possível garantir que em todos os casos a condição de compatibilidade numérica seja igual à condição de compatibilidade física para um continuum (Liu e Liu, 2010). Essas limitações são mais

evidentes em problemas com superfície livre, contorno deformável e interface móvel (Zhao e Guidaoui, 2004; Liu e Liu, 2010; Pan *et al.*, 2022). Além disso, para problemas de geometria complexa, gerar uma malha se torna um processo difícil e oneroso.

Nesse contexto, diferentes métodos sem malha (meshfree) foram propostos para contornar os problemas advindos das abordagens eulerianas baseadas em malhas. O cerne desses métodos é providenciar soluções numéricas estáveis e precisas para EDPs com diferentes configurações de contorno. Para tal, são utilizados conjuntos de nós ou partículas distribuídos de modo aleatório ou uniforme.

Um dos métodos sem malhas baseado em partículas que tem ganhado destaque é o *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), o qual é lagrangiano. Ele define que um sistema pode ser representado por um conjunto de partículas que possuem propriedades materiais e interagem entre si dentro de uma faixa controlada por uma função de suavização, também conhecida como função Kernel (Hou *et al.*, 2012). Em sua concepção, o método foi desenvolvido para a resolução de problemas de astrofísica (Lucy, 1977; Gingold e Monaghan, 1977). Posteriormente, ele foi aplicado para a simulação de escoamentos, inclusive de fluidos em regime transitório (Hou *et al.*, 2015).

Dentre as vantagens do SPH, destacam-se sua simples implementação computacional e aplicabilidade a sistemas com geometrias e condições de contorno complexas. Todavia, a formulação clássica do método pode gerar erros numéricos expressivos. A fim de mitigá-los, diferentes abordagens foram propostas, em que se destaca a desenvolvida por Chen *et al.* (1999), resultando no *Corrective Smoothed Particle Method* (CSPM). A proposta dos autores é aplicar uma expansão em série de Taylor à formulação original do SPH, de modo a se obter aproximações corrigidas para uma função e suas derivadas. A mesma correção também pode ser obtida por meio de uma interpolação do tipo Shepard (Shepard, 1968).

Além dos problemas de estabilidade, o SPH pode gerar oscilações de pressão e velocidade quando aplicado a transientes hidráulicos (Zhang *et al.*, 2022). Para mitigá-las, acrescenta-se um termo dissipativo à formulação do método, o qual é conhecido como viscosidade artificial (Monaghan e Gingold, 1983; Liu e Liu, 2003; Hou *et al.*, 2012). Esse termo representa a dissipação viscosa no SPH (Pan *et al.*, 2022).

Na literatura, as aplicações do SPH em transitórios hidráulicos (Hou *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2022) são geralmente validadas por meio de comparações com modelagens baseadas no

MOC. Além disso, há poucos casos na literatura em que as perdas por atrito transiente são consideradas nas simulações. Percebe-se, portanto, a necessidade de implementar o SPH considerando essas perdas e validar os resultados obtidos por meio de dados experimentais.

Destaca-se, também, a baixa incidência de autores que explicitam como mitigar os picos de pressão gerados pelo CSPM nas primeiras frentes de onda do escoamento. Ademais, há poucos trabalhos que desenvolvem metodologias que desconsideram o fator de escala para determinar um número de partículas otimizado a ser empregado nas simulações, de modo a reduzir o esforço computacional.

A partir desse contexto, este trabalho propõe a análise de um transiente hidráulico gerado pelo fechamento rápido de uma válvula de jusante em um sistema experimental reservatório-tubo-válvula composto por uma tubulação de cobre *quasi*-horizontal (Martins *et al.*, 2016). Nessa análise, utilizaram-se o MOC e CSPM com a formulação de fator de atrito variável proposta por Vardy *et al.* (1993). Também foi implementada uma técnica de pré-suavização baseada no método XSPH (Colagrossi, 2004) para mitigar picos de pressão gerados pelo CSPM.

Os resultados numéricos foram validados por meio de comparação com dados experimentais obtidos para o sistema reservatório-tubo-válvula. Além disso, avaliou-se rigorosamente a influência dos parâmetros do CSPM nos resultados. Verificou-se, também, o número de partículas otimizado para as simulações por meio de alguns parâmetros obtidos a partir das características do escoamento e da tubulação.

O trabalho está dividido nas seguintes seções: introdução; objetivos; fundamentação teórica e revisão bibliográfica; metodologia; resultados e discussão; conclusões e recomendações.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um método numérico baseado em partículas (CSPM), sem malhas, com algoritmo de pré-suavização incorporando perdas por atrito transiente para a análise de transientes hidráulicos e compará-lo com um método com malhas (MOC) e dados experimentais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Incorporar perdas por atrito transiente nas simulações numéricas por meio da metodologia descrita por Vardy *et al.* (1993);
- Comparar os resultados numéricos obtidos pelo MOC e CSPM com os dados experimentais de um sistema reservatório-tubo-válvula;
- Analisar a influência dos parâmetros dos métodos numéricos nos resultados obtidos nas simulações;
- Investigar o impacto da adoção de perdas por atrito transiente nos resultados das simulações numéricas;
- Avaliar a influência da técnica de pré-suavização nos resultados do CSPM.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são inicialmente discutidos alguns tópicos concernentes a transitórios hidráulicos: conceito; equacionamento; danos provocados por transientes em sistemas reais; dispositivos de proteção; principais métodos utilizados para solucioná-los. Em seguida, é apresentada uma discussão acerca do Método das Características (MOC), o qual é amplamente empregado para solucionar as equações governantes do regime transitório. Após isso, apresenta-se o Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): histórico de desenvolvimento do método; princípios que o norteiam; equacionamento; limitações; correções ao método, seção na qual é apresentado o Corrective Smoothed Particle Method (CSPM).

3.1. TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Escoamentos podem ser classificados, do ponto de vista temporal, segundo dois regimes:

permanente e transiente. Em regime permanente, as condições do escoamento em determinado ponto, tais como pressão e velocidade, não se alteram ao longo do tempo. Caso essas condições variem temporalmente, tem-se regime transitório. De modo geral, o regime permanente é um caso particular de regime transiente (Wylie; Streeter, 1993).

Segundo Chaudhry (2014), o estudo de transitórios se iniciou com a investigação da propagação de ondas sonoras no ar, ondas em águas rasas e escoamento de sangue em artérias. Cientistas como Newton e Lagrange foram precursores nesse estudo.

De modo geral, o escoamento transitório se inicia quando há alguma perturbação no sistema que leva a um distúrbio nas condições de regime permanente. Algumas das causas mais comuns de transitórios são:

- Acionamento ou desligamento de uma bomba em um sistema de bombeamento. Em sistemas de abastecimento de água, o desligamento de bombas geralmente ocorre devido a interrupção no fornecimento de energia elétrica;
- Abertura ou fechamento de válvulas em tubulações, especialmente adutoras. Os cenários mais críticos ocorrem quando a manobra de abertura ou fechamento se desenvolve de modo rápido;
- Movimento das tubulações ou outros elementos do sistema.

A fim de ilustrar a ocorrência de um transatório hidráulico, tem-se a Figura 3.1. Ela representa o fechamento brusco de uma válvula de controle a jusante em um sistema

reservatório-tubo-válvula. Ressalta-se que esse sistema é ideal, uma vez que as perdas de carga não são consideradas.

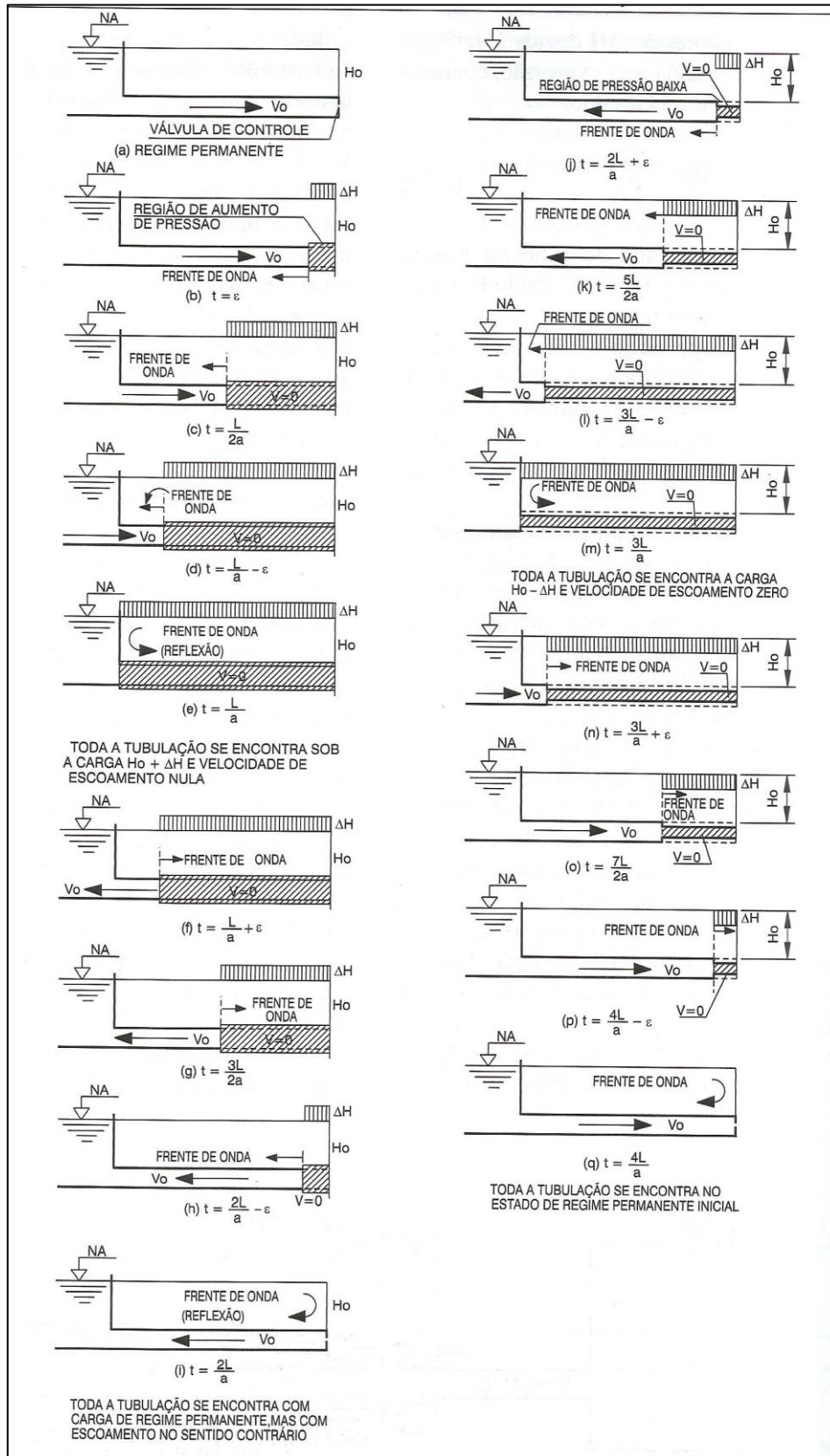


Figura 3.1 – Transiente hidráulico em sistema reservatório-tubo-válvula (Tsutiya, 2014)

É possível verificar que, inicialmente, o líquido junto à válvula é freado, convertendo sua energia cinética em uma onda de pressão que se propaga para montante com velocidade de “ a ”, chamada de celeridade.

Na região hachurada da Figura 3.1b, a carga hidráulica é igual à carga no regime permanente (H_0) somada à variação de pressão ΔH . Nas Figuras 3.1c-e, percebe-se que a onda de pressão continua se propagando a montante até atingir o reservatório. Nesse momento, todo o fluido se encontra com velocidade igual a zero, e o tubo está dilatado através do acúmulo de energia elástica.

Em seguida, a frente de onda começa a se propagar para jusante, fazendo com que as regiões não hachuradas voltem a atingir a pressão do regime permanente (Figuras 3.1f-i). Ao atingir a válvula de descarga, a onda de pressão é refletida e começa a se propagar para montante, no mesmo sentido do deslocamento do fluido. Isso faz com que as regiões hachuradas possam carga hidráulica igual ao valor da carga no regime permanente subtraído da variação de pressão ΔH (Figuras 3.1j-q).

Após isso, a frente de onda atinge o reservatório novamente, situação na qual todo o fluido se encontra com velocidade igual a zero e sujeito a subpressões. Em seguida, a frente de onda passa a se movimentar para jusante, fazendo com que as regiões não hachuradas da tubulação voltem a assumir pressões iguais às do regime permanente. Ao atingir a válvula novamente, todo o ciclo descrito anteriormente irá se repetir. Essa situação só deixará de existir quando o sistema atingir o repouso.

Embora ideal, o exemplo descrito na Figura 3.1 ilustra as variações de pressões e acelerações às quais um sistema é submetido durante o transitório hidráulico. Quando as pressões obtidas são maiores que as de regime permanente, têm-se sobrepressões. Em contrapartida, quando se obtêm valores menores que o de regime permanente, elas são denominadas de subpressões. É possível que as subpressões atinjam valores menores que o da pressão atmosférica, situação na qual elas passam a ser chamadas de pressões negativas.

A ocorrência de sobrepressões e subpressões em um sistema pode levar à ruptura ou colapso de seus componentes. Na Figura 3.2, observa-se o colapso de um penstock da usina hidrelétrica de Oigawa, o qual foi provocado por subpressões.

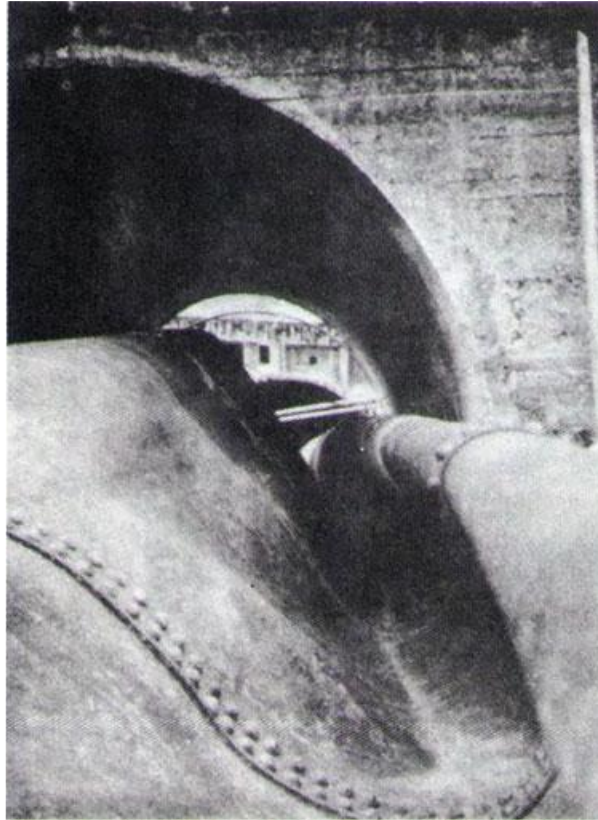


Figura 3.2 - Colapso de penstock na UHE de Oigawa (Chaudhry, 2014)

Além dos efeitos citados anteriormente, transitórios podem provocar vazamentos em sistemas de distribuição de água. Soares (2007) destaca que os incidentes provocados por eventos transitórios são responsáveis por elevadas perdas físicas e financeiras. Nesse contexto, o autor propõe a construção de um modelo para detectar e localizar vazamentos em tubulações, implementando um simulador para análise hidráulica em escoamento transitório.

Outro efeito advindo de eventos transitórios é a contaminação do fluido transportado. Em um estudo realizado no Reino Unido, Weston *et al.* (2021) verificaram que transitórios hidráulicos podem provocar a mobilização de material aderido à parede de tubulações. Com o auxílio de um aparato experimental, os pesquisadores concluíram que, tanto em transitórios com condições de aceleração quanto desaceleração, houve mobilização de material. Na Figura 3.3, é possível visualizar os resultados obtidos.

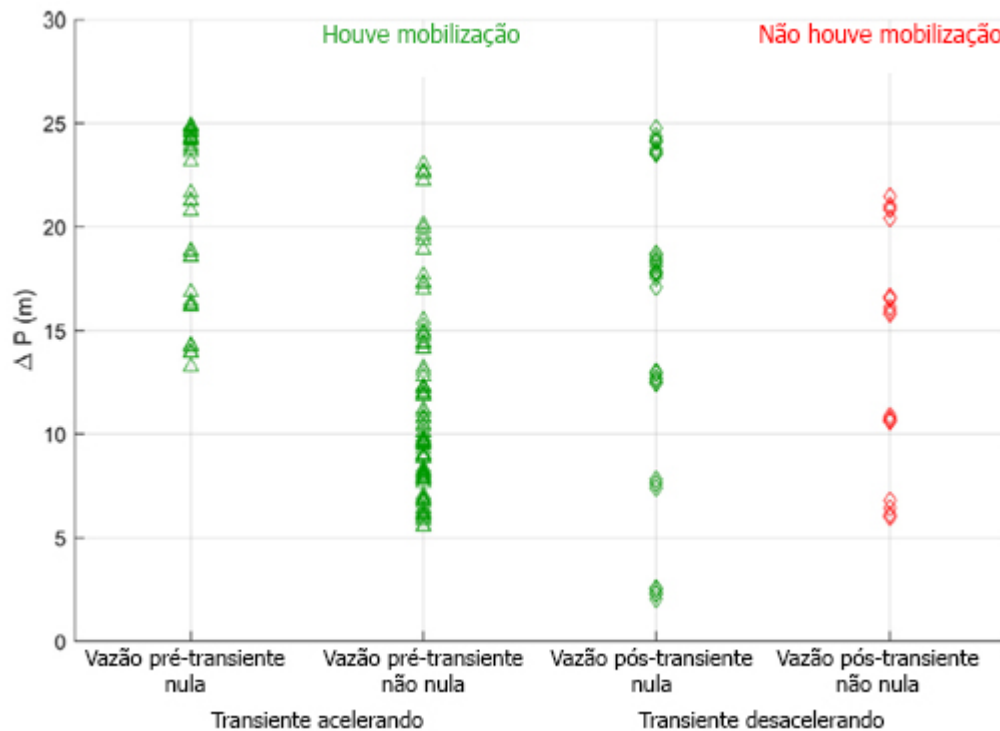


Figura 3.3 - Mobilização de material aderido a tubulação durante transiente hidráulico (Weston *et al.*, 2021, modificado)

3.2. MÉTODOS E DISPOSITIVOS PARA CONTROLE DE TRANSITÓRIOS

Nos próximos tópicos, serão apresentados alguns dispositivos de proteção comumente utilizados para o controle de transitórios.

3.2.1. Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático (RHO)

Trata-se de um reservatório estanque que contém água e ar comprimido em seu interior, apresentando pressão igual à do regime permanente fornecida pela bomba.

Durante o funcionamento normal, o ar dentro do reservatório entra em equilíbrio dinâmico com a pressão fornecida pela bomba. Quando a bomba é desligada, o ar dentro do reservatório se expande, expulsando água para fora, e uma válvula existente entre o RHO e a bomba se fecha, impedindo fluxo em direção à bomba.

Com o RHO alimentando a tubulação, minimiza-se a variação da carga hidráulica na tubulação durante o transiente. Isso pode ser visto ilustrado na Figura 3.4.

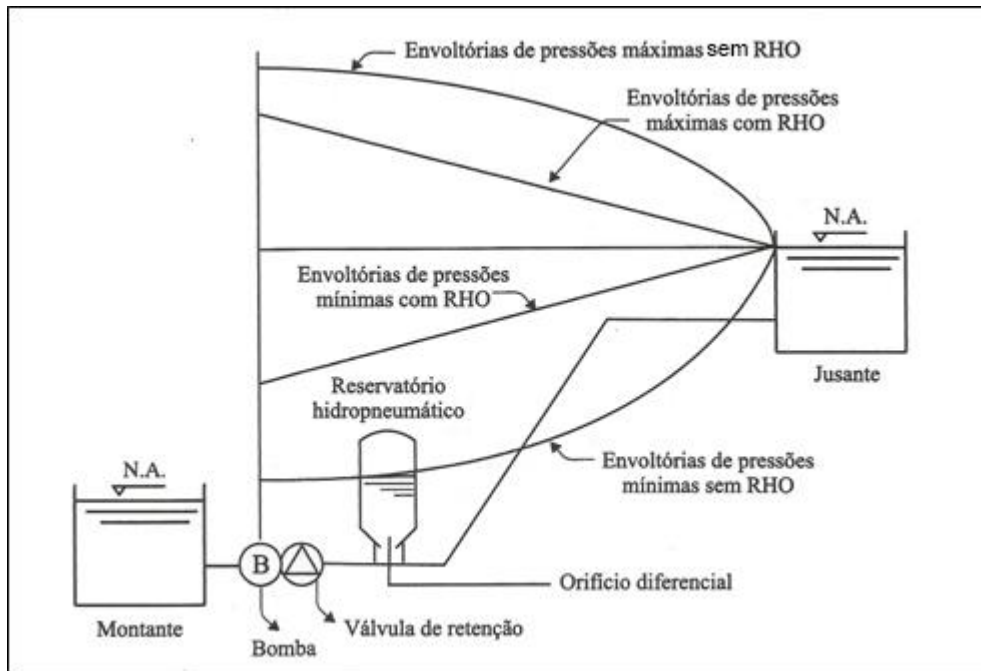


Figura 3.4 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença do RHO (Tsutiya, 2014, modificado)

3.2.2. Chaminé de equilíbrio

Estrutura cujo fim é interceptar as ondas de pressão na tubulação, trabalhando de modo semelhante a um reservatório intermediário com nível variável.

Por atuar como um reservatório intermediário, a chaminé de equilíbrio reflete as ondas de pressões que iriam no sentido de montante da tubulação. Deste modo, atua como uma espécie de amortecedor, aumentando o tempo de manobra e reduzindo a variação de pressões ocasionadas pelo transiente. A Figura 3.5 apresenta uma esquematização desse dispositivo.

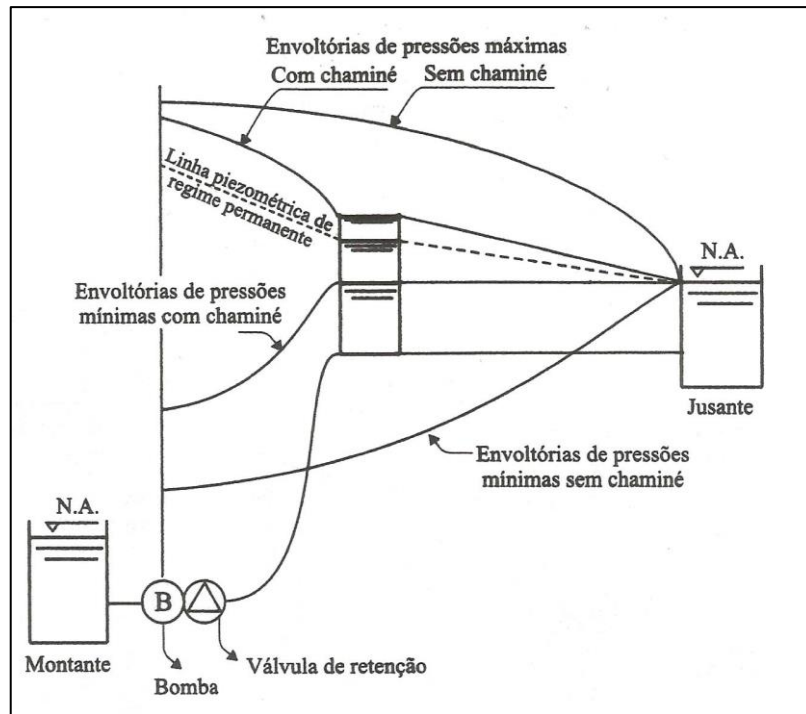


Figura 3.5 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença de chaminé de equilíbrio (Tsutiya, 2014)

3.2.3. Tanque alimentador unidirecional (TAU)

O tanque alimentador unidirecional (TAU) é uma estrutura de proteção com funcionamento semelhante à chaminé de equilíbrio. Todavia, o escoamento ocorre apenas no sentido TAU-tubulação.

Esse dispositivo é posicionado em pontos elevados da linha sujeitos a subpressões e, em casos extremos, pressões negativas. Desse modo, quando a pressão atinge valores inferiores à cota piezométrica nesses pontos, o TAU alimenta a tubulação. Como consequência, a envoltória de pressões mínimas é ajustada para um patamar que coincide com o nível mínimo do dispositivo de proteção, conforme ilustrado na Figura 3.6.

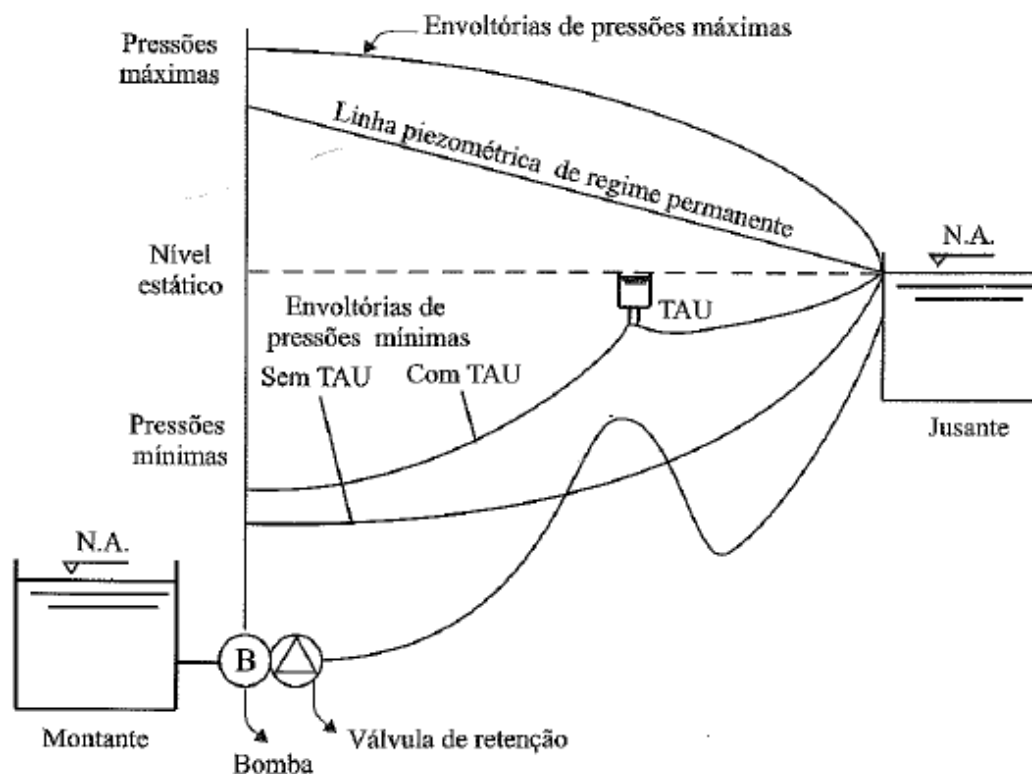


Figura 3.6 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença de chaminé de equilíbrio (Tsutiya, 2014)

3.2.4. Volante de inércia

Quando a operação de uma bomba é, por algum motivo, interrompida, tem-se a diminuição de sua rotação. Como consequência, há uma queda de pressão no fluido transportado. A fim de mitigar os efeitos causados pela variação de rotação da bomba, pode-se utilizar um volante de inércia.

Esse dispositivo é acoplado ao eixo da bomba a fim de aumentar o momento de inércia do conjunto girante, diminuindo a taxa de variação de rotação do conjunto. Desta maneira, uma vez que a carga fornecida por uma bomba é diretamente proporcional à sua rotação, limitar-se-á as quedas de pressão na tubulação. Isso pode ser observado na Figura 3.7. Também é possível verificar as envoltórias de pressões em uma rede com e sem volante de inércia na Figura 3.8.

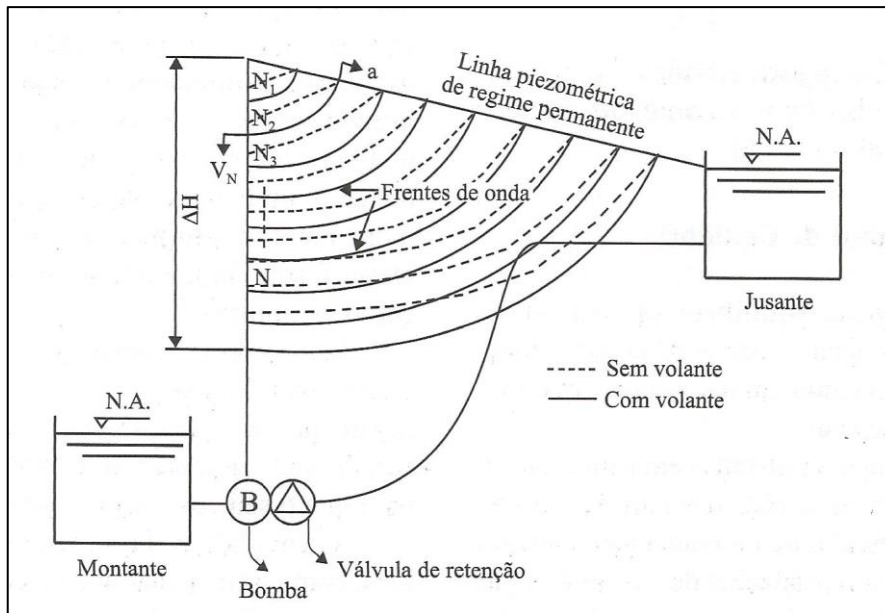


Figura 3.7 - Efeito causado nas frentes de onda devido à presença de um volante de inércia (Tsutiya, 2014)

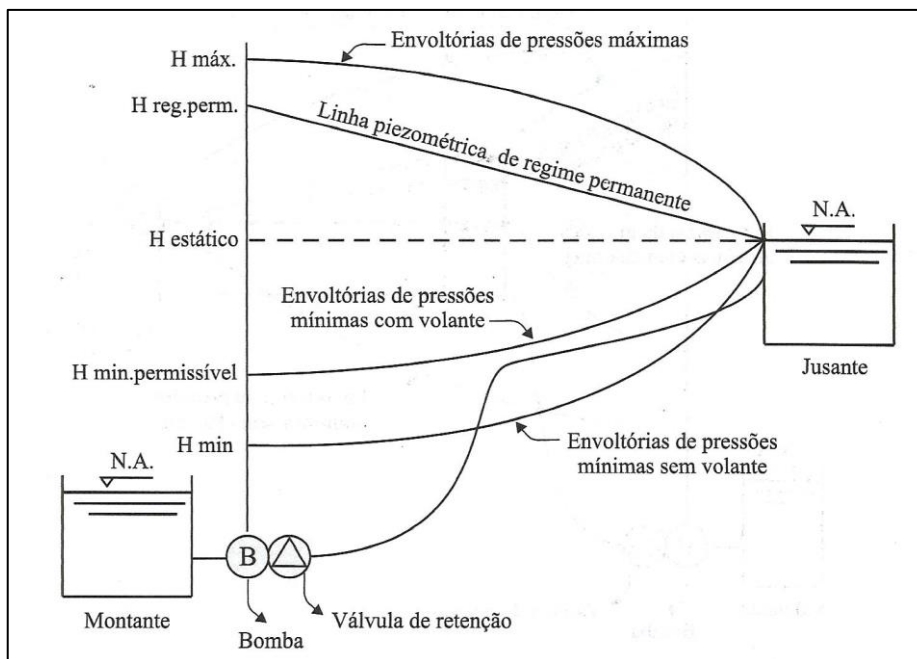


Figura 3.8 - Envoltórias de pressões máximas e mínimas com e sem a presença de um volante de inércia (Tsutiya, 2014)

Vale ressaltar que, embora o volante de inércia seja uma solução relativamente simples do ponto de vista técnico, sua utilização é limitada. Isso se deve ao fato de que esse dispositivo apresenta sérias dificuldades operacionais e executivas, dificultando sua implementação. Uma dessas dificuldades é o fato de que o volante de inércia, geralmente, se apoia em dois mancais, fazendo com que haja a possibilidade de deslocamentos do seu eixo, o que prejudica sua operação.

3.2.5. Válvula de alívio de pressões

Segundo Boulos *et al.* (2005), válvulas de alívio de pressão ejetam água na tubulação para prevenir o aumento excessivo de pressões. A válvula é ativada quando um determinado local da tubulação, não necessariamente a válvula, atinge uma pressão pré-determinada. A esquematização dessa válvula pode ser vista na Figura 3.9.

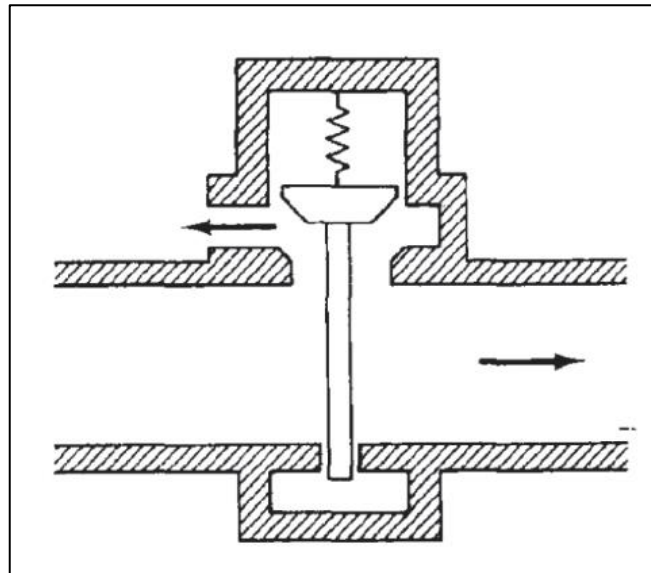


Figura 3.9 - Esquematização de uma válvula de alívio de pressões (Riasi e Tazraei, 2017)

3.2.6. Ventosas

Ventosas são dispositivos de proteção utilizados para expulsão ou admissão de ar em tubulações, evitando depressões e aliviando o sistema em caso de sobrepressões. São primordiais nas fases de enchimento e esvaziamento de adutoras. Uma foto e representação esquemática de uma ventosa tríplice função são apresentadas na Figura 3.10.

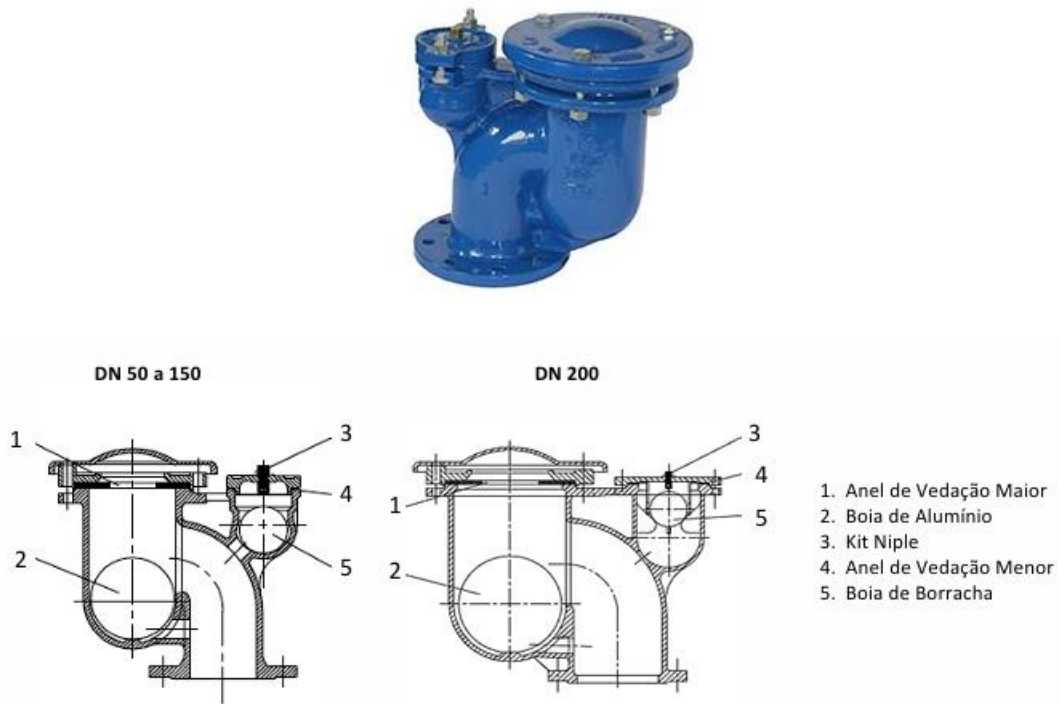


Figura 3.10 - Foto e representação esquemática de uma ventosa do tipo tríplice função (SGPAM, 2021, modificado)

3.2.7. Válvula de retenção

Válvulas de retenção são utilizadas para impedir que o escoamento ocorra em fluxo reverso em bombas e outros dispositivos utilizados em linhas de recalque. Sua atuação é comumente observada em casos de falha de fornecimento de energia elétrica, situação na qual ocorre uma parada do conjunto motor-bomba. Na Figura 3.11, é apresentada uma foto e uma representação esquemática de uma válvula de retenção do tipo portinhola.

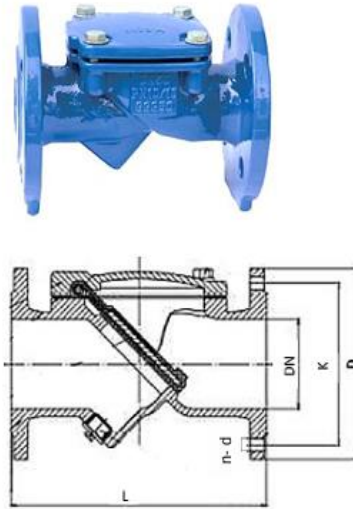


Figura 3.11 - Foto e representação esquemática de uma válvula de retenção do tipo portinhola (SGPAM, 2025, modificado)

3.3. EQUAÇÕES GOVERNANTES DO REGIME TRANSITÓRIO

O regime transitório é governado pelas equações de conservação de massa, também conhecida como equação de continuidade, e conservação da quantidade de movimento linear. Elas são descritas, respectivamente, pela Equação 3.1 e Equação 3.2.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{Equação 3.1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{\tau \pi D}{\rho A} = 0 \quad \text{Equação 3.2}$$

em que P é a pressão; t é o tempo; V é a velocidade do escoamento; x é a coordenada que representa a distância ao longo do eixo da tubulação; ρ é a massa específica do fluido; a é a velocidade da onda de pressão (celeridade); θ é a inclinação da tubulação; τ é a tensão de atrito na parede da tubulação; D é o diâmetro da tubulação; A é a área da seção transversal da tubulação.

Essas equações são diferenciais parciais hiperbólicas e descrevem a propagação de ondas em um fluido (Chaudhry, 2014). Elas também podem ser representadas na forma Lagrangiana, conforme descrito na Equação 3.3 e Equação 3.4.

$$\frac{DP}{Dt} = -\rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{Equação 3.3}$$

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau \pi D}{\rho A} - V \frac{\partial V}{\partial x} - g \sin \theta \quad \text{Equação 3.4}$$

Considerando que a tubulação é horizontal e desprezando os termos de aceleração convectiva, representados por $V(\partial p/\partial x)$ e $V(\partial V/\partial x)$, obtém-se a formulação simplificada das equações governantes do regime transiente. Essa formulação é descrita, na forma lagrangiana, pela Equação 3.5 e Equação 3.6.

$$\frac{DP}{Dt} = -\rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau \pi D}{\rho A} \quad \text{Equação 3.6}$$

A tensão de atrito na parede da tubulação pode ser segmentada em duas parcelas: permanente e transiente, conforme apresentado na Equação 3.7.

$$\tau = \tau_s + \tau_u \quad \text{Equação 3.7}$$

em que τ_s e τ_u são, respectivamente, as parcelas permanente e transiente. A parcela de tensão de atrito permanente pode ser obtida pela formulação proposta por Darcy-Weisbach para o cálculo de perdas por atrito (Wylie e Streeter, 1993; Chaudhry, 2014), conforme descrito na Equação 3.8.

$$\tau_s = \frac{1}{8} \rho f V |V| \quad \text{Equação 3.8}$$

em que f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, o qual pode ser calculado pela fórmula de Swamee (1993), descrita na Equação 3.9:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad \text{Equação 3.9}$$

em que ε é a rugosidade absoluta da parede da tubulação e Re o Número de Reynolds, dado pela Equação 3.10.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \text{Equação 3.10}$$

em que ν é a viscosidade cinemática do fluido. Também é usual representar as equações de continuidade e quantidade de movimento linear em função da carga hidráulica e vazão. Essa representação é indicada na Equação 3.11 e Equação 3.12 de modo simplificado e após a substituição da tensão de atrito permanente descrita pela Equação 3.8.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Equação 3.11}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} + \frac{\tau_u \pi D}{\rho A} = 0 \quad \text{Equação 3.12}$$

em que H é a carga piezométrica e Q é a vazão. A celeridade pode ser calculada pela formulação proposta por Halliwell (1963), a qual é descrita pela Equação 3.13.

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad \text{Equação 3.13}$$

em que K é o módulo de elasticidade do fluido; E é o módulo de elasticidade do material da tubulação; ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas da tubulação.

3.4. TENSÃO DE ATRITO TRANSIENTE

De modo geral, grande parte das análises de escoamento em regime transitório considera apenas o fator de atrito calculado para o regime permanente. Todavia, essa simplificação gera imprecisões na descrição dos picos de pressão durante o transitório (Diniz, 2020). Nesse contexto, diferentes abordagens foram desenvolvidas para avaliar o comportamento do fator de atrito em regime transitório.

Uma das formulações mais conhecidas é a de Vardy *et al.* (1993). Nela, os autores propõem um modelo que segue as hipóteses formuladas por Zielke (1968) e determina um termo referente à tensão de atrito no regime transiente. Para determinar a função peso W , utilizou-se como base o método desenvolvido por Trikha (1975), o que resultou na Equação 3.14:

$$W_{app}(\Psi) \approx (A_1 e^{-B_1 \Psi} + A_2 e^{-B_2 \Psi} + \dots) \quad \text{Equação 3.14}$$

em que Ψ é um tempo adimensional, expresso por:

$$\Psi = \frac{\nu t^*}{r_o^2} \quad \text{Equação 3.15}$$

em que ν é a viscosidade cinemática do fluido, t^* é a discretização temporal e r_o é o raio da tubulação. Os autores afirmam que apenas dois termos da Equação 3.14 precisam ser calculados, fazendo com que os coeficientes A_1 , A_2 , B_1 e B_2 possam ser determinados a partir da minimização entre as funções W e W_{app} . Uma sugestão para esses coeficientes é apresentada na Tabela 3.1, enquanto um gráfico do comportamento da função peso é exposto na Figura 3.12.

Tabela 3.1 - Valores sugeridos para os coeficientes (Vardy *et al.*, 1993, modificado)

f^*Re	W_{min}	W_{max}	W_{min}	W_{max}	A_1	A_2	B_1	B_2
250	6×10^{-7}	5×10^{-5}	30	330	250	$4,4 \times 10^5$	74	$4,2 \times 10^4$
500	5×10^{-7}	5×10^{-5}	8,8	330	260	$5,6 \times 10^5$	65	$1,15 \times 10^5$
1000	4×10^{-7}	∞	0	330	350	$9,8 \times 10^5$	65	$4,12 \times 10^5$
2000	3×10^{-7}	∞	0	330	470	$2,8 \times 10^6$	65	$1,62 \times 10^6$

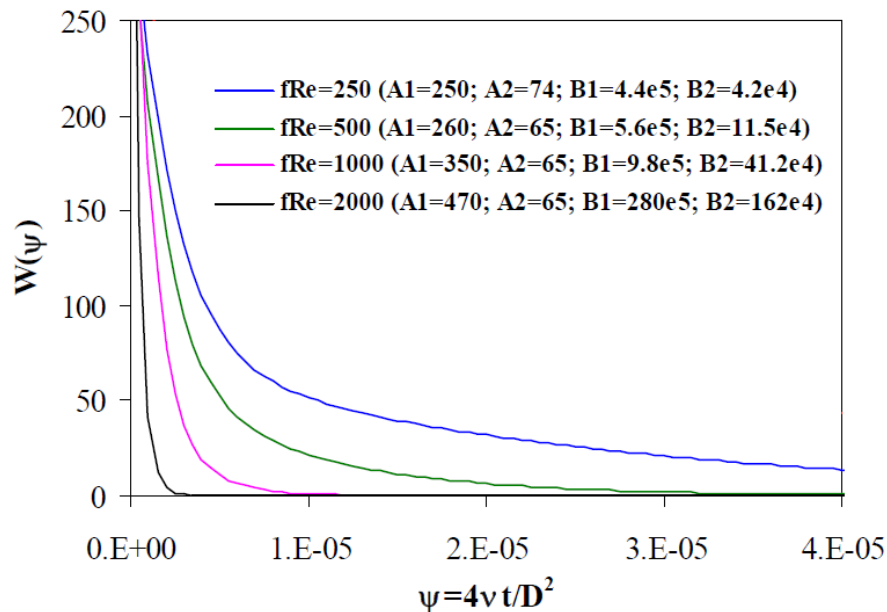


Figura 3.12 - Comportamento da função peso (Diniz, 2020)

Vale ressaltar que o termo f^* da Tabela 3.1 é o fator de atrito de Fenning, o qual é igual a $f/4$. Os autores, então, propuseram que o comportamento do fator de atrito durante o transitório seja avaliado por uma tensão de atrito transitório, expressa por:

$$\tau_u = \frac{4\mu}{D} [Y_1 + Y_2] \quad \text{Equação 3.16}$$

em que τ_u é a tensão de atrito em regime transitório. Os termos Y_1 e Y_2 podem ser determinados pela Equação 3.17.

$$\begin{cases} Y_i = 0, & t = 0 \\ Y_{i,t} = Y_{i,t-\Delta t} e^{-B_i\Psi} + A_i[V_t - V_{t-\Delta t}], & t > 0 \end{cases} \quad \text{Equação 3.17}$$

em que o subíndice (t) se refere ao passo de tempo atual, enquanto o subíndice ($t - \Delta t$) se refere ao passo de tempo anterior.

3.5. MÉTODOS PARA SOLUCIONAR AS EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações governantes do regime transitório não possuem solução explícita. Para resolvê-las, é necessário integrá-las numericamente. Nesse contexto, surgem diferentes métodos, dos quais se destacam:

- Método das Características (MOC);
- Método das Diferenças Finitas;
- Método dos Elementos Finitos.

O Método das Características é o mais empregado, dada sua eficiência computacional e facilidade de programação. Ele é um método euleriano e utiliza uma malha característica para definir o sistema a ser simulado. Maiores detalhes sobre o método serão apresentados na seção 3.6.

Todavia, o MOC é majoritariamente utilizado nas formas simplificadas das equações de continuidade e quantidade de movimento linear (Equação 3.11 e Equação 3.12), considerando apenas perdas por atrito em regime permanente. Nesse contexto, novas metodologias têm sido utilizadas para considerar as equações governantes em sua totalidade. Bertaglia *et al.* (2018) comparam a eficiência do MOC com alguns Métodos de Volumes Finitos, os quais não desprezam os termos convectivos (Equação 3.1 e Equação 3.2).

Além disso, tanto o MOC quanto outros modelos numéricos que também utilizam malhas para dividir o domínio contínuo em pequenos subdomínios discretos podem apresentar problemas. De modo geral, essas dificuldades surgem devido à utilização de malhas e são

mais evidentes, segundo Liu e Liu (2010), quando se lida com superfícies livres, contorno deformável e interface móvel.

Nesse contexto, métodos sem malhas tem ganhado cada vez mais destaque em um cenário onde surgem problemas cada vez mais complexos. A ideia central desses métodos é proporcionar soluções numericamente estáveis e precisas para equações diferenciais parciais com quaisquer espécies de condições de contorno. Para tal, utilizam-se conjuntos de nós ou partículas distribuídos de modo aleatório ou uniforme.

Dentre os métodos sem malhas, destaca-se o Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) e o Corrective Smoothed Particle Method (CSPM), os quais são lagrangianos.

3.6. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS (MOC)

Apenas para fins didáticos, as equações governantes do regime transitório em suas formas simplificadas serão reescritas conforme apresentado na Equação 3.18 e Equação 3.19, desconsiderando-se a parcela de perdas por atrito transiente. Ressalta-se que a inclusão dessa parcela na formulação do MOC será apresentada na seção 3.6.1.

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{Equação 3.18}$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{Equação 3.19}$$

Ambas apresentam dois termos dependentes, $V = V(x, t)$ e $H = H(x, t)$, e dois termos independentes, tempo e distância ao longo da tubulação. Para resolvê-las, é necessário, primeiramente, transformá-las em equações diferenciais ordinárias lineares e especificar condições iniciais, $V(x, 0)$ e $H(x, 0)$, e de contorno para variáveis de estado. Usualmente, em sistemas reservatório-tubo-válvula, adota-se carga hidráulica constante no reservatório e velocidade nula na válvula após seu fechamento como condições de contorno.

Em seguida, utilizando o MOC, é possível discretizar os termos diferenciais, o que permite a obtenção de expressões explícitas para o cálculo da carga hidráulica e da vazão.

A fim de transformar a Equação 3.18 e Equação 3.19 em equações diferenciais ordinárias lineares, elas são combinadas linearmente por meio de um multiplicador λ desconhecido, resultando na Equação 3.20.

$$L = \lambda \left(\frac{g}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \left(\frac{\lambda a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{Equação 3.20}$$

De forma sucinta, após algumas manipulações algébricas, obtêm-se um par de equações descritas como característica positiva C^+ , Equação 3.21, e característica negativa C^- , Equação 3.22, dadas por:

$$C^+: \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{se} \quad \frac{dx}{dt} = +a \quad \text{Equação 3.21}$$

$$C^-: \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{se} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad \text{Equação 3.22}$$

Deste modo, se as relações $dx/dt = \pm a$ (condição de estabilidade de Courant) forem obedecidas, a Equação 3.18 e Equação 3.19 são convertidas em equações diferenciais ordinárias, cuja variável independente é o tempo. De forma gráfica, elas podem ser representadas em um plano x-t através de duas retas, denominada linhas características, com declividades $\pm 1/a$. Isso pode ser visualizado na Figura 3.13.

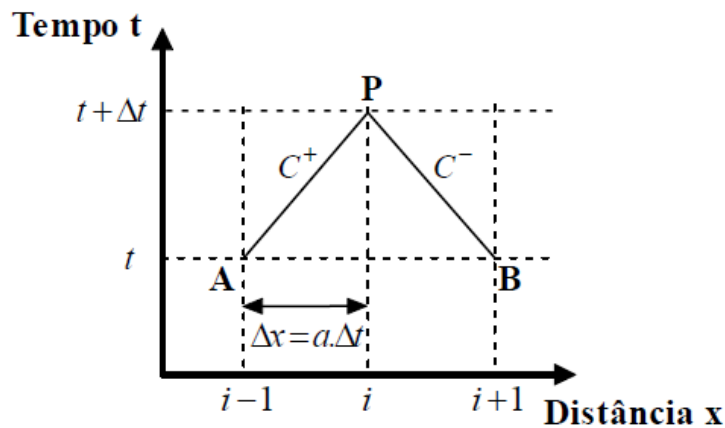


Figura 3.13 - Linhas características representadas num plano x-t (Soares, 2007)

A fim de encontrar os valores de V e H presentes na Equação 3.21 e Equação 3.22, o MOC permite a confecção de uma malha regular, a qual pode ser vista na Figura 3.14.

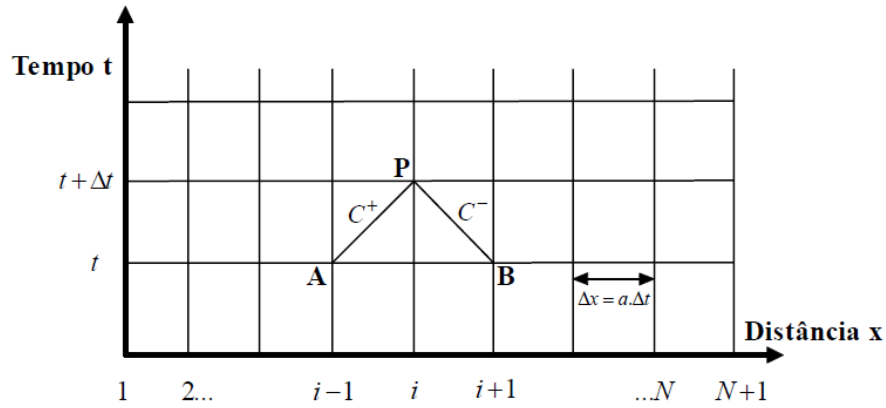


Figura 3.14 - Malha regular fornecida pelo MOC (Soares, 2007)

Na Figura 3.14, o ponto P é a seção do tubo em estudo. Os Pontos A e B representam as seções imediatamente anterior e posterior ao ponto P, respectivamente, no passo de tempo anterior.

Por meio da Figura 3.14 e de manipulações na Equação 3.21 e Equação 3.22, obtêm-se a Equação 3.23 e Equação 3.24, as quais fornecem os valores de carga hidráulica e vazão explicitamente.

$$C^+: H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_P|Q_A| \quad \text{Equação 3.23}$$

$$C^-: H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_P|Q_B| \quad \text{Equação 3.24}$$

em que H_P é a carga hidráulica no ponto P; H_A é a carga hidráulica no ponto A; H_B é a carga hidráulica no ponto B; Q_P é a vazão no ponto P; Q_A é a vazão no ponto A; Q_B é a vazão no ponto B; B é um parâmetro que é função das propriedades do fluido, dado pela Equação 3.25; R é um coeficiente de resistência, dado pela Equação 3.26.

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{Equação 3.25}$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad \text{Equação 3.26}$$

em que Δx é a discretização do espaço. De modo geral, utilizam-se os dados do regime permanente, geralmente já conhecidos, para calcular os valores durante o transitório. Sabendo disso e realizando algumas manipulações algébricas, a Equação 3.23 e Equação 3.24 podem ser reescritas no formato da Equação 3.27 e Equação 3.28.

$$H_{Pi} = \frac{C_A B_B + C_B B_A}{B_A + B_B} \quad \text{Equação 3.27}$$

$$Q_{Pi} = \frac{C_A - C_B}{B_A + B_B} \quad \text{Equação 3.28}$$

Os parâmetros C_A , C_B , B_A e B_B são representados pela Equação 3.29, Equação 3.30, Equação 3.31 e Equação 3.32.

$$C_A = H_{i-1} + BQ_{i-1} \quad \text{Equação 3.29}$$

$$C_B = H_{i+1} - BQ_{i+1} \quad \text{Equação 3.30}$$

$$B_A = B + R|Q_{i-1}| \quad \text{Equação 3.31}$$

$$B_B = B + R|Q_{i+1}| \quad \text{Equação 3.32}$$

A partir das Equações 3.29 - 3.32, pode-se obter os valores de carga hidráulica e vazão de um fluido durante um transitório de modo iterativo. Além disso, vale ressaltar que elas só valem para pontos internos da malha da Figura 3.14, sendo necessário utilizar condições de contorno para calcular os valores referentes a outras seções. Tanto essas condições de contorno como a dedução completa de todas as equações acima podem ser encontradas em Soares (2007) e Chaudhry (2014).

Em relação ao fator de atrito, ele pode ser tomado como constante ou variável. No caso de ser variável, há inúmeras formas de calculá-lo. Uma dessas formas é através de equações de peso, as quais são expostas de maneira detalhada em Vardy *et al.* (1993).

Também é possível levar em conta a viscoelasticidade da tubulação, considerando que ela pode ser discretizada através de um sólido Kelvin-Voigt composto por molas e amortecedores. Essa consideração leva à modificação dos parâmetros obtidos pelo MOC, criando o Método das Características Híbrido (HMOC).

Vale ressaltar que o MOC pode ser utilizado em conjunto com outros métodos. Em um artigo desenvolvido em parceria entre pesquisadores chineses e suecos, Wang *et al.* (2017) realizaram uma compatibilização entre o MOC e o OpenFoam.

Nessa pesquisa, simulou-se um transiente hidráulico em um sistema reservatório-tubo-válvula provocado pelo fechamento rápido da válvula de descarga a jusante e sua posterior reabertura. A razão de abertura da válvula é apresentada na Figura 3.15.

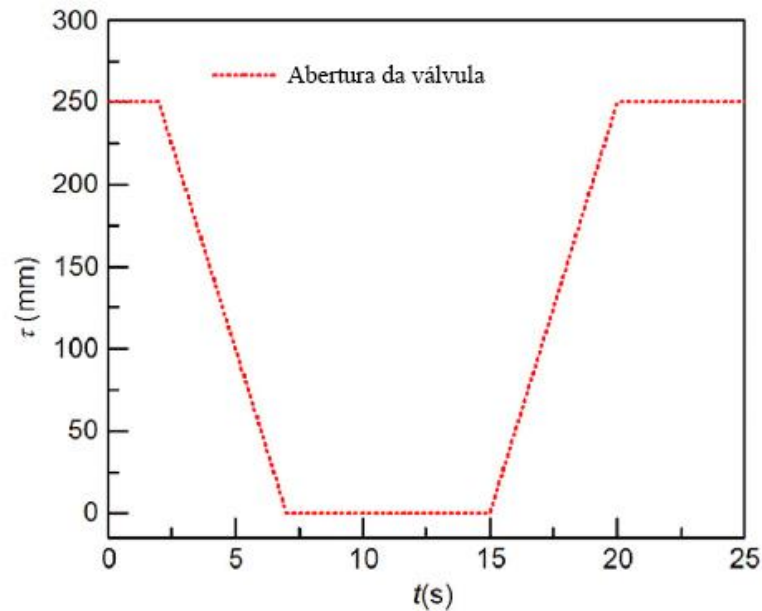


Figura 3.15 - Razão de abertura da válvula de jusante (Wang *et al.*, 2017, modificado)

Algumas regiões do sistema foram modeladas pelo OpenFoam, que é tridimensional, enquanto o restante pelo MOC. Os resultados das simulações numéricas foram comparados com dados experimentais. Na Figura 3.16, é apresentado um comparativo da carga hidráulica obtida para uma seção um metro a montante da válvula de descarga.

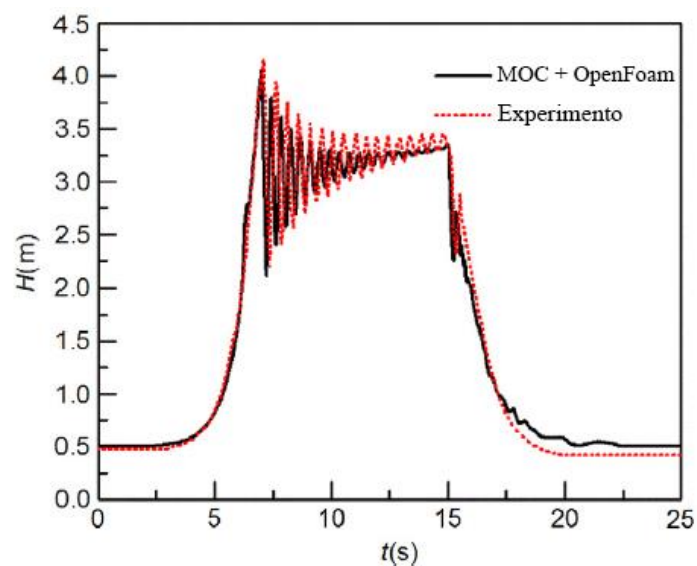


Figura 3.16 - Resultados da compatibilização entre MOC e OpenFoam para uma seção um metro a montante da válvula de descarga (Wang *et al.*, 2017, modificado)

3.6.1. Incorporação do fator de atrito variável na formulação do MOC

Para obter a formulação do MOC incorporando o fator de atrito variável descrito por Vardy *et al.* (1993), substitui-se a Equação 3.16 na Equação 3.12, obtendo-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} + \frac{16vA(Y_1 + Y_2)}{D^2} = 0 \quad \text{Equação 3.33}$$

Em seguida, aplica-se a metodologia descrita na seção 3.6: combina-se linearmente a Equação 3.19 e Equação 3.33 utilizando um multiplicador desconhecido λ , obtendo-se as equações características positiva e negativa; essas são, então, integradas ao longo da malha regular indicada na Figura 3.14, em que se obtêm formulações para o cálculo da pressão e vazão do ponto P no instante de tempo i , conforme disposto nas Equações 3.34 - 3.43.

$$Q_{Pi} = CP - C_a^+ H_{Pi} \quad \text{Equação 3.34}$$

$$Q_{Pi} = CN + C_a^- H_{Pi} \quad \text{Equação 3.35}$$

$$CP = \frac{Q_A + H_A B + CP_1' + CP_1''}{1 + CP_2''} \quad \text{Equação 3.36}$$

$$CN = \frac{Q_B - H_B B + CN_1' + CN_1''}{1 + CN_2''} \quad \text{Equação 3.37}$$

$$C_a^+ = \frac{B}{1 + CP_2''} \quad \text{Equação 3.38}$$

$$C_a^- = \frac{B}{1 + CN_2''} \quad \text{Equação 3.39}$$

$$CP_1' = -\frac{f\Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| \quad \text{Equação 3.40}$$

$$CN_1' = -\frac{f\Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| \quad \text{Equação 3.41}$$

$$CP_1'' = CN_1'' = -A\Delta t \frac{16v}{D^2} \sum_k \left[Y_{k(t)} e^{-B_k \Psi} + \frac{A_k}{A} Q_{P(t)} \right] \quad \text{Equação 3.42}$$

$$CP_2'' = CN_2'' = A\Delta t \frac{16v}{D^2} \sum_k \left[\frac{A_k}{A} \right] \quad \text{Equação 3.43}$$

em que o subíndice k assume os valores 1 e 2, a fim de representar os parâmetros do método de Vardy *et al.* (1993) descritos na seção 3.4; B é calculado pela Equação 3.25. Manipulando-se algebricamente as Equações 3.34 e 3.35, obtém-se uma formulação para o cálculo da carga hidráulica no ponto P:

$$H_{Pi} = \frac{CP - CN}{C_a^+ + C_a^-} \quad \text{Equação 3.44}$$

3.7. SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH)

O Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) foi inicialmente desenvolvido para solucionar problemas astrofísicos em três dimensões, destacando-se os trabalhos de Gingold e Monaghan (1977) e Lucy (1977).

O método trabalha com um conjunto de partículas para representar o sistema (*e.g.* sistema reservatório-tubo-válvula), as quais possuem propriedades materiais e interagem entre si dentro de uma faixa controlada por uma função de peso ou de suavização. Essas partículas servem como base para a discretização das equações governantes e são utilizadas para calcular as propriedades do fluido.

Em suma, Liu e Liu (2010) afirmam que a formulação do SPH é obtida, basicamente, por meio de dois passos:

- O primeiro tem como princípio representar as formas contínuas de uma função e suas derivadas por meio de uma representação integral. Esse passo é usualmente conhecido como aproximação Kernel, em que a aproximação de uma função e suas derivadas se baseia na avaliação de uma função de suavização kernel e suas derivadas;
- O segundo passo é conhecido como aproximação por partícula. Nele, o domínio computacional é primeiramente discretizado por meio de um conjunto de partículas inicialmente distribuídas, as quais representam as configurações iniciais do sistema. Após a discretização, as variáveis de interesse de uma partícula são aproximadas pela soma dos valores das partículas vizinhas mais próximas.

Os autores também destacam algumas vantagens do SPH sobre métodos numéricos tradicionais que utilizam malhas:

- O SPH é um método lagrangiano que permite a obtenção de um histórico temporal das partículas materiais. Logo, é possível calcular a advecção e transporte do sistema;

- Por permitir o posicionamento de partículas em posições específicas no instante anterior ao início da análise, superfícies livres, interfaces materiais e contornos móveis podem ser naturalmente localizados durante a simulação independente da complexidade do movimento das partículas;
- O método possui implementação numérica relativamente mais simples, além de permitir o desenvolvimento de modelos tridimensionais de modo mais natural.

Ressalta-se que a formulação clássica do método apresenta alguns problemas, especialmente na reprodução fiel da dinâmica de sólidos e fluidos representada pelas equações diferenciais parciais. A fim de mitigar os erros numéricos, novas formulações foram propostas, destacando-se a desenvolvida por Chen *et al.* (1999).

3.7.1. Aproximação Kernel de uma função

Conforme mencionado na seção 3.7, a aproximação Kernel tem como objetivo a representação de uma função e suas derivadas por meio de uma função de suavização, a qual também pode ser denominada de função de suavização Kernel, função de peso ou apenas Kernel.

O processo de aproximação se inicia a partir da seguinte identidade:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x')\delta(x - x')dx' \quad \text{Equação 3.45}$$

em que f é uma função do vetor posição x e $\delta(x - x')$ é a função ou distribuição Delta de Dirac, dada por:

$$\delta(x - x') = \begin{cases} \infty, & x = x' \\ 0, & x \neq x' \end{cases} \quad \text{Equação 3.46}$$

Na Equação 3.45, Ω é o volume de integração que contém x . Essa equação também implica que a função pode ser representada em uma forma integral. Quanto à função Delta de Dirac, sua representação integral, dada na Equação 3.46, é exata desde que f seja contínua e definida em Ω .

Para modelos numéricos discretos, não é possível utilizar a função Delta de Dirac na forma da Equação 3.46, dado que ela possui valor não nulo em apenas um ponto. Nesse caso, ela

pode ser substituída por uma função de suavização $W(x - x', h)$ com dimensão espacial finita h . Logo, a aproximação Kernel de $f(x)$, $\langle f(x) \rangle$, assume a seguinte forma:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad \text{Equação 3.47}$$

em que h é o comprimento de suavização, o qual define a área de influência da função W . Geralmente, define-se W como uma função par. Essa definição é conhecida como propriedade de simetria e implica que partículas equidistantes possuem o mesmo efeito sobre uma partícula qualquer. Além disso, a função de suavização deve seguir algumas condições.

A primeira é conhecida como condição unitária ou de normalização, dada pela Equação 3.48.

$$\int_{\Omega} W(x - x', h) dx' = 1 \quad \text{Equação 3.48}$$

Essa propriedade garante que a integral da função sobre um domínio suporte seja igual a um valor unitário. A segunda condição é denominada propriedade da função Delta de Dirac e é observada quando o comprimento de suavização tende a zero. Essa condição é representada pela Equação 3.49.

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x - x', h) = \delta(x - x') \quad \text{Equação 3.49}$$

A terceira é conhecida como condição compacta, dada pela Equação 3.50.

$$W(x - x', h) = 0 \quad \text{quando } |x - x'| > \kappa h \quad \text{Equação 3.50}$$

Em que κ é uma constante relacionada ao comprimento de suavização para uma partícula em x e κh define a área ou região efetiva (não nula) da função de suavização. Essa região é comumente denominada de domínio suporte ou compacto da função Kernel para um ponto em x .

Hou *et al.* (2012) concluem que o comprimento de suavização deve ser próximo de $1,0\Delta x$, em que Δx é o espaçamento entre as partículas. Quanto menor o valor de h , mais severas as oscilações numéricas e maiores as chances de erros de dispersão. Por outro lado, valores

maiores de h geram aumento do efeito de dissipação e consequente dissipação numérica. A Figura 3.17 demonstra o efeito de diferentes comprimentos de suavização nos valores de pressão obtidos em uma simulação.

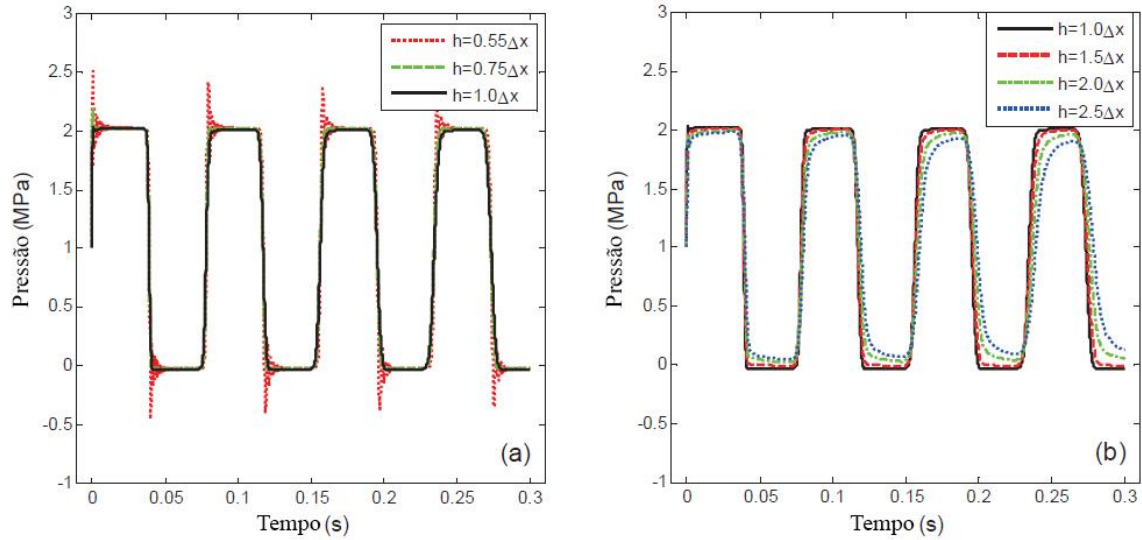


Figura 3.17 – Influência do comprimento de suavização (Hou *et al.*, 2012, modificado)

A condição compacta implica que a integração sobre o domínio total do problema se restrinja a uma integração localizada sobre o domínio compacto da função Kernel. Essa implicação é ilustrada na Figura 3.18.

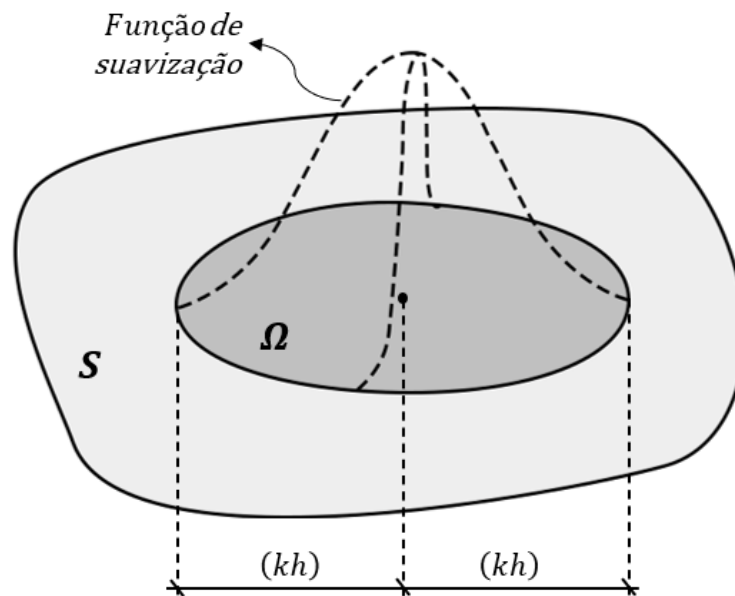


Figura 3.18 - Aplicação da função kernel sobre um domínio S (Fernandes Júnior, 2021)

Quanto à acurácia do método, a aproximação Kernel apresenta precisão h^2 ou erros de segunda ordem (Fulk, 1994). Essa afirmação pode ser constatada ao se utilizar uma expansão em série de Taylor na Equação 3.47. Esse processo é exposto na Equação 3.51.

$$\begin{aligned} \langle f(x) \rangle &= \int_{\Omega} \left[f(x) + f'(x)(x' - x) + \frac{f''(x)}{2}((x' - x)^2) \right] \\ &\quad \times W(x - x', h) dx' \\ &= f(x) \int_{\Omega} W(x - x', h) dx' + f'(x) \int_{\Omega} (x' - x) \\ &\quad \times W(x - x', h) dx' + r(h^2) \end{aligned} \quad \text{Equação 3.51}$$

em que r representa o resíduo da aproximação. Dado que W é uma função par e que $(x' - x)W(x - x', h)$ é ímpar, tem-se:

$$\int_{\Omega} (x' - x)W(x - x', h) dx' = 1 \quad \text{Equação 3.52}$$

Utilizando-se a Equação 3.48 e Equação 3.52, obtém-se a Equação 3.53, a qual evidencia o erro de segunda ordem da aproximação Kernel.

$$\langle f(x) \rangle = f(x) + r(h^2) \quad \text{Equação 3.53}$$

3.7.2. Aproximação Kernel para a primeira derivada de uma função

A fim de obter derivadas de ordens superiores para uma função $f(x)$, pode-se utilizar o mesmo procedimento adotado para gerar a representação dessa mesma função (Liu e Liu, 2003). Desse modo, substituindo-se $f(x)$ pelo seu divergente ($\nabla \cdot f(x)$) na Equação 3.47, obtém-se:

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = \int_{\Omega} [\nabla \cdot f(x')] W(x - x', h) dx' \quad \text{Equação 3.54}$$

Por meio da propriedade da divergência do produto de duas funções, o termo $[\nabla \cdot f(x')] W(x - x', h)$ pode ser reescrito da seguinte forma:

$$[\nabla \cdot f(x')]W(x - x', h) = \nabla \cdot [f(x')W(x - x', h)] - f(x') \cdot \nabla [W(x - x', h)] \quad \text{Equação 3.55}$$

Substituindo-se a Equação 3.55 na Equação 3.54, obtém-se:

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = \int_{\Omega} \nabla \cdot [f(x')W(x - x', h)] dx' - \int_{\Omega} f(x') \cdot \nabla [W(x - x', h)] dx' \quad \text{Equação 3.56}$$

A primeira integral à direita da igualdade da Equação 3.56 pode ser convertida em uma integral sobre uma superfície S do domínio Ω por meio do teorema da divergência, obtendo-se:

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = \int_S f(x')W(x - x', h) \cdot \vec{n} dS - \int_{\Omega} f(x') \cdot \nabla [W(x - x', h)] dx' \quad \text{Equação 3.57}$$

em que \vec{n} é um vetor unitário normal à superfície S. Dada a condição compacta (Equação 3.50), o valor de W na superfície da integral na Equação 3.57 é igual a zero. Consequentemente, o valor da integral também é zero. Logo, a aproximação Kernel para a derivada de uma função é dada por:

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \int_{\Omega} f(x') \cdot \nabla [W(x - x', h)] dx' \quad \text{Equação 3.58}$$

3.7.3. Aproximação por partículas

Conforme mencionado na seção 3.7, o segundo passo do SPH envolve a representação do domínio de um problema por meio de um conjunto de partículas, nas quais serão estimadas as variáveis de interesse. A fim de exemplificar esse passo, a Figura 3.19 contém um domínio bidimensional Ω com superfície S preenchido por um conjunto de partículas.

Na Figura 3.19, W é a função Kernel. Ela é utilizada para estimar as variáveis de interesse na partícula i por meio de uma somatória dos valores nas partículas j contidas no domínio

compacto dentro de um raio κh_i . A distância entre a partícula i e uma partícula j qualquer é representada por r_{ij} .

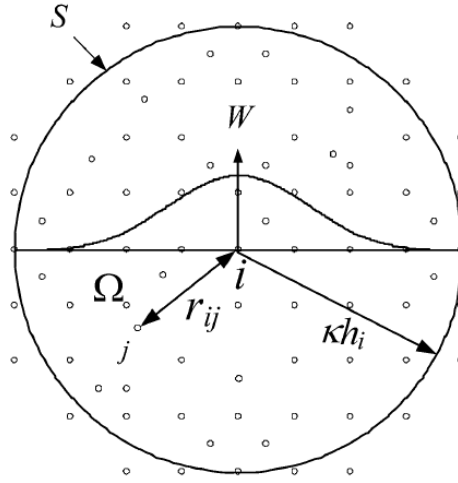


Figura 3.19 - Domínio bidimensional Ω com superfície S preenchido por um conjunto de partículas (Liu e Liu, 2010)

As partículas podem ser inicialmente geradas por meio de um gerador de malhas ou por algum modelo de discretização espacial. Cada uma possui um volume fixo ΔV_i , o qual também pode ser representado pela razão (massa/massa específica) = (m_i/ρ_i) . Ressalta-se que o movimento das partículas pode ou não ser restringido durante a simulação.

Após representar um domínio por meio de um conjunto finito de partículas, as formas contínuas da aproximação Kernel para uma função (Equação 3.47) e seu divergente (Equação 3.58) podem ser reescritas, de modo discretizada, segundo a Equação 3.59 e Equação 3.60.

$$\langle f(x) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x - x_j, h) \quad \text{Equação 3.59}$$

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla W(x - x_j, h) \quad \text{Equação 3.60}$$

Em que N é o número de partículas contidas na área de influência da partícula em x . Essa região é definida pelo produto entre o comprimento de suavização h e o parâmetro κ , dada por κh .

3.7.4. Funções de suavização

A escolha de uma função de suavização adequada é essencial para garantir a estabilidade numérica e precisão do SPH. Segundo Liu e Liu (2010), além das condições descritas na seção 3.7.1, a função Kernel deve cumprir os seguintes requisitos:

- $W(x - x') \geq 0$ para qualquer ponto em x' dentro do domínio compacto de uma partícula em x . Essa condição, também denominada de positividade, garante a representação estável de alguns fenômenos físicos;
- O valor da função de suavização para uma partícula deve decrescer monotonicamente à medida em que a distância até ela aumenta. Isso garante que partículas mais próximas exerçam maior influência sobre a partícula em análise;
- A função Kernel deve ser suficientemente suave, de modo a garantir melhor precisão ao método.

No artigo original do método, Lucy (1977) propõe uma função em formato de sino, a qual é descrita a seguir.

$$W(x - x', h) = W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (1 + 3R)(1 - R)^3, & R \leq 1 \\ 0, & R > 1 \end{cases} \quad \text{Equação 3.61}$$

em que α_d é $5/4h$, $5/\pi h^2$ e $105/16\pi h^3$ para espaços uni, bi e tridimensionais respectivamente. R representa a distância relativa entre partículas e pode ser calculado por:

$$R = \frac{|x - x'|}{h} \quad \text{Equação 3.62}$$

A Figura 3.20 contém uma representação da função proposta por Lucy (1977) e sua derivada.

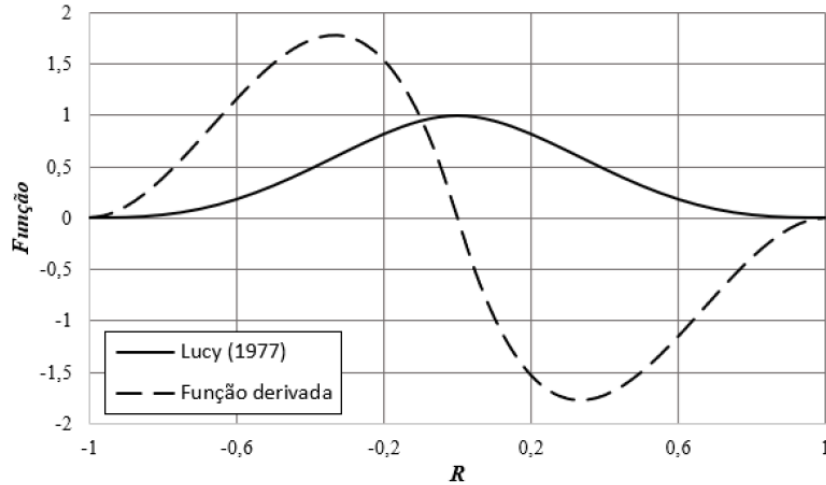


Figura 3.20 - Função Kernel proposta por Lucy (1977) e sua derivada (Fernandes Júnior, 2021)

Embora tenham sido propostas outras funções, a função de suavização mais utilizada é a B-spline cúbica, originalmente apresentada por Monaghan e Lattanzio (1985). Sua formulação é descrita a seguir.

$$W(x - x', h) = W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3, & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3, & 1 \leq R < 2 \\ 0, & R \geq 2 \end{cases} \quad \text{Equação 3.63}$$

em que α_d é $1/h$, $15/7\pi h^2$ e $3/2\pi h^3$ para espaços uni, bi e tridimensionais respectivamente. As vantagens dessa função é que ela se assemelha a uma gaussiana e possui domínio compacto delimitado. Todavia, sua segunda derivada é uma função linear, o que pode acarretar problemas de estabilidade.

A Figura 3.21 contém uma representação da função proposta por Monaghan e Lattanzio (1985) e sua derivada.

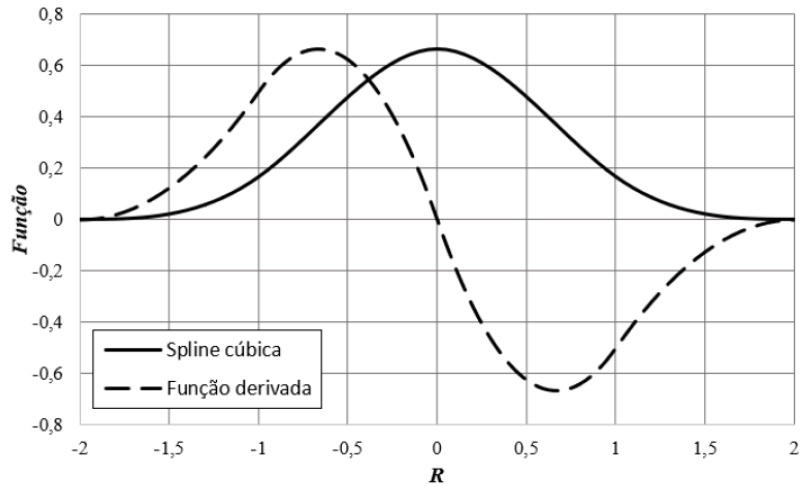


Figura 3.21 - Função Kernel proposta por Monaghan e Lattanzio (1985) e sua derivada (Fernandes Júnior, 2021)

Hou *et al.* (2012) também propuseram uma função de suavização alternativa, denominada Gaussiana modificada:

$$W(x - x', h) = W(R, h) = \frac{1,04823}{h\sqrt{\pi}} \begin{cases} e^{-R^2} - e^{-4}, & 0 \leq R \leq 2 \\ 0, & R > 2 \end{cases} \quad \text{Equação 3.64}$$

A Figura 3.22 contém uma representação da função proposta por Hou *et al.* (2012).

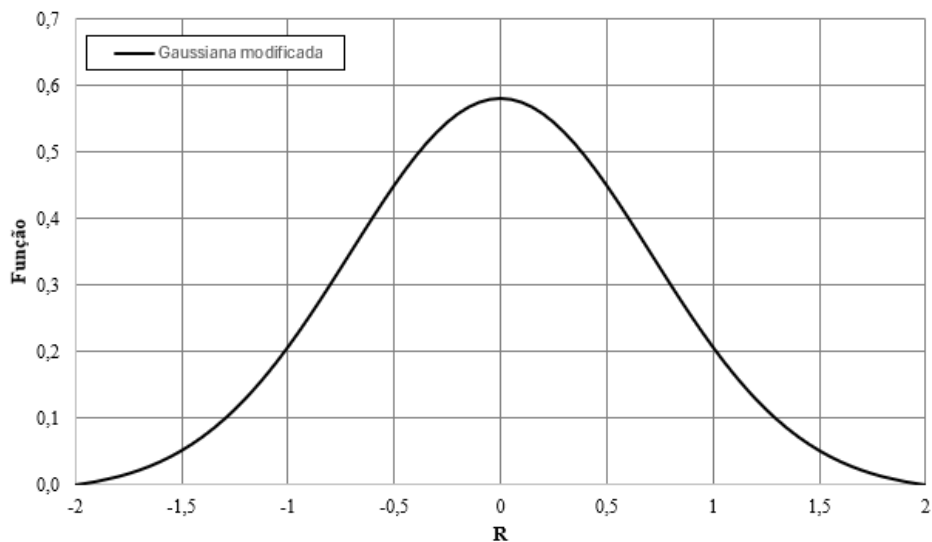


Figura 3.22 - Função kernel proposta por Hou *et al.* (2012)

3.8. CORRECTIVE SMOOTHED PARTICLE METHOD (CSPM)

O processo de aproximação por partículas, descrito nas seções 3.7.1 e 3.7.3, pode apresentar erros numéricos excessivos. Uma situação em que esses erros podem ser observados é na

aplicação do método em partículas localizadas na fronteira ou contorno do domínio de um problema, conforme ilustrado na Figura 3.23 e Figura 3.24.

Uma vez que o SHP aproxima uma função e sua derivada com base na função kernel, a qual é calculada a partir de partículas próximas a um ponto, o método não mais possui resíduo igual a h^2 . Para fundamentar essa afirmação, sejam as representações esquemáticas ilustradas na Figura 3.25.

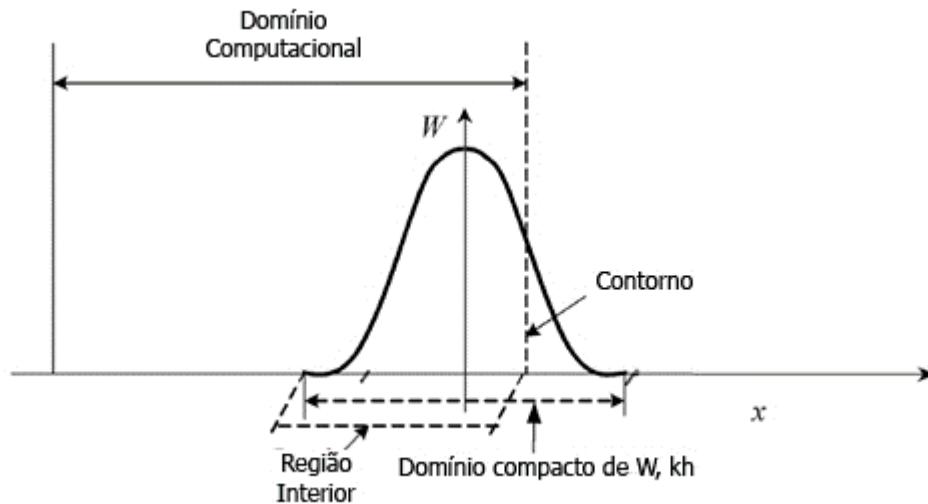


Figura 3.23 - Representação em que o domínio compacto intercepta o domínio do problema (Liu e Liu, 2010, modificado)

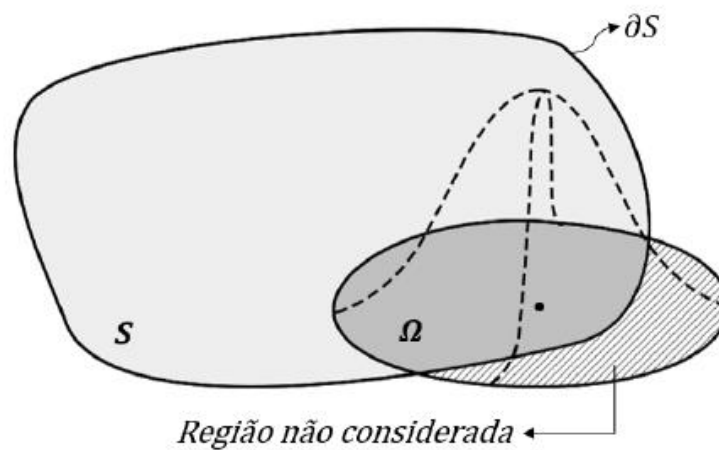


Figura 3.24 - Limitação de fronteira do domínio compacto (Fernandes Júnior, 2021)

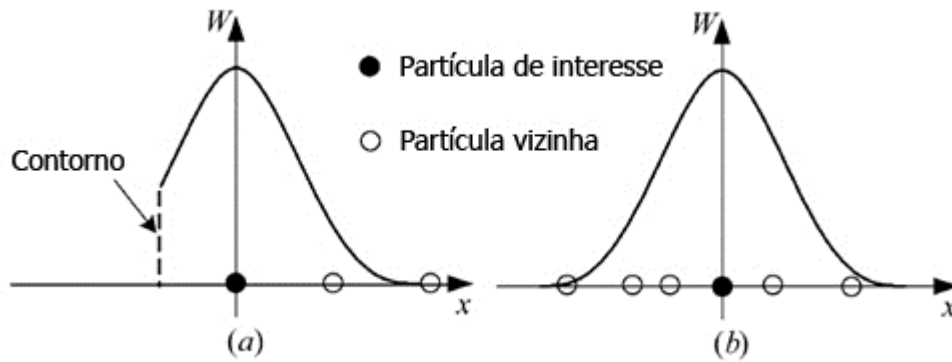


Figura 3.25 - Representações esquemáticas de aproximações por partículas em espaços unidimensionais (Liu e Liu, 2010)

Na seção (a) da Figura 3.25, o domínio da função de aproximação foi truncado por um contorno. Como consequência, apenas uma partícula exerce influência sobre a partícula em análise. Já na seção (b), embora as partículas não estejam distribuídas de maneira simétrica, há quatro delas na área de influência da partícula em análise. Logo, percebe-se que próximo ao contorno, os resultados obtidos pelo método apresentam maiores erros numéricos.

A fim de sanar essa limitação, diferentes abordagens foram propostas. Liu *et al.* (2002) sugere que se insiram partículas virtuais na porção exterior do contorno do domínio (Figura 3.26). As partículas tipo I têm a função de impedir que as partículas do interior do domínio atravessem o contorno. Já as de tipo II servem apenas para preencher o domínio compacto.

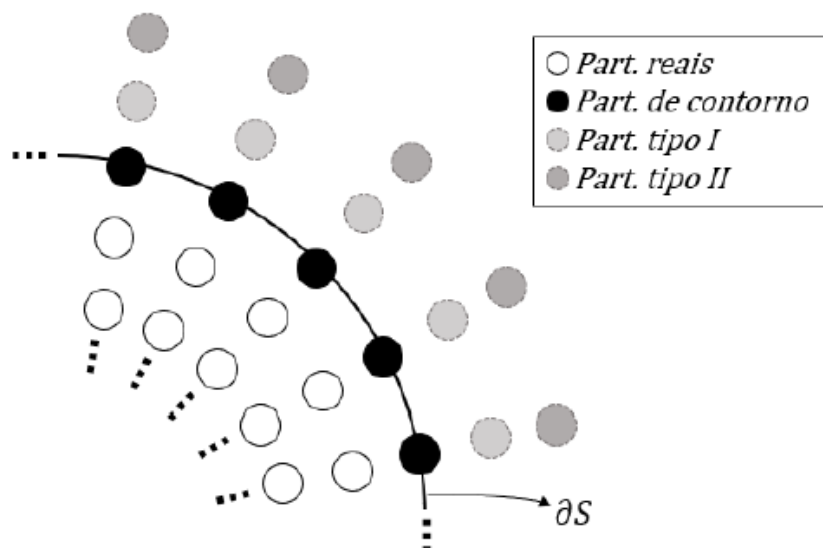


Figura 3.26 - Inserção de partículas virtuais no contorno de um domínio S (Fernandes Júnior, 2021)

Chen *et al.* (1999) propôs uma correção ao SPH com base em expansão em série de Taylor da função Kernel. Essa correção é denominada Corrective Smoothed Particle Method (CSPM). Primeiramente, ao se aplicar uma expansão em série de Taylor em um ponto x_i , uma função $f(x)$ suficientemente suave pode ser expressa por:

$$f(x) = f_i + (x - x_i)f'(x) + \frac{(x - x_i)^2}{2!}f''(x) + \dots \quad \text{Equação 3.65}$$

Ao multiplicar ambos os lados da Equação 3.65 pela função W e integrar sobre o todo o domínio, obtém-se:

$$\begin{aligned} \int f(x)W_i(x)dx &= f_i \int W_i(x)dx + f'(x) \int (x - x_i)W_i(x)dx \\ &+ \frac{f''(x)}{2} \int (x - x_i)^2W_i(x)dx + \dots \end{aligned} \quad \text{Equação 3.66}$$

em que $W_i(x) = W(x - x_i, h)$. Desprezando-se os termos que envolvem derivadas, a aproximação Kernel de uma função $f(x)$ em um ponto i pode ser expressa por:

$$f_i = \frac{\int f(x)W_i(x)dx}{\int W_i(x)dx} \quad \text{Equação 3.67}$$

A Equação 3.67 apresenta erros de segunda ordem para o interior do domínio e erros de primeira ordem para o contorno. Considerando-se aproximação por meio de partículas, essa equação pode ser reescrita na seguinte forma:

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^N f_j W_{ij} m_j / \rho_j}{\sum_{j=1}^N W_{ij} m_j / \rho_j} \quad \text{Equação 3.68}$$

em que $f_j = f(x_j)$, $W_{ij} = W(x_j - x_i, h)$, e m_j e ρ_j representam a massa e massa específica da partícula j respectivamente.

Para a aproximação da primeira derivada, basta substituir $W_i(x)$ por $(\partial W_i(x)/\partial x)$ na Equação 3.66 e desprezar os termos que contêm derivadas de ordem maior ou igual a 2. Obtém-se, então:

$$\frac{df_i}{dx} = \frac{\int [f(x) - f(x_i)](\partial W_i(x)/\partial x)dx}{\int (x - x_i)(\partial W_i(x)/\partial x)dx} \quad \text{Equação 3.69}$$

Na formulação por partículas, a Equação 3.69 é reescrita da seguinte forma:

$$\frac{df_i}{dx} = \frac{\sum_{j=1}^N (f_j - f_i) (\partial W_{ij} / \partial x_j) m_j / \rho_j}{\sum_{j=1}^N (x_j - x_i) (\partial W_{ij} / \partial x_j) m_j / \rho_j} \quad \text{Equação 3.70}$$

3.9. APLICAÇÃO DO CSPM A UM TRANSITÓRIO HIDRÁULICO

Para aplicar o CSPM a um transitório hidráulico, é necessário, primeiramente, modificar a equação de conservação da quantidade de movimento linear (Equação 3.6):

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{fV|V|}{2D} + \frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x} \quad \text{Equação 3.71}$$

Observa-se que a expressão $\frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x}$ foi acrescentado à equação de conservação da quantidade de movimento. Ela é um termo dissipativo explícito denominado de viscosidade artificial, o qual é necessário para lidar com as oscilações advindas do método (Monaghan e Gingold, 1983; Liu e Liu, 2003). A formulação desse termo será explicitada na seção 3.9.2.

O CSPM fornece um meio para transformar equações diferenciais parciais (EDPs) em equações diferenciais ordinárias (EDOs) no tempo. Em outros termos, ele permite que se solucione a evolução espacial do problema. Logo, a fim de avaliar a evolução temporal das pressões e velocidades descritas pela Equação 3.6 e Equação 3.71, é necessário utilizar uma metodologia de integração temporal. Esse metodologia será explicitada na seção 3.9.1.

3.9.1. Método de Integração Temporal

O método de integração temporal comumente utilizado em simulações com CSPM é o de Euler, cujo erro é de primeira ordem. Sua formulação, dada pelas equações descritas a seguir, segue o exposto em Hou *et al.* (2012) e é avaliada de t^n (passo de tempo atual) a t^{n+1} (passo de tempo posterior).

$$P_i^{n+1} = P_i^n + \Delta t \left(\frac{DP}{Dt} \right)_i^n \quad \text{Equação 3.72}$$

$$V_i^{n+1} = V_i^n + \Delta t \left(\frac{DV}{Dt} \right)_i^n \quad \text{Equação 3.73}$$

As derivadas totais são obtidas da Equação 3.6 e Equação 3.71, resultando em:

$$\left(\frac{Dp}{Dt}\right)_i^n = -\rho a^2 \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_i^n \quad \text{Equação 3.74}$$

$$\left(\frac{DV}{Dt}\right)_i^n = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i^n - \frac{fV_i^n |V_i^n|}{2D} + \left(\frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x}\right)_i^n \quad \text{Equação 3.75}$$

As derivadas espaciais $\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_i^n$ e $\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i^n$ são obtidas pela aproximação fornecida pelo CSPM para uma derivada de primeira ordem (Equação 3.70), conforme a Equação 3.76 e Equação 3.77.

$$\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_i^n = \frac{\sum_{j=1}^N (V_j - V_i) (\partial W_{ij} / \partial x_j) m_j / \rho_j}{\sum_{j=1}^N (x_j - x_i) (\partial W_{ij} / \partial x_j) m_j / \rho_j} \quad \text{Equação 3.76}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i^n = \frac{\sum_{j=1}^N (p_j - p_i) (\partial W_{ij} / \partial x_j) m_j / \rho_j}{\sum_{j=1}^N (x_j - x_i) (\partial W_{ij} / \partial x_j) m_j / \rho_j} \quad \text{Equação 3.77}$$

3.9.2. Viscosidade Artificial

A formulação para a viscosidade artificial segue o exposto em Hou *et al.* (2012), a qual é descrita pelas Equações 3.78 - 3.80.

$$\left(\frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x}\right)_i = \sum_{j \in \mathcal{S}_i} m_j \Pi_{ij} (\partial W_{ij} / \partial x_j) \quad \text{Equação 3.78}$$

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha a u_{ij} + \beta u_{ij}^2}{\rho}, & (V_i - V_j)(x_i - x_j) < 0 \\ 0, & (V_i - V_j)(x_i - x_j) \geq 0 \end{cases} \quad \text{Equação 3.79}$$

$$u_{ij} = \frac{\bar{h}_{ij}(V_i - V_j)(x_i - x_j)}{|x_i - x_j|^2 + \eta \bar{h}_{ij}^2} \quad \text{Equação 3.80}$$

em que α , β e η são constantes cujos valores recomendados por Hou *et al.* (2012) são, respectivamente, $\alpha = 1$, $\beta = 2$ e $\eta = 0.01$. $\bar{h}_{ij} = (h_i + h_j)/2$ é o comprimento de suavização médio associado às partículas i e j . A função do termo $\eta \bar{h}_{ij}^2$ é prevenir singularidades quando $i = j$.

3.9.3. Incorporação do fator de atrito variável

Na seção 3.9.1, a derivada total da velocidade (Equação 3.75) incorpora apenas a perda de carga em regime permanente por meio do termo $\frac{fV_i^n|V_i^n|}{2D}$. A fim de acrescentar a parcela de perda de carga em regime transitório, acrescenta-se o termo $\frac{\tau_u \pi D}{\rho A}$ na Equação 3.71:

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{fV|V|}{2D} + \frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x} - \frac{\tau_u \pi D}{\rho A} \quad \text{Equação 3.81}$$

Substituindo-se a tensão de atrito transiente (Equação 3.16) na Equação 3.81, obtém-se:

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{fV|V|}{2D} - \frac{16v(Y_1 + Y_2)}{D^2} + \frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x} \quad \text{Equação 3.82}$$

Observa-se que, ao omitir o termo de fator de atrito variável $\frac{16v(Y_1+Y_2)}{D^2}$ na Equação 3.82, obtém-se a Equação 3.71. Aplicando o mesmo procedimento descrito na seção 3.9.1 à Equação 3.82, obtém-se a formulação para a derivada total da velocidade incorporando a parcela de fator de atrito variável:

$$\left(\frac{DV}{Dt}\right)_i^n = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i^n - \frac{fV_i^n|V_i^n|}{2D} - \frac{16v(Y_{1,i} + Y_{2,i})}{D^2} + \left(\frac{\partial(\rho\Pi)}{\partial x}\right)_i^n \quad \text{Equação 3.83}$$

3.9.4. Pré-suavização

Ao simular transitórios hidráulicos utilizando o SPH ou CSPM, é comum que haja picos de pressão nas primeiras frentes de onda. Para mitigá-los, aplicam-se técnicas de pré-suavização na distribuição de velocidades durante os passos de tempo iniciais da simulação.

Hou *et al.* (2012) analisaram a influência da pré-suavização em um sistema reservatório-tubo-válvula sujeito a um transiente ocasionado pelo fechamento rápido da válvula de jusante. Os resultados são apresentados na Figura 3.27 para as seções de montante (imediatamente posterior ao reservatório) e jusante (imediatamente anterior à válvula) da tubulação.

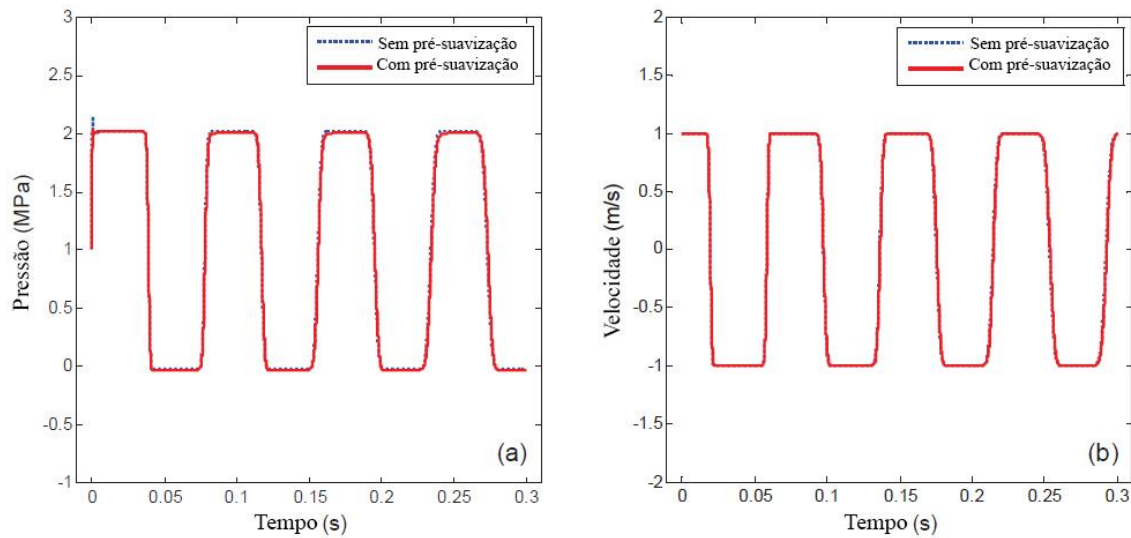


Figura 3.27 - Influência da pré-suavização nos dados de pressão (seção de jusante) e velocidade (seção de montante) obtidos pelo CSPM (Hou *et al.*, 2012, modificado)

Observa-se que, na Figura 3.27a, o pico de pressão na primeira frente de onda foi reduzido substancialmente ao se adotar a técnica de pré-suavização. Já para a velocidade na seção de montante, o efeito da pré-suavização é mínimo e não pode ser visualizado na Figura 3.27b.

Colagrossi (2004) formulou um algoritmo de pré-suavização baseado no método XSPH, o qual estabelece uma correção no perfil de velocidades das partículas. O autor propõe que a velocidade de uma partícula i seja avaliada por meio das velocidades das partículas que se encontram dentro de seu domínio compacto:

$$\frac{dx_i}{dt} \cong V_i + \Delta V = \langle V_i \rangle \quad \text{Equação 3.84}$$

$$\Delta V_i = \frac{\epsilon x}{2} \sum_j \frac{m_j}{\bar{\rho}_{ij}} (V_j - V_i) W_{ij} \quad \bar{\rho}_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \quad \text{Equação 3.85}$$

em que ϵx é um escalar cujo valor típico é 0,5.

4. METODOLOGIA

Conforme descrito na seção 2, o objetivo central desse trabalho é desenvolver um método numérico baseado em partículas (CSPM), sem malhas, com algoritmo de pré-suavização incorporando perdas por atrito transiente para a análise de transientes hidráulicos e compará-lo com um método com malhas (MOC) e dados experimentais. O modelo de fator de atrito variável adotado foi o descrito por Vardy *et al.* (1993), o qual é explicitado na seção 3.4. Além disso, o algoritmo de pré-suavização foi desenvolvido com base no método XSPH (Colagrossi, 2004), sendo utilizado nos sete primeiros passos de tempo das simulações.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas foram comparados com dados experimentais coletados para o sistema reservatório-tubo-válvula. Para tal, utilizaram-se duas métricas distintas: erros médios quadráticos (RMSE) e Nash-Sutcliffe model (NSE).

Em seguida, a influência dos parâmetros do CSPM nos resultados obtidos nas simulações foi rigorosamente avaliada, incluindo o impacto das perdas por atrito transiente. Ademais, investigou-se a influência do algoritmo de pré-suavização, especialmente nas ondas de pressão.

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma que resume as etapas necessárias para o desenvolvimento da rotina computacional para implementação do CSPM. Já na Figura 4.2, há uma representação do fluxo de trabalho utilizado para a comparação entre os resultados numéricos e os dados experimentais.

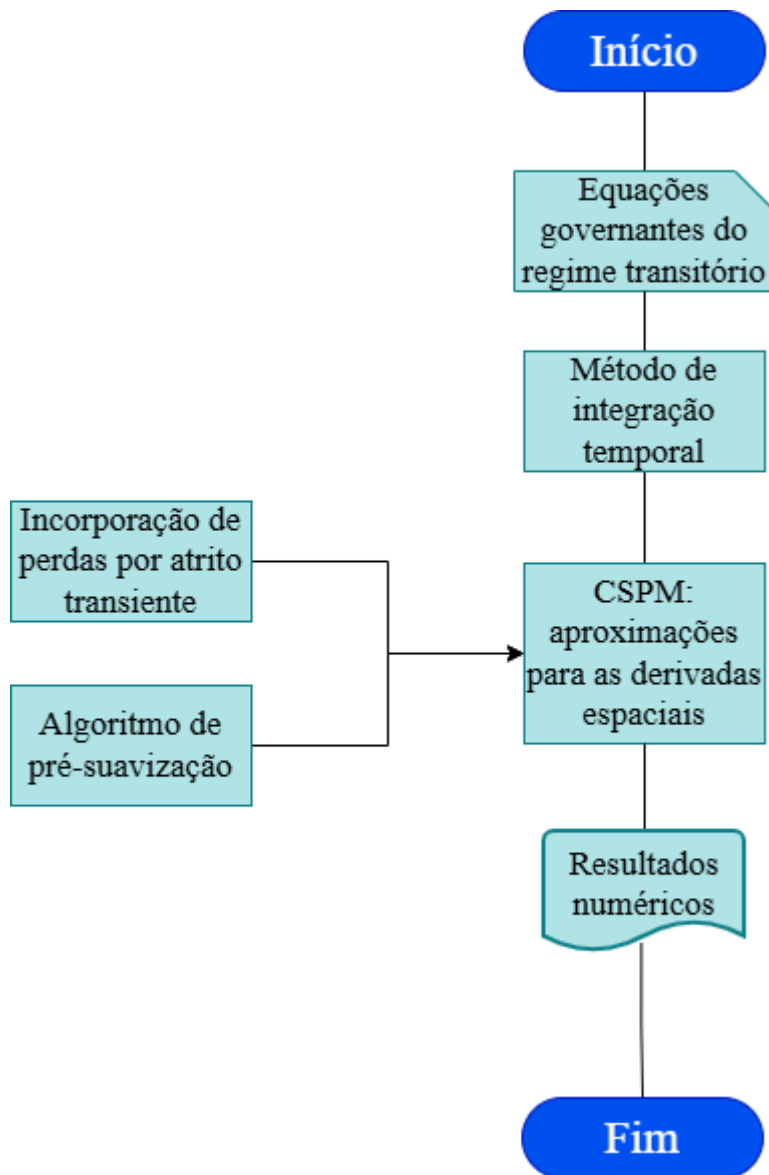


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia adotada para implementação do CPM

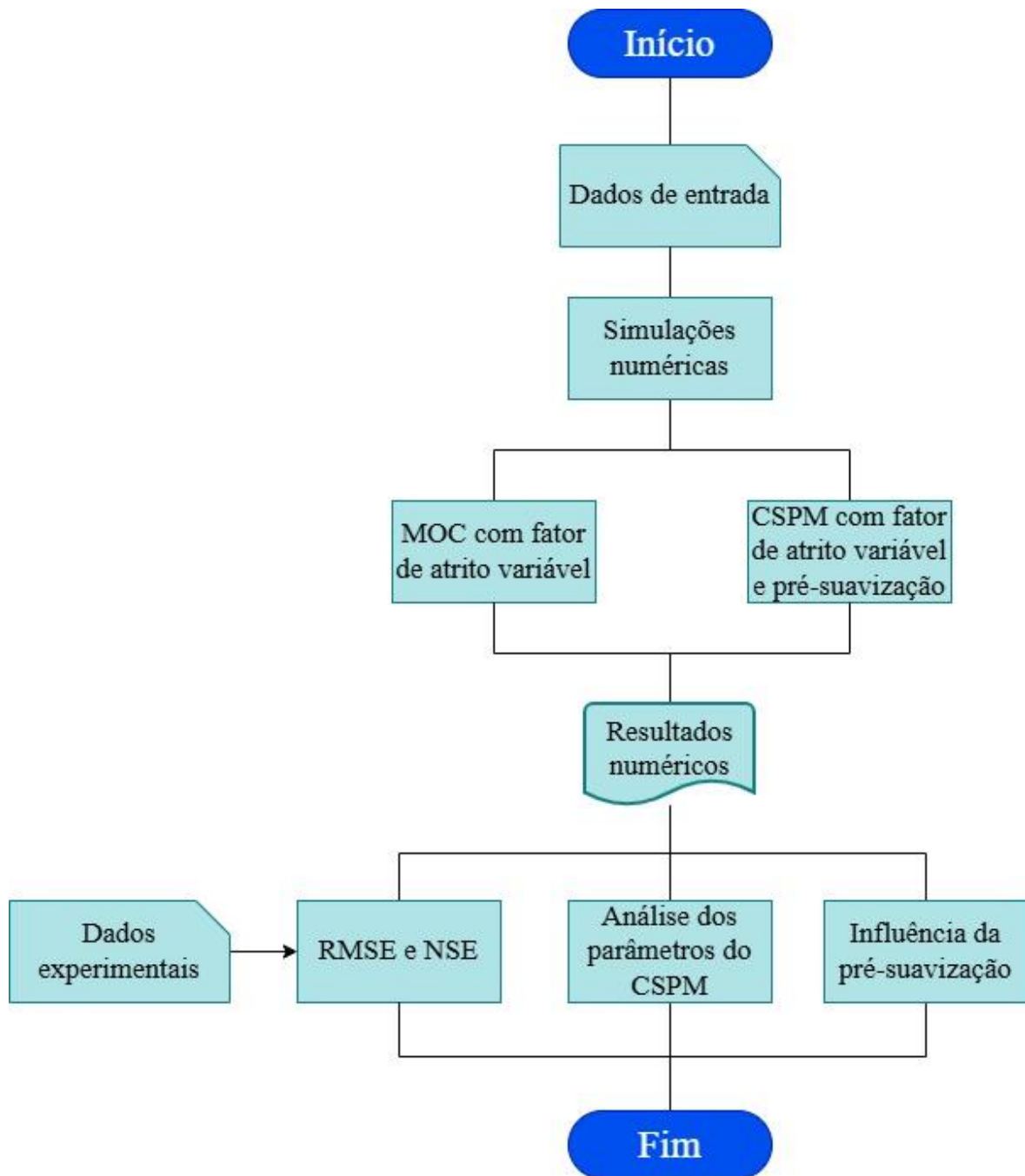


Figura 4.2 - Fluxograma do fluxo de trabalho adotado nas comparações entre os resultados numéricos e dados experimentais

Nas próximas seções, são apresentadas: premissas utilizadas nas simulações com CSPM, tais como distribuição das partículas no sistema e determinação da suas respectivas vizinhanças; concepção do algoritmo de pré-suavização; formulações das métricas de comparação utilizadas para avaliar os resultados numéricos (RMSE e NSE).

4.1. DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS NO SISTEMA

Para esse trabalho, as partículas foram distribuídas ao longo da tubulação de modo uniforme, conforme representado na Figura 4.3. O objetivo dessa distribuição é que se mitiguem os erros numéricos (Hou et al., 2012).

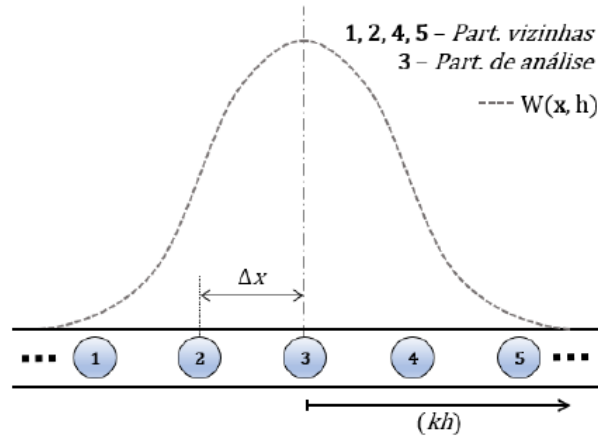


Figura 4.3 - Distribuição das partículas ao longo da tubulação (Fernandes Júnior, 2021)

A distância entre as partículas foi determinada por meio da Equação 4.1.

$$\Delta_x = \frac{L}{N - 1} \quad \text{Equação 4.1}$$

em que Δ_x é o espaçamento entre as partículas, L o comprimento da tubulação e N o número de partículas. Ressalta-se que o valor de N foi determinado por meio de uma análise de sensibilidade, a fim de verificar a partir de quantas partículas os resultados numéricos se aproximaram mais dos dados experimentais. Além disso, o movimento das partículas durante as simulações foi restringido.

4.2. DETERMINAÇÃO DA VIZINHANÇA DE UMA PARTÍCULA

A formulação do SPH e CSPM, conforme discutido nas seções 3.6.1 e 3.8, é definida a partir das propriedades de partículas vizinhas à partícula em análise, na qual se utiliza uma função Kernel. Nesse contexto, é essencial definir quais partículas fazem parte do domínio compacto dessa função.

Essa definição foi feita por meio da metodologia proposta por Fernandes Júnior (2021), em que a vizinhança de cada partícula é definida em uma matriz que permanecerá constante durante a simulação. Para exemplificar essa matriz, tem-se a Figura 4.4.

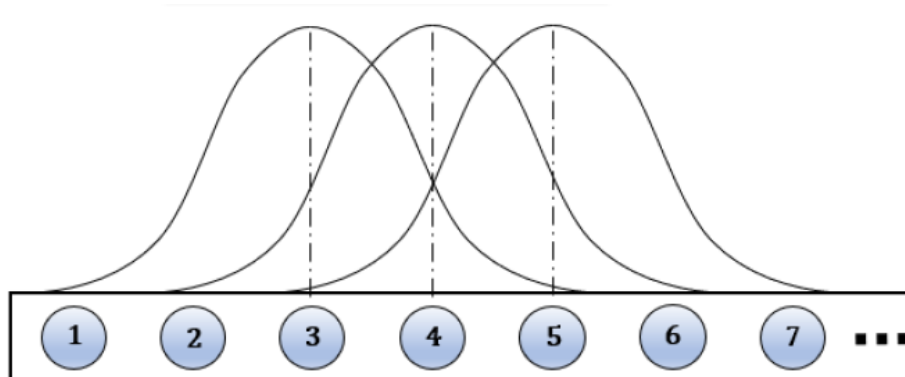


Figura 4.4 – Distribuição das partículas no interior da tubulação e suas respectivas funções Kernel (Fernandes Júnior, 2021)

Na Figura 4.4, as partículas estão distribuídas linearmente. A função Kernel em cada uma delas possui um raio igual a κh , o qual abrange quatro partículas, duas à direita e duas à esquerda da partícula em análise. Um exemplo da configuração dessa matriz é disposto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Exemplo de matriz de vizinhança

Partícula	Nº de vizinhos	1º Vizinho	2º Vizinho	3º Vizinho	4º Vizinho
1	2	2	3	-	-
2	3	1	3	4	-
3	4	1	2	4	5
4	4				
...
N-1	3	N-3	N-2	N	-
N	2	N-2	N-1	-	-

4.3. ALGORITMO DE PRÉ-SUAVIZAÇÃO

Conforme discutido na seção 3.9.4, é comum que haja picos de pressão nas primeiras frentes de onda geradas por meio do CSPM. Para mitigá-los, foi utilizado um algoritmo de pré-suavização baseado no método de correção da velocidade XSPH. O algoritmo propõe que a velocidade de uma partícula i seja determinada pelas velocidades das partículas contidas em seu domínio compacto, conforme descrito na Equação 4.2.

$$V_i = (1 - pp)V_i + pp \sum_{j \in S_i} V_j m_j W_{ij} / \rho_j \quad \text{Equação 4.2}$$

em que S_i é o domínio compacto da partícula i e pp é um escalar denominado parâmetro de pré-suavização, o qual assume valores dentro de um intervalo de 0 a 1. Quando $pp = 0$, a

velocidade da partícula i não sofre influência das partículas contidas em seu domínio compacto. Já para $pp = 1$, V_i é determinada inteiramente pelas velocidades dessas partículas.

4.4. ESTUDO DE CASO

Os dados experimentais utilizados para validar a modelagem numérica desenvolvida nesse trabalho foram obtidos a partir de um sistema reservatório-tubo-válvula (Figura 4.5) localizado no Laboratório de Hidráulica e Meio Ambiente do Instituto Superior Técnico (IST), Portugal (Martins *et al.*, 2016). O sistema é composto por uma tubulação de cobre *quasi*-horizontal de 15,22 m de comprimento, diâmetro interno de 20 mm e espessura de parede de 1 mm (Figura 4.6a). À jusante da tubulação, há duas válvulas: uma é utilizada para o controle da vazão inicial e a outra é responsável por gerar o transiente (Figura 4.6b). Um reservatório hidropneumático de 60 L se encontra à montante do tubo, comportando-se como um reservatório de nível fixo (Figura 4.6c).

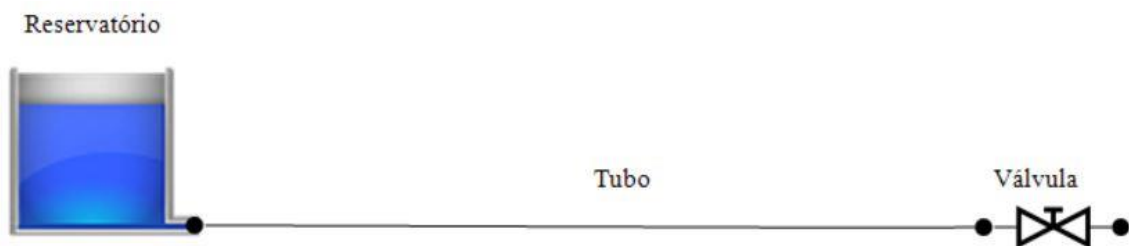


Figura 4.5 – Representação esquemática do sistema reservatório-tubo-válvula

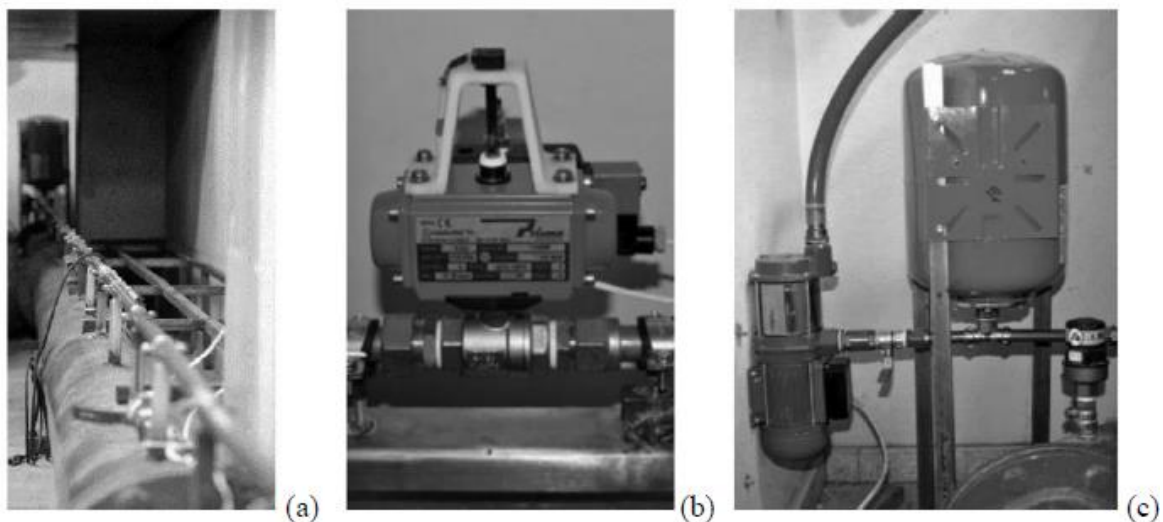


Figura 4.6 - Aparato experimental: (a) tubulação; (b) válvula de jusante responsável pelo transitório; (c) reservatório de montante. (Martins *et al.*, 2016, modificado)

O sistema de aquisição de dados é composto por: um osciloscópio (PicoScope™: Pico Technology, St Neots, Reino Unido) um mecanismo de sincronização; dois transdutores de

pressão (WIKA S-10: WIKA, Klingenberg, Alemanha), PT1 e PT2; um potenciômetro conectado à haste da válvula; fontes de energia; um computador. A Figura 4.7 apresenta uma visão geral desse sistema e sua esquematização.

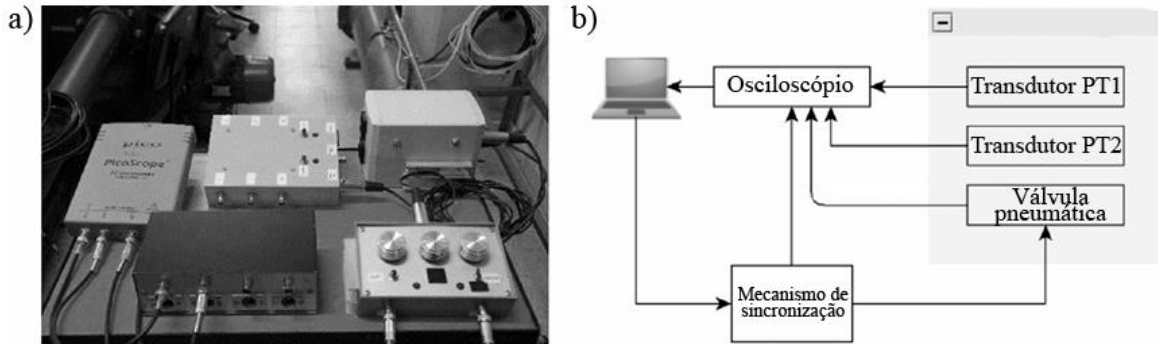


Figura 4.7 - Sistema de aquisição de dados: (a) visão geral; (b) esquematização. (Martins *et al.*, 2016, modificado)

Os transdutores possuem precisão de 0,5% para amplitude de pressões e estão localizados nas seções central (PT2) e imediatamente anterior à válvula de jusante (PT1). Essa configuração permite a aquisição de dados a uma frequência de até 3kHz.

Durante os experimentos, a válvula de jusante foi fechada em 0,012 s (Martins *et al.*, 2016). Estimou-se uma celeridade de 1255 m/s baseada no tempo de viagem da onda de pressão entre os transdutores. Foram testados múltiplos cenários com condições iniciais distintas. Todavia, nesse trabalho, serão utilizados apenas dois, cujos dados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Cenários testados nos experimentos

Cenário	Vazão inicial (m ³ /s)	Re (adimensional)	Nível do reservatório (m)
1	85 x 10 ⁻⁶	5411	45,70
2	133 x 10 ⁻⁶	8467	44,59

As razões de fechamento da válvula de jusante para ambos os cenários são apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.9.

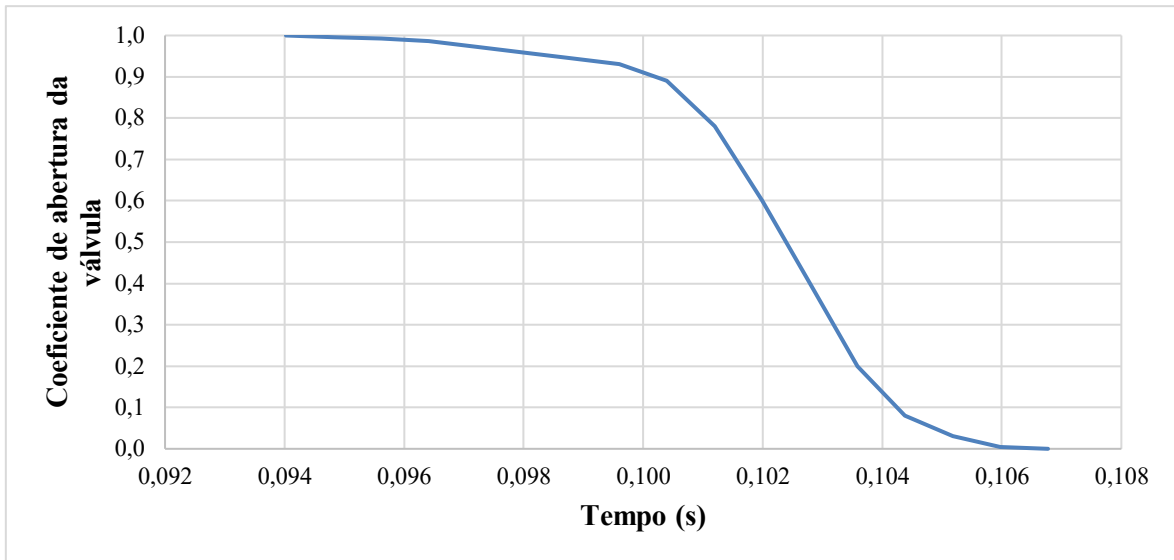


Figura 4.8 - Razão de fechamento da válvula de jusante para o cenário 1

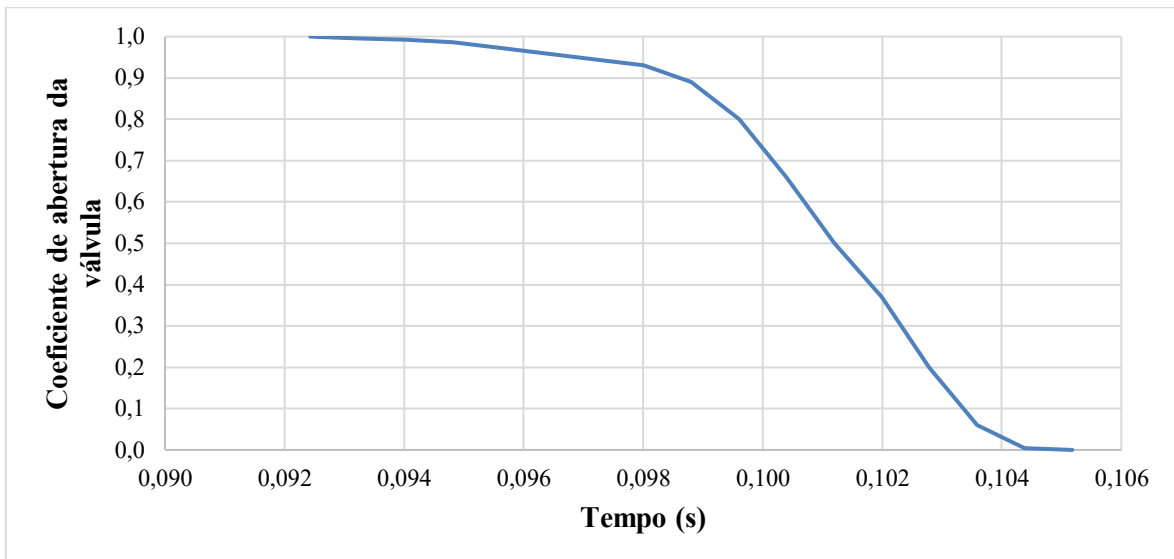


Figura 4.9 - Razão de fechamento da válvula de jusante para o cenário 2

4.5. MÉTRICAS DE COMPARAÇÃO

Múltiplas métricas de comparação podem ser utilizadas para avaliar resultados obtidos por meio de modelos numéricos. Dentre essas, destacam-se: erros médios quadráticos (RMSE); coeficiente de eficiência de *Nash–Sutcliffe* (NSE); média dos erros absolutos (MAE); erro absoluto percentual médio (MAPE).

Por meio de pesquisas na literatura, verificou-se a maior aplicabilidade dos métodos RMSE e NSE na análise de escoamentos e fenômenos hidrológicos, o que justificou a adoção desse trabalho para comparar os resultados numéricos com os dados experimentais.

Nessa seção, são apresentadas as formulações dessas métricas de comparação.

4.5.1. Erros médios quadráticos (RMSE)

A formulação dos erros médios quadráticos (RMSE) é apresentada na Equação 4.3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{p,i} - Y_{a,i})^2} \quad \text{Equação 4.3}$$

em que n é o número de observações, $Y_{p,i}$ é o valor obtido na simulação (CSPM ou MOC) e $Y_{a,i}$ é o valor do dado experimental.

4.5.2. Nash–Sutcliffe efficiency (NSE)

A formulação do coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970) é apresentada na Equação 4.4.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{calc})^2}{\sum (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2} \quad \text{Equação 4.4}$$

em que Y_{calc} é o valor obtido na simulação (CSPM ou MOC), Y_{obs} é o valor do dado experimental e \bar{Y}_{obs} é a média dos dados experimentais.

4.6. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PARTÍCULAS PARA O CSPM

Conforme explicitado nas seções 3.6.1 e 3.8, o SPH e o CSPM são métodos numéricos particulados cujo objetivo é fornecer aproximações para uma função e suas derivadas. Nesse processo, a escolha de um número de partículas otimizado é essencial para mitigar erros numéricos e de truncamento (Pan *et al.*, 2022), além de minimizar o esforço computacional.

A fim de determinar esse número otimizado para um contexto genérico, em que a escala do sistema não interfira na análise, foram propostos três parâmetros:

- $PAR_1 = \frac{N}{L}$, em que L é o comprimento da tubulação;
- $PAR_2 = \frac{2aN}{L}$;
- $PAR_3 = \frac{ND}{L}$, o qual é adimensional.

Esses parâmetros foram, então, utilizados para avaliar os erros médios quadráticos de múltiplas simulações com diferentes números de partículas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, são apresentados os resultados das simulações numéricas, os quais são comparados com os dados experimentais por meio das métricas descritas nas seções 4.5.1 e 4.5.2. Ademais, avalia-se: a influência dos parâmetros do CSPM e do algoritmo de pré-suavização nos resultados; o número de partículas otimizado por meio dos parâmetros propostos na seção 4.6.

5.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS DADOS EXPERIMENTAIS

Ambos os métodos foram utilizados para simular um transitório hidráulico nos dois cenários descritos na Tabela 4.2. Para o CSPM, utilizaram-se os seguintes parâmetros:

- Passo de tempo de $3,98 \times 10^{-5}$ s, o qual foi obtido por meio da Condição de Estabilidade de Courant;
- Conjunto de 305 partículas distribuídas uniformemente ao longo da tubulação;
- Coeficientes de viscosidade artificial: $\alpha = 1$, $\beta = 2$ e $\eta = 0.01$ (Hou *et al.*, 2012);
- Parâmetro de pré-suavização $pp = 0,5$;
- Comprimento de suavização $h = 1,0\Delta x$ (Hou *et al.*, 2012).

Para o MOC, utilizou-se um passo de tempo de $7,97 \times 10^{-4}$ s. Os resultados para os cenários 1 e 2 são apresentados nas Figuras 5.1 a 5.6. Já nas Tabelas 5.1 e 5.2, indicam-se os valores de RMSE e NSE. Na Tabela 5.3, são apresentadas as cargas de pressão máximas e mínimas.

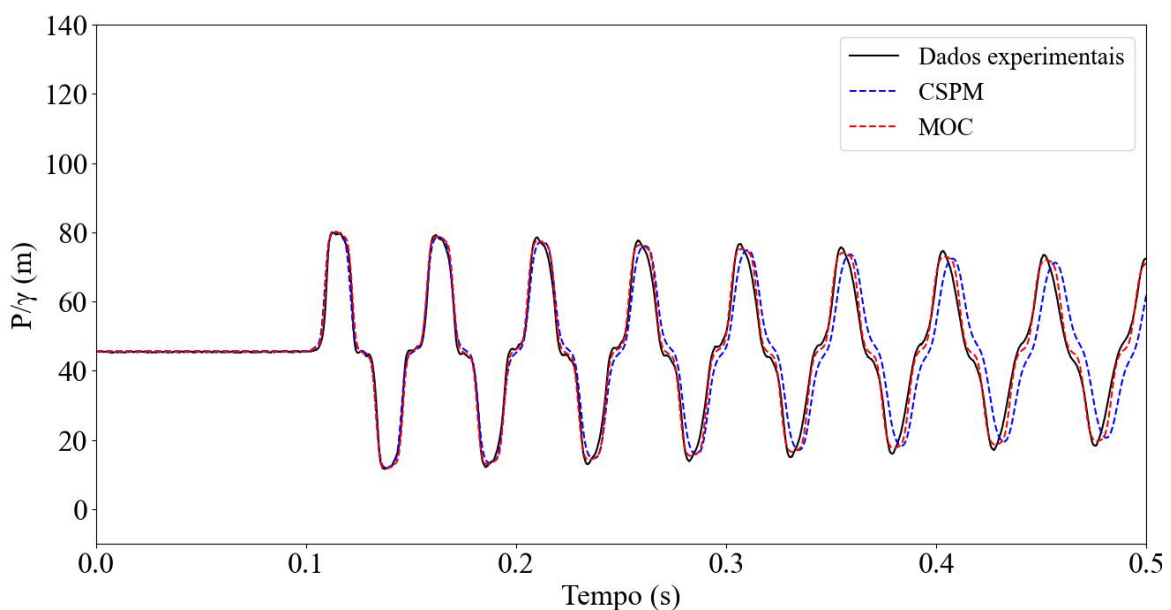


Figura 5.1 - Cenário 1: carga de pressão na seção central

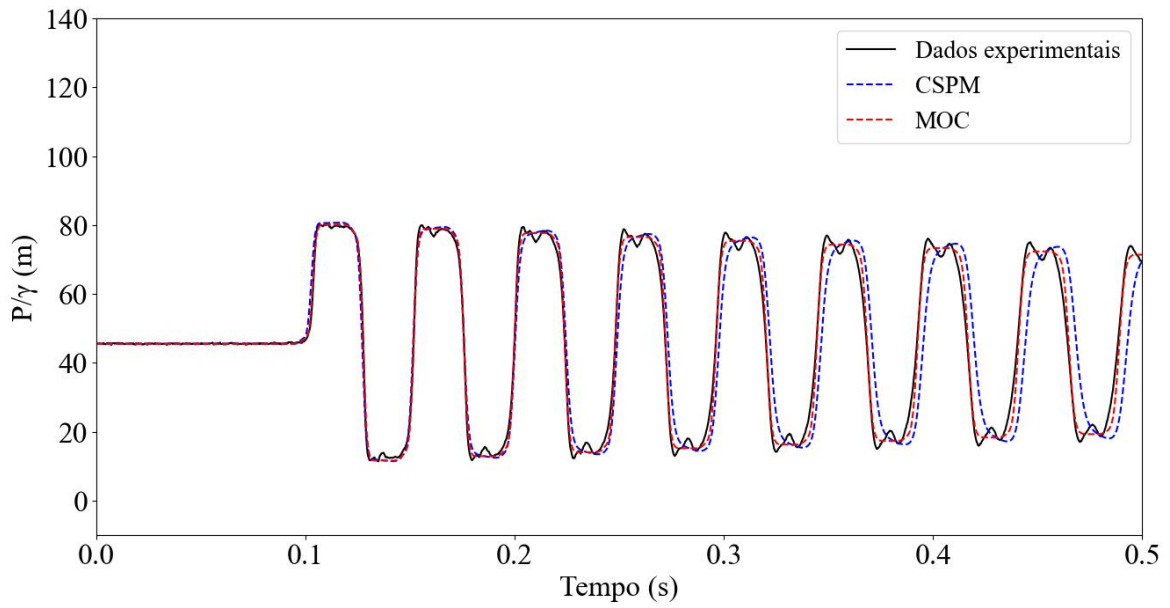


Figura 5.2 - Cenário 1: carga de pressão na seção da válvula de jusante

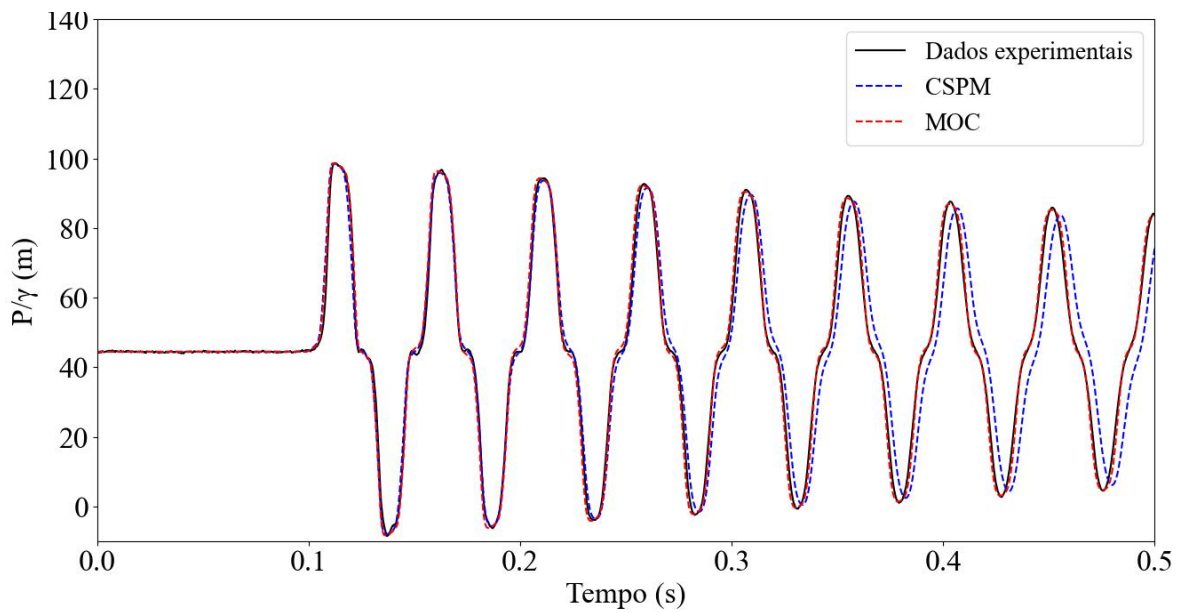


Figura 5.3 - Cenário 2: carga de pressão na seção central

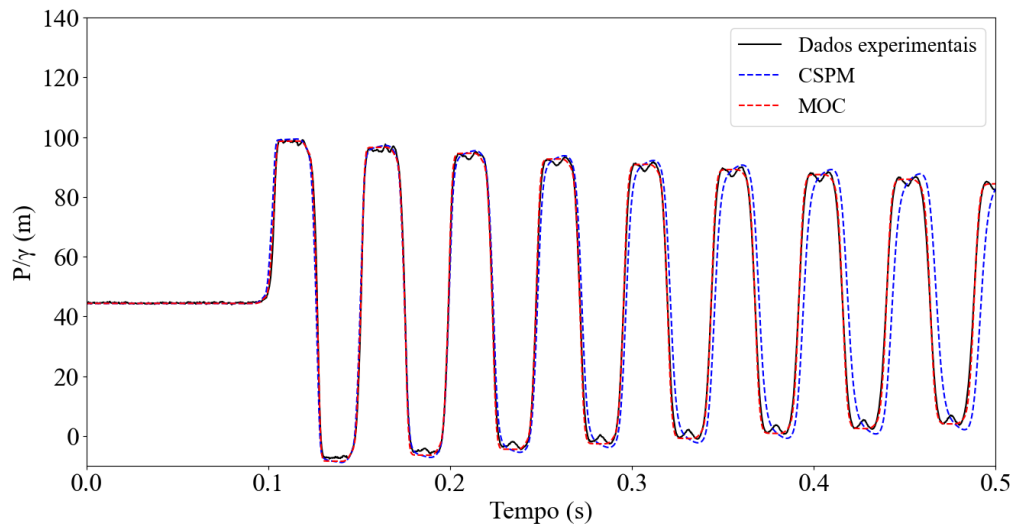


Figura 5.4 - Cenário 2: carga de pressão na seção da válvula de jusante

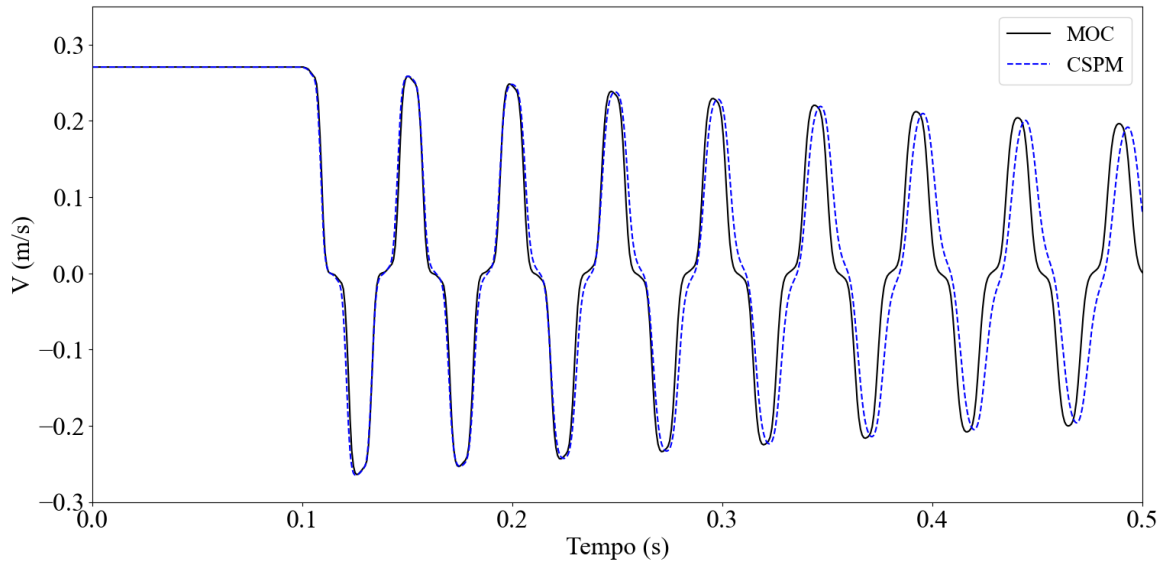


Figura 5.5 - Cenário 1: velocidade na seção central

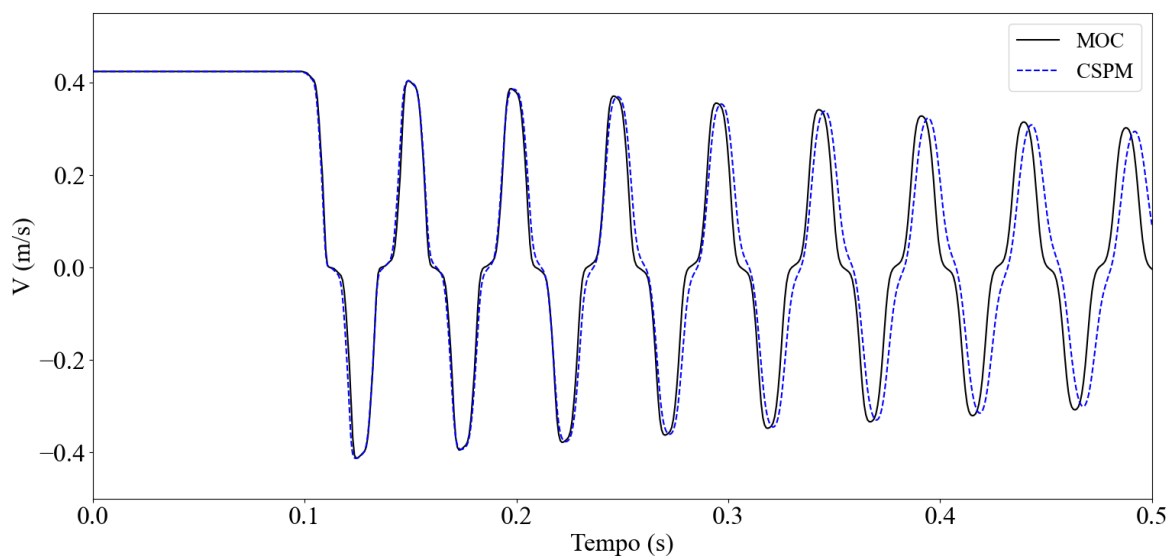


Figura 5.6 - Cenário 2: velocidade na seção central

Tabela 5.1 – RMSE e NSE para o cenário 1

Métrica	Seção central		Seção da válvula*	
	MOC	CSPM	MOC	CSPM
RMSE (m)	2,03	6,22	2,33	8,80
NSE	0,99	0,87	0,99	0,87

*Seção imediatamente anterior à válvula de jusante

Tabela 5.2 – RMSE e NSE para o cenário 2

Métrica	Seção central		Seção da válvula*	
	MOC	CSPM	MOC	CSPM
RMSE (m)	2,33	7,63	1,64	10,77
NSE	0,99	0,91	0,99	0,91

*Seção imediatamente anterior à válvula de jusante

Tabela 5.3 - Cargas de pressão máximas e mínimas para ambos os cenários: seção da válvula

Cenário	Carga de pressão máxima (m)			Carga de pressão mínima (m)		
	MOC	CSPM	Dados experimentais	MOC	CSPM	Dados experimentais
1	80.20	80.75	80.26	11.63	11.47	11.44
2	98.71	99.39	99.24	-8.46	-8.84	-7.62

Conforme ilustrado nas Figuras 5.1 a 5.4, ambos os métodos fornecem resultados que reproduzem, com precisão, a amplitude das ondas de pressão durante o transitório hidráulico. Essa verificação é confirmada pelas cargas de pressão máximas e mínimas descritas na

Tabela 5.3. Além disso, os perfis de velocidade em ambos os cenários (Figuras 5.5 e 5.6) são semelhantes para o MOC e CSPM.

Segundo a norma NBR12215-1 (ABNT, 2017), todos os componentes do sistema de uma adutora devem ser avaliados para as pressões atuantes na condição mais desfavorável. Considerando, para fins didáticos, que o sistema reservatório-tubo-válvula analisado nesse trabalho se trata de uma adutora, conclui-se que ambos os métodos são eficazes para simular o sistema em sua condição mais desfavorável. Tanto para as pressões máximas (sobrepessões) quanto para as mínimas (subpressões), MOC e CSPM geraram resultados próximos aos coletados pelo aparato experimental.

Percebe-se, também, a ausência de efeitos de difusão (*smearing effect*). Todavia, à medida que a simulação prossegue, é possível visualizar pequenas diferenças na amplitude da onda de pressão (erros de fase), especialmente no CSPM. Esse comportamento pode ser explicado por múltiplos fatores (Violeau e Rogers, 2016; Pan *et al.*, 2022):

- Considerar que a celeridade é constante durante as simulações, o que não reflete um transitório real, uma vez que a tendência é que a velocidade da onda diminua com o avanço da simulação;
- Negligenciar os efeitos da interação fluido-estrutura;
- Erros numéricos inerentes ao processo de interpolação do CSPM.

As métricas de comparação, cujos valores são descritos nas Tabelas 5.1 e 5.2, demonstram que o MOC forneceu resultados mais próximos dos dados experimentais. Em ambos os cenários, o RMSE para o método foi cerca de 30% do obtido para o CSPM.

Já para o coeficiente NSE, o MOC também apresentou melhores resultados, uma vez que gerou valores próximos de 1,00. Nessa métrica, quanto maior o valor obtido (limitado a 1,00), maior é a eficiência do método em representar os dados observados (dados experimentais).

Quanto à pré-suavização, observa-se que não há picos de pressão evidentes nas Figuras 5.1 a 5.4. A eficiência dessa técnica é discutida, em detalhes, na seção 5.3.

5.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO CSPM

Nas próximas seções, buscou-se avaliar a influência dos parâmetros do CSPM nos resultados das simulações numéricas. As discussões são apresentadas na seguinte ordem: número de partículas; funções de suavização; viscosidade artificial.

5.2.1. Número de partículas

A fim de verificar a influência do número de partículas nas simulações do CSPM, o cenário 1 foi simulado para três diferentes configurações, cujos números de partículas são: 31, 153 e 305. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8.

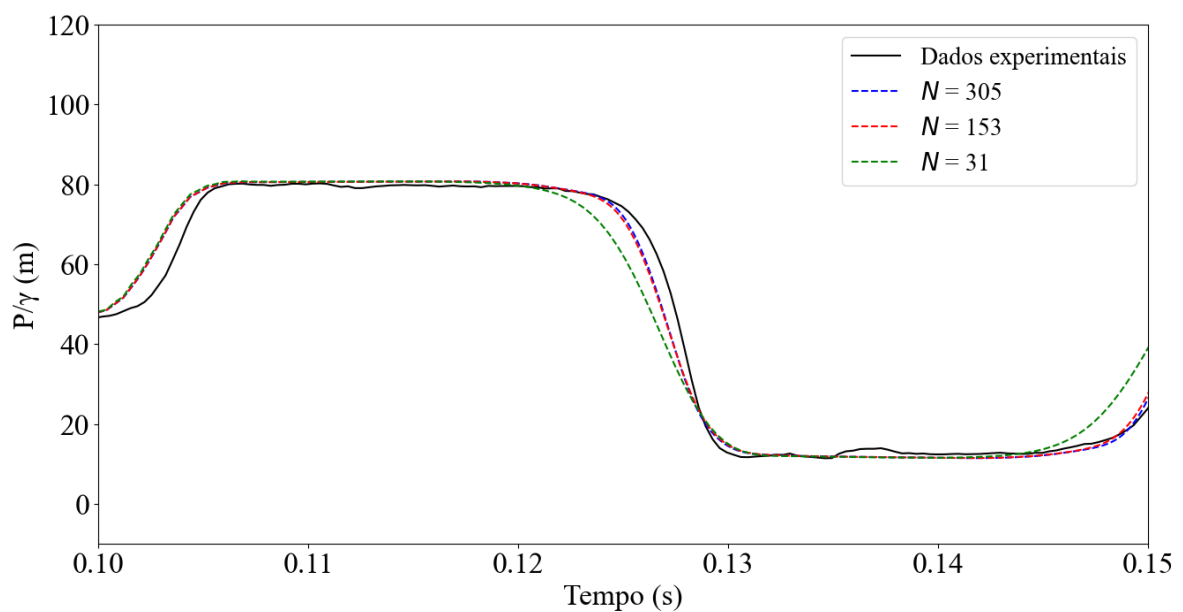


Figura 5.7 - Influência do número de partículas na simulação com CSPM: carga de pressão na seção da válvula

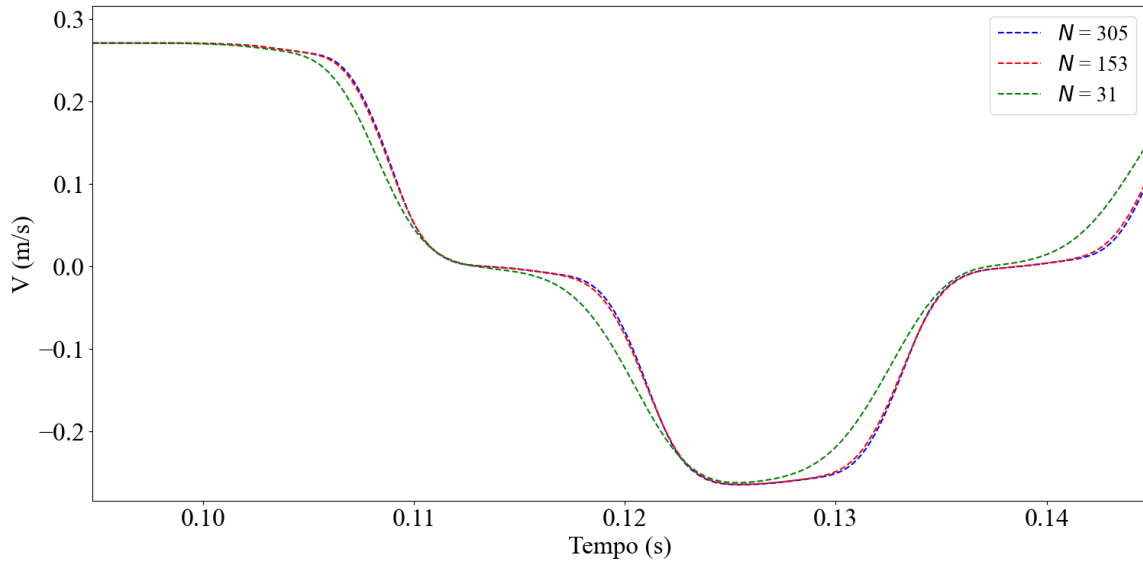


Figura 5.8 – Influência do número de partículas na simulação com CSPM: velocidade na seção central

Observa-se que, na Figura 5.7, as curvas vermelha ($N = 153$) e azul ($N = 305$) apresentam valores de pressão mais próximos dos dados experimentais. Isso demonstra que utilizar menos partículas tende a gerar mais erros numéricos nas oscilações de pressão. Esse comportamento pode ser explicado pelo erro de truncamento da aproximação kernel para as derivadas espaciais das funções governantes do regime transiente (Pan *et al.*, 2022), as quais são descritas na seção 3.3. Quanto ao perfil de velocidades das partículas, o qual é representado para a seção central na Figura 5.8, observa-se o mesmo comportamento, em que a utilização de um maior número de partículas gera resultados com menos erros numéricos.

Ademais, os resultados da Figura 5.7 também indicam a existência de efeitos de difusão, os quais se tornam menos evidentes com a utilização de uma maior número de partículas para representar o sistema.

Vale ressaltar, todavia, que a utilização de um maior número de partículas no CSPM acarreta maior demanda de processamento computacional, o que eleva o tempo das simulações numéricas.

5.2.2. Determinação do número de partículas

De modo a determinar o número de partículas otimizado para simular transitórios hidráulicos utilizando o CSPM, o cenário 1 foi simulado para sete diferentes configurações, cujos números de partículas são: 17, 31, 153, 305, 609, 1015 e 1523. Calcularam-se, então, os

erros médios quadráticos para cada uma dessas configurações, os quais são representados, nas Figuras 5.9 a 5.11, em função dos parâmetros descritos na seção 4.6. Ressalta-se que os valores de RMSE foram calculados para $t \leq 0,3$ s, uma vez que os resultados das simulações apresentam maior compatibilidade com os dados experimentais, conforme demonstrado na seção 5.1.

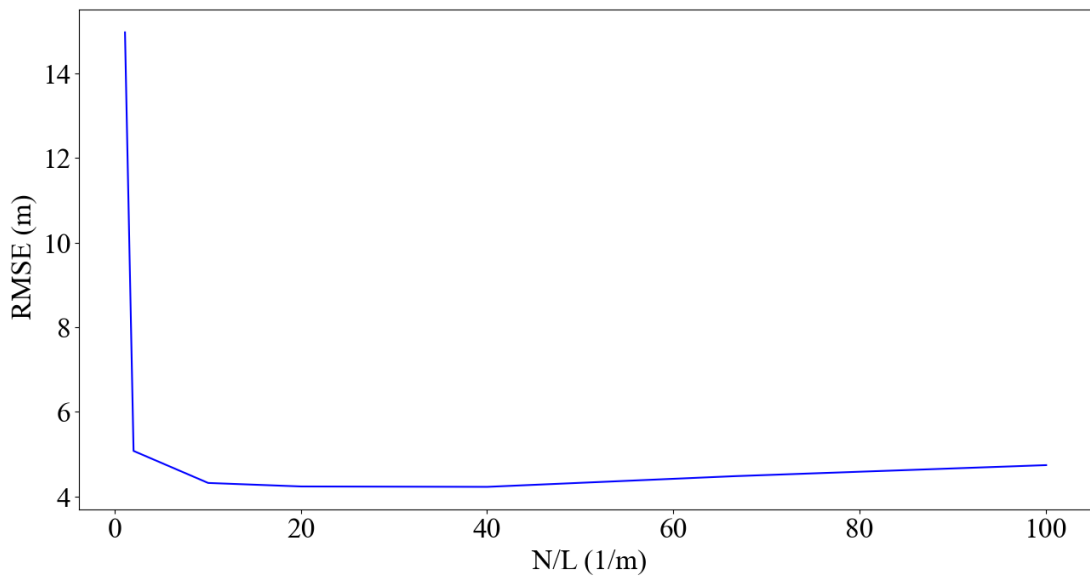


Figura 5.9 – RMSE em função de PAR_1 : seção da válvula

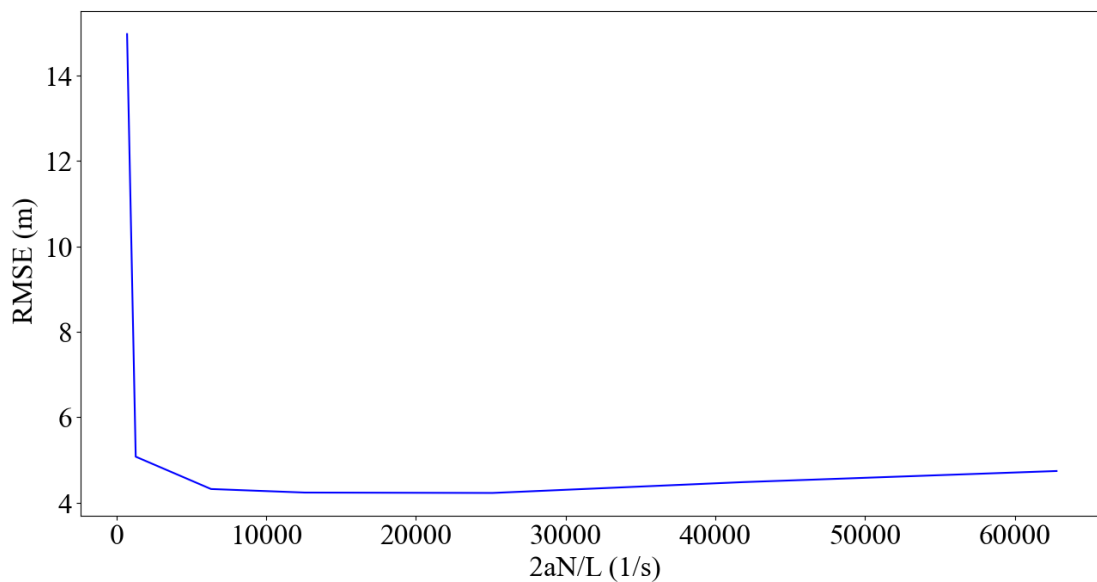


Figura 5.10 – RMSE em função de PAR_2 : seção da válvula

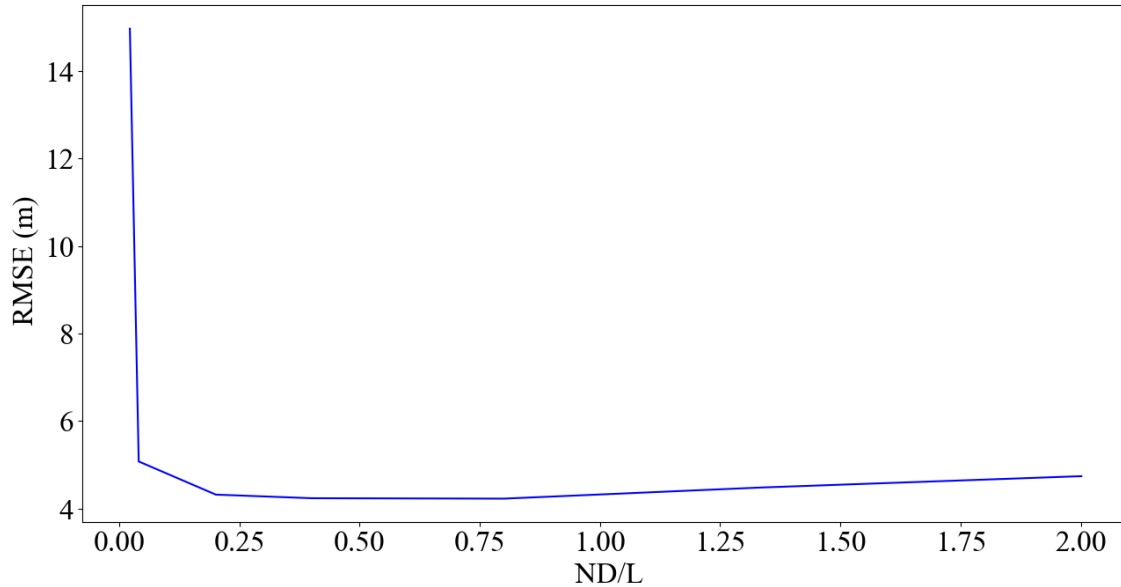


Figura 5.11 – RMSE em função de PAR_3 : seção da válvula

Observa-se que, nas Figuras 5.9 a 5.11, os menores valores de RMSE foram obtidos para:

- $PAR_1 \cong 20,04$;
- $PAR_2 \cong 12574,74$;
- $PAR_3 \cong 0,40$.

Esses resultados correspondem, para o sistema reservatório-tubo-válvula analisado nesse trabalho, a um número de partículas igual a 305. Justifica-se, portanto, a quantidade de partículas utilizadas nas simulações da seção 5.1.

Ressalta-se, todavia, que, a fim de generalizar os valores dos parâmetros PAR_1 , PAR_2 e PAR_3 para um sistema reservatório-tubo-válvula qualquer, é necessário conduzir mais simulações em sistemas com configurações variadas. Ademais, recomenda-se avaliar a utilização de outros modelos para o cálculo de perdas por atrito transiente, a fim de investigar a influência desses nos parâmetros para obtenção de um número otimizado de partículas.

5.2.3. Função de suavização

Conforme mencionado na seção 3.7.4, a escolha da função de suavização a ser utilizada no SPH ou CSPM é essencial para garantir a estabilidade numérica e precisão do método, especialmente quando se utiliza aproximação por partículas.

Para avaliar a influência da escolha dessa função, simulou-se o cenário 1 com 153 partículas distribuídas uniformemente ao longo da tubulação. Foram utilizados dois kernels: bspline cúbica unidimensional e gaussiana modifica, cujas formulações são apresentadas na seção 3.7.4. Os resultados são dispostos na Figura 5.12.

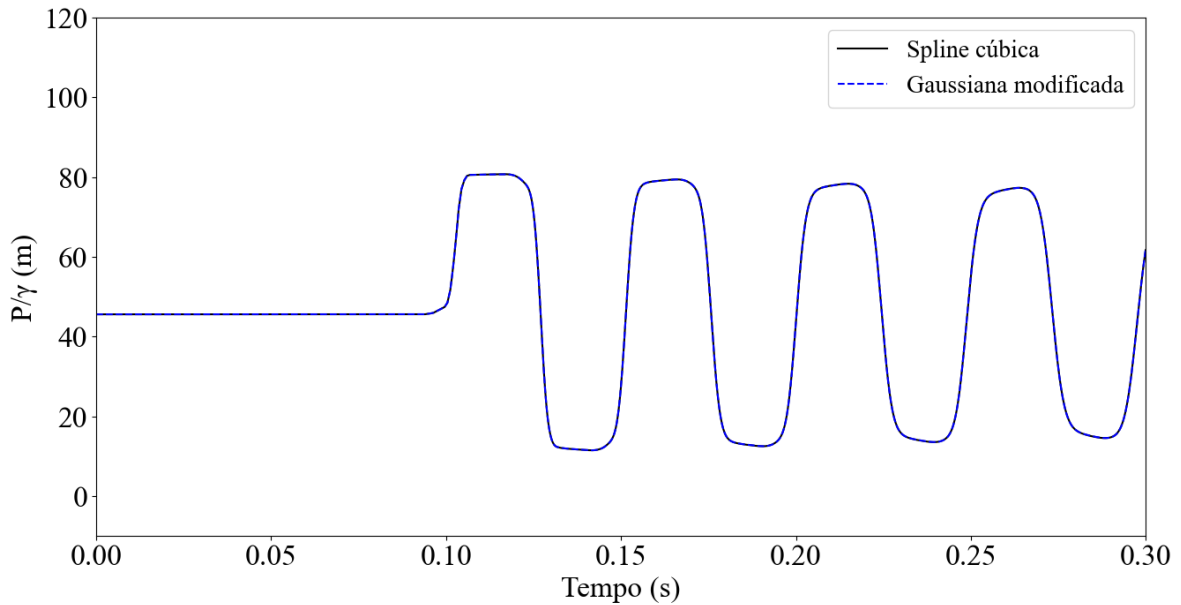


Figura 5.12 - Influência da função de suavização: seção da válvula

Observa-se, na Figura 5.12, que ambas as funções de suavização foram capazes de prever o histórico de pressões na seção da válvula, não sendo possível observar distinção entre os resultados. Todavia, para o contexto geral da aplicação do SPH ou CSPM a um transitério hidráulico, não é possível afirmar qual kernel é mais adequado ou otimizado, uma vez que essa escolha depende das condições iniciais e de contorno do problema em análise (Hou *et al.*, 2012).

Ademais, a Figura 5.12 exemplifica a eficiência computacional da função bspline cúbica e o porquê de sua ampla utilização em simulações com SPH e CSPM (Monaghan e Lattanzio, 1985; Hou *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2022).

5.2.4. Viscosidade artificial

A viscosidade artificial é um termo dissipativo utilizado para lidar com as oscilações numéricas advindas da aplicação do CSPM a um transitério hidráulico. A fim de avaliar a influência desse parâmetro, simulou-se o cenário 1 com 153 partículas distribuídas uniformemente ao longo da tubulação. Os resultados são apresentados na Figura 5.13.

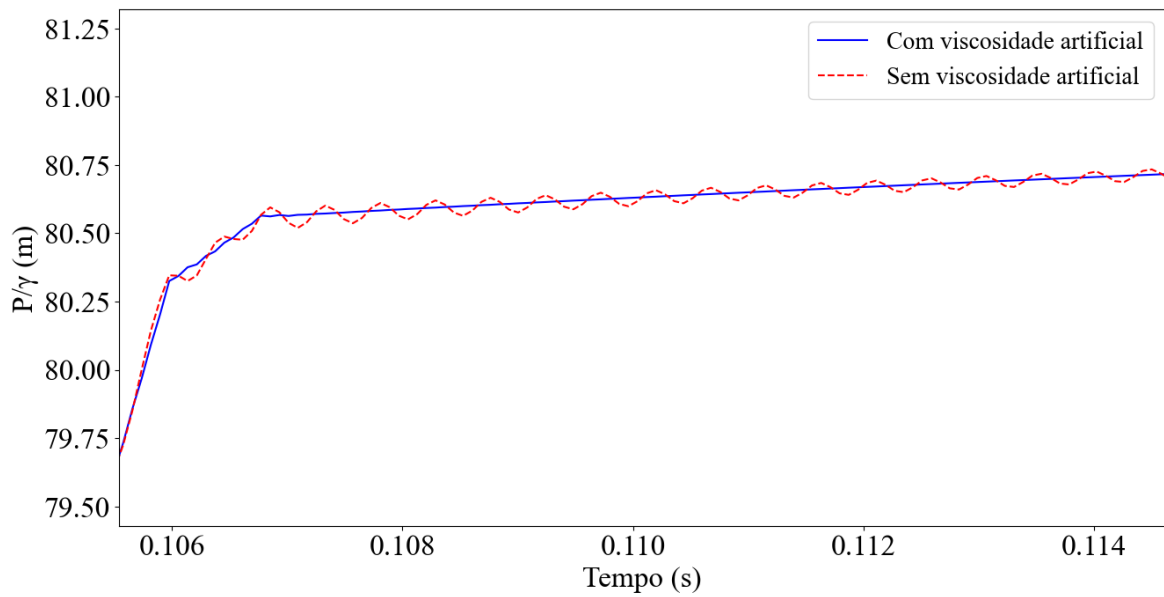


Figura 5.13 - Influência da viscosidade artificial: seção da válvula

Observa-se, na Figura 5.13, que houve oscilações numéricas na crista da onda de pressão na curva sem a incidência da viscosidade artificial. Para avaliar o impacto dos componentes α e β no comportamento desse parâmetro, também foram realizadas outras duas simulações:

- Na primeira, utilizou-se o cenário 1 com 153 partículas, $\beta = 2$, e α assumindo três valores distintos: 0,5; 1,0; 1,5. Os resultados são apresentados na Figura 5.14;
- Na segunda simulação, também se utilizou o cenário 1 com 153 partículas, $\alpha = 1$, e β assumindo três valores distintos: 1,0; 2,0; 3,0. Os resultados são indicados na Figura 5.15.

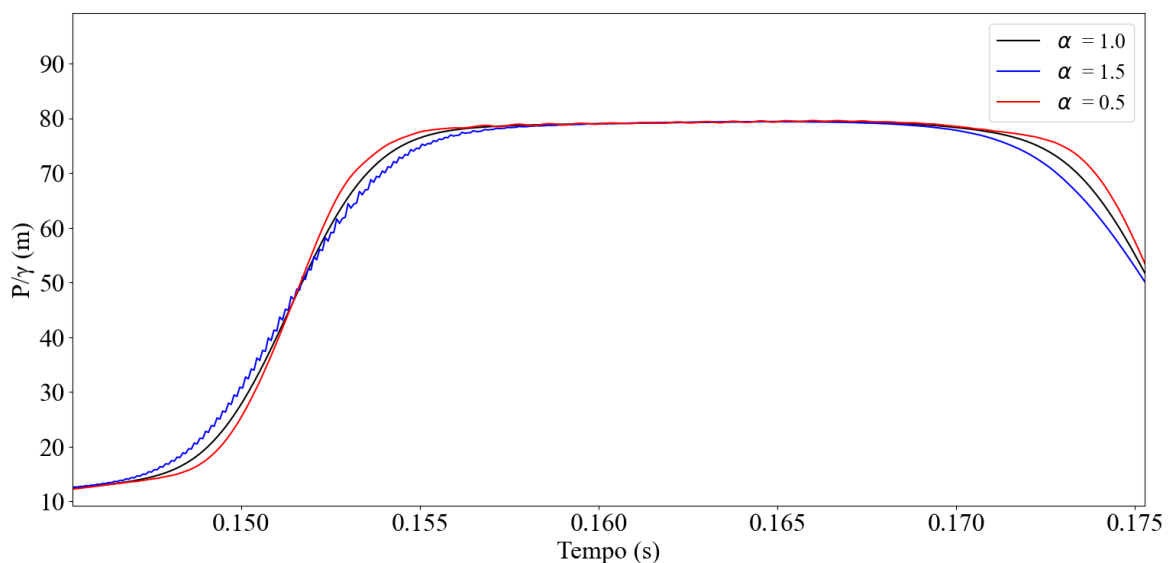


Figura 5.14 - Influência do parâmetro α : seção da válvula

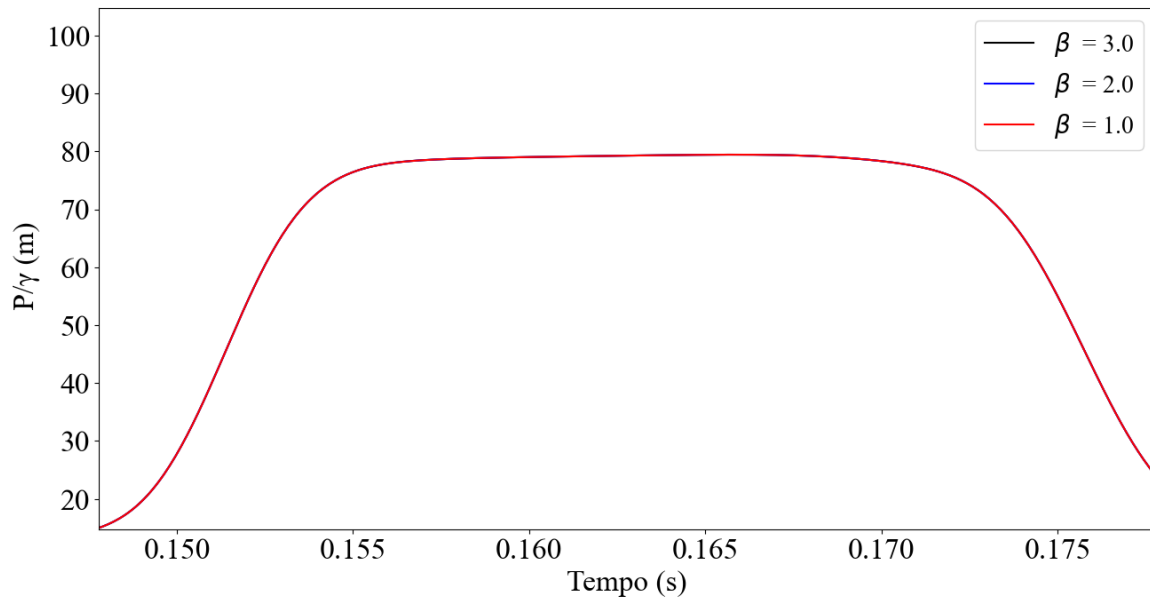


Figura 5.15 - Influência do parâmetro β : seção da válvula

Nota-se, na Figura 5.14, que a dissipação numérica da onda de pressão tende a ficar maior quando α aumenta de 0,5 para 1,5. Nesse sentido, o parâmetro pode ser utilizado para diminuir a oscilação numérica (Pan *et al.*, 2022).

Já na Figura 5.15, independentemente do valor de β , mantém-se a consistência dos resultados. Isso ocorre devido à influência desprezível do termo βu_{ij}^2 na Equação 3.79, uma vez que o número de Mach (medida adimensional de velocidade) é pequeno (Pan *et al.*, 2022). Em suma, esse termo é utilizado para restringir a interpenetração das partículas em escoamentos com elevados números de Mach.

5.3. INFLUÊNCIA DA PRÉ-SUAVIZAÇÃO

Conforme discutido na seção 3.9.4, é comum que ocorram picos de pressão nas primeiras frentes de onda de um transiente hidráulico simulado pelo CSPM. Por meio de técnicas de pré-suavização, é possível mitigar esse efeito.

A fim de avaliar o algoritmo de pré-suavização proposto nesse trabalho (seção 4.3), simulou-se o cenário 1 com 153 partículas, em que o parâmetro pp assumiu dois valores: 0,0 e 0,5. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.16 e 5.17.

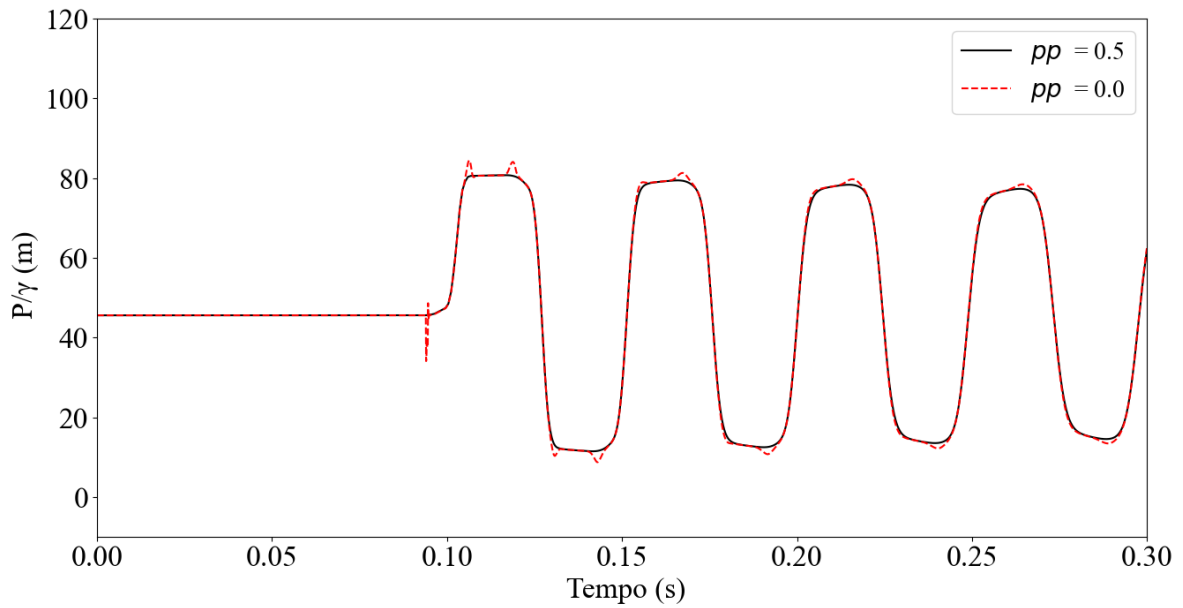


Figura 5.16 - Influência do parâmetro de pré-suavização: carga de pressão na seção da válvula

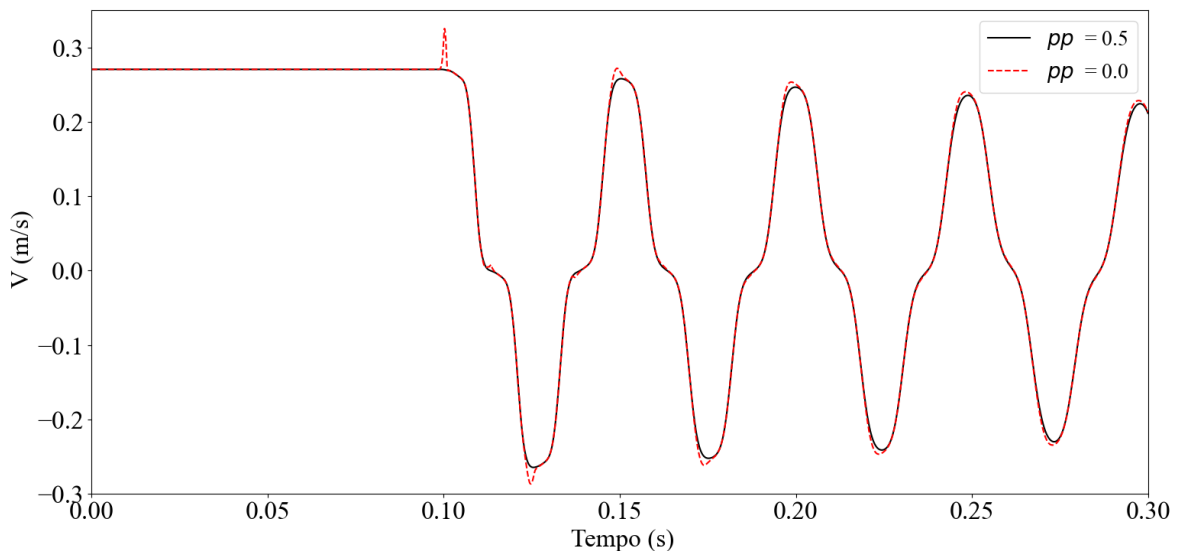


Figura 5.17 - Influência do parâmetro de pré-suavização: velocidade na seção central

Na Figura 5.16, são nítidos os picos de pressão nas primeiras frentes de onda quando não se utiliza pré-suavização ($pp = 0$). Já quando o algoritmo é utilizado ($pp = 0,5$), obtêm-se ondas de pressão suaves sem quaisquer picos, indicando a eficiência da correção no perfil de velocidades das partículas que compõem o sistema.

Os resultados da Figura 5.17 corroboram com as observações elencadas no parágrafo anterior. É possível visualizar pequenos picos de velocidade nas primeiras cristas e vales da onda. Todavia, esse efeito se dissipa com o decorrer da simulação. Observou-se que o

algoritmo de pré-suavização foi eficiente quando aplicado em, no mínimo, seis passos de tempo

5.4. INFLUÊNCIA DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL

Perdas por atrito transiente são fundamentais para que o transitório hidráulico se dissipe e um novo regime permanente seja estabelecido. De modo a avaliar a influência dessas perdas, o cenário 1 foi simulado com 153 partículas para duas situações: com e sem fator de atrito variável. Os resultados são indicados nas Figuras 5.18 a 5.21.

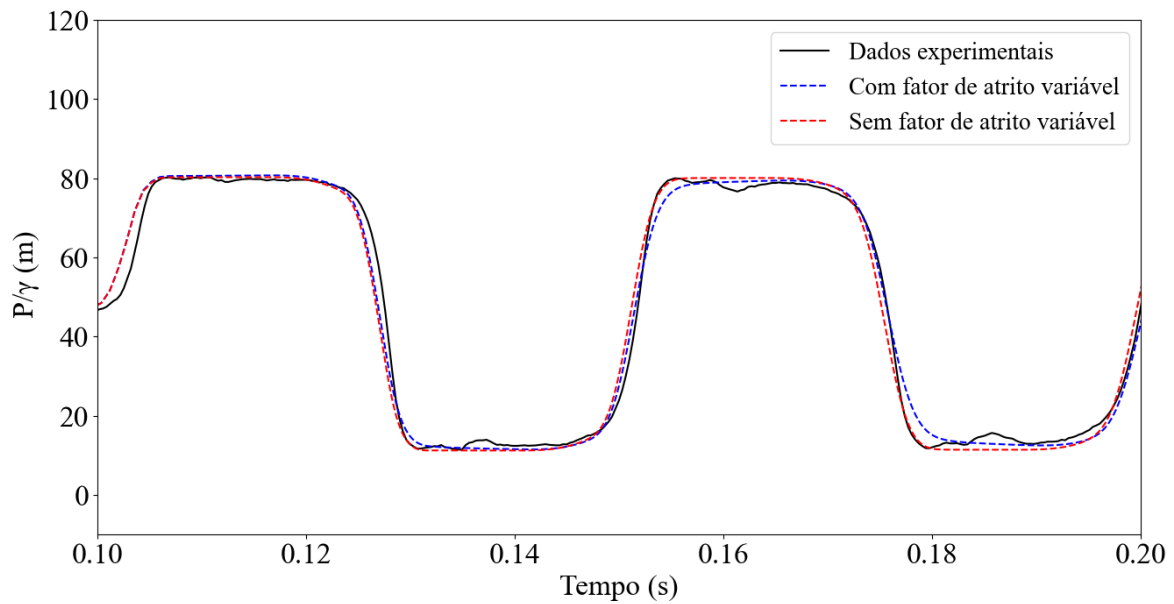


Figura 5.18 - Influência do fator de atrito variável: carga de pressão na seção da válvula

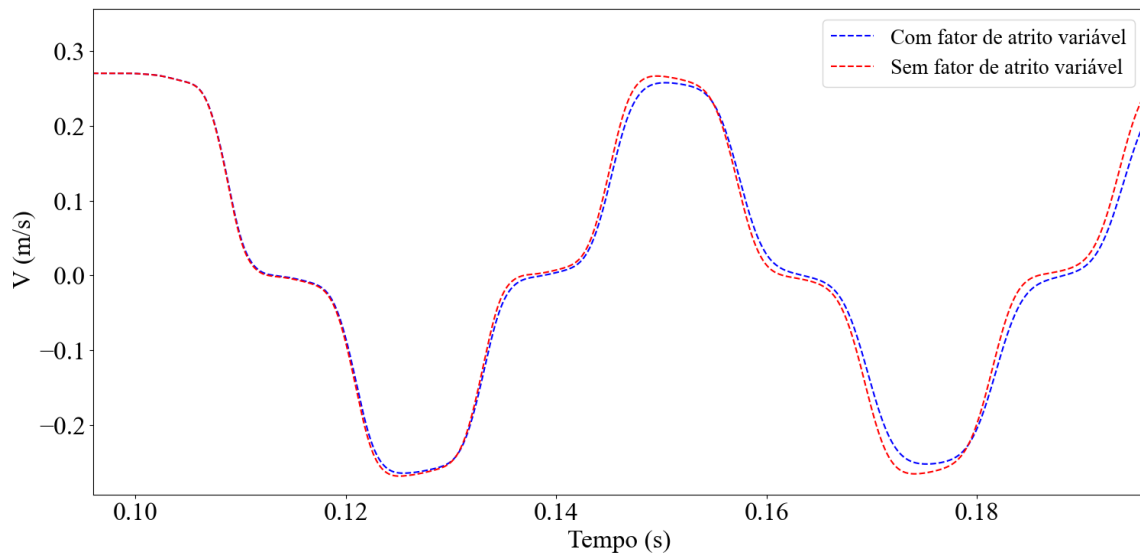


Figura 5.19 - Influência do fator de atrito variável: velocidade na seção central

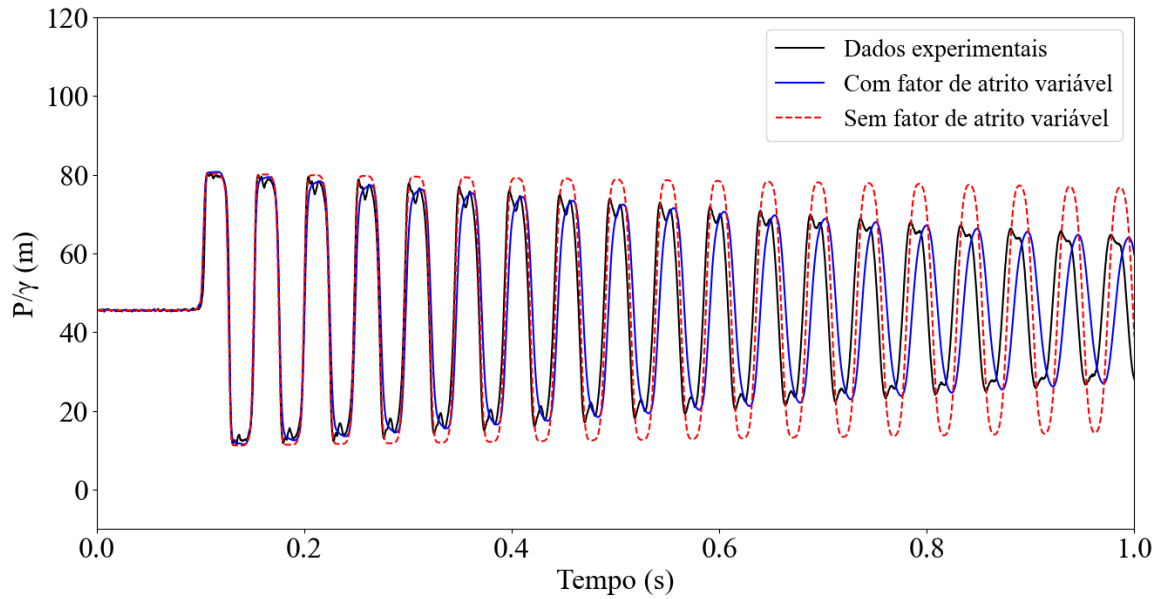


Figura 5.20 - Influência do fator de atrito variável no primeiro segundo de simulação: carga de pressão na seção da válvula

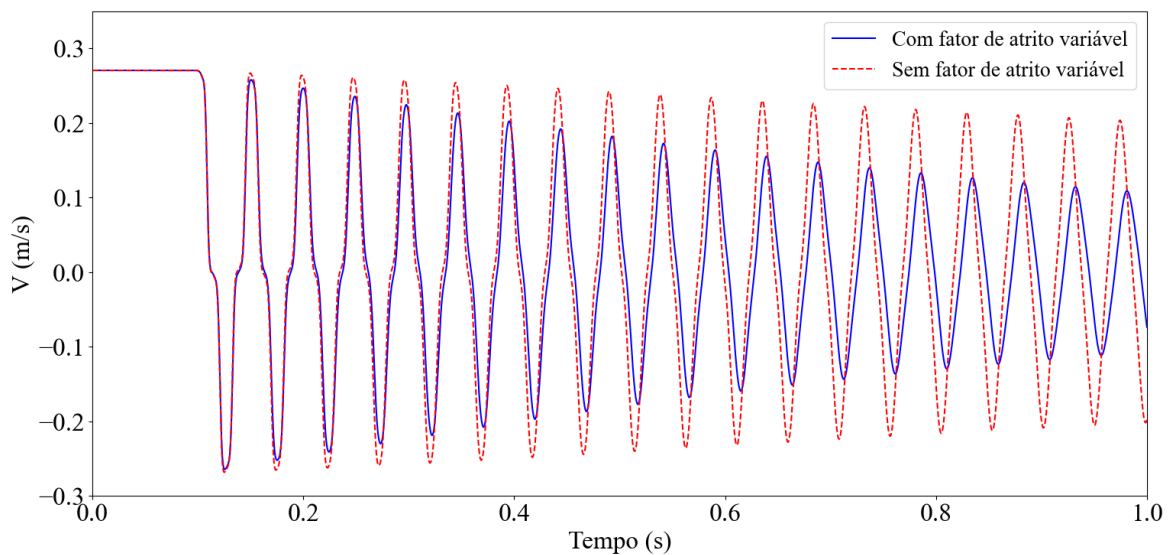


Figura 5.21 - Influência do fator de atrito variável no primeiro segundo de simulação: velocidade na seção central

Constata-se, especialmente nas Figuras 5.18, 5.20 e 5.21, que a consideração de perdas por atrito transiente gera resultados mais próximos dos dados experimentais, tanto em termos de formato quanto de fase da onda de pressão (Soares *et al.*, 2017).

Além disso, observa-se que a não consideração do fator de atrito variável gera ondas que se dissipam de modo mais vagaroso, o que posterga a dissipação do transiente e, conseqüentemente, o estabelecimento de um novo regime permanente. Embora esse efeito não prejudique a obtenção de pressões críticas (máximas e mínimas) para o

dimensionamento de sistemas hidráulicos, induz-se uma representação não realista do comportamento de um transiente hidráulico.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização de métodos numéricos sem malhas (meshfree) tem se tornado cada vez mais frequente na simulação de transitórios hidráulicos. O cerne desses métodos é providenciar soluções numéricas estáveis e precisas para as equações governantes do regime transiente. Para tal, são utilizados conjuntos de nós ou partículas distribuídos de modo aleatório ou uniforme.

Dentre as vantagens dos métodos meshfree, destacam-se a simplicidade de implementação computacional e aplicabilidade a sistemas com geometrias e condições de contorno complexas.

O SPH é o método sem malhas mais utilizado na simulação de transitórios hidráulicos. Todavia, sua formulação tende a gerar erros numéricos expressivos. Nesse contexto, diferentes correções foram propostas, em que se destaca o CSPM. Esse, por meio de uma expansão em série de Taylor, fornece versões corrigidas para a aproximação de uma função e suas derivadas.

Neste trabalho, a fim de avaliar a aplicabilidade de métodos com e sem malhas na representação de transientes hidráulicos, MOC e CSPM foram utilizados para analisar um sistema reservatório-tubo-válvula sujeito a escoamento transiente. Dados experimentais foram utilizados para validar a modelagem numérica, em que se utilizaram duas métricas de comparação: RMSE e NSE. Avaliou-se, também, a influência dos parâmetros do CSPM nos resultados numéricos, além do impacto da correção do perfil de velocidades das partículas nos primeiros passos de tempo (pré-suavização) e da consideração de perdas por atrito transiente.

As principais conclusões obtidas com o estudo foram:

- Ambos os métodos (MOC e CSPM) são capazes de representar a amplitude da onda de pressão. Entretanto, erros de fase são visíveis à medida que a simulação prossegue, especialmente no CSPM. As causas comuns para esse efeito são a consideração de celeridade constante e negligência da interação fluido-estrutura;
- Embora os métodos tenham apresentado resultados similares, as métricas de comparação (RMSE e NSE) indicam que o MOC gerou valores mais próximos dos dados experimentais. Salienta-se, também, que o CSPM, mesmo para simulações

com menores números de partículas, demandou maior tempo de processamento computacional;

- Definir o número de partículas nas simulações com CSPM é essencial para garantir a estabilidade do método e menores erros numéricos. Observou-se, de modo geral, que um menor número de partículas tende a gerar maior dissipação numérica nas oscilações de pressão. Esse comportamento pode ser explicado pelo erro de truncamento na aproximação kernel das derivadas espaciais das equações governantes do regime transiente (Pan *et al.*, 2022). Ademais, esse comportamento também indica a presença de efeitos de difusão (*smearing effect*), os quais se tornam menos evidentes com a utilização de uma maior número de partículas para representar o sistema (Hou *et al.*, 2012). Ressalta-se, todavia, que a utilização de um número maior de partículas nas simulações acarreta maior demanda de processamento;
- A utilização dos parâmetros PAR_1 , PAR_2 e PAR_3 é viável para obter um número de partículas otimizado em simulações que utilizam o CSPM. Todavia, é necessário conduzir mais simulações em sistemas com configurações variadas. Ademais, recomenda-se avaliar a utilização de outros modelos para o cálculo de perdas por atrito transiente;
- Embora as funções de suavização utilizadas nesse trabalho tenham gerado resultados compatíveis com os dados experimentais, não é possível indicar a existência de um kernel otimizado para o contexto geral de simulações com CSPM. A escolha dessa função depende das condições iniciais e de contorno do problema em análise (Hou *et al.*, 2012). Todavia, os resultados refletem a eficiência computacional da função bspline cúbica e sua ampla utilização em simulações com CSPM (Monaghan E Lattanzio, 1985; Hou *et al.*, 2012; Pan *et al.*, 2022);
- A utilização da formulação clássica do SPH ou CSPM na simulação de transitórios hidráulicos pressupõe a inserção de um termo dissipativo, denominado viscosidade artificial. Ele é responsável por lidar com as oscilações advindas do método e mitigar erros numéricos (Monaghan e Gingold, 1983; Liu e Liu, 2003). Os resultados indicam que a dissipação numérica da onda de pressão tende a ficar maior quando α aumenta de 0,5 para 1,5. Nesse sentido, o parâmetro pode ser utilizado para diminuir a oscilação numérica (Pan *et al.*, 2022). Já para o parâmetro β , independentemente de seu valor, mantém-se a consistência dos resultados. Isso ocorre devido à influência

desprezível do termo βu_{ij}^2 na formulação da viscosidade artificial, uma vez que o número de Mach (medida adimensional de velocidade) é pequeno (Pan *et al.*, 2022). Em suma, esse termo é utilizado para restringir a interpenetração das partículas em escoamentos com elevados números de Mach;

- A consideração de perdas por atrito transiente nas simulações contribui para a compatibilidade entre os resultados numéricos e os dados experimentais, especialmente quanto ao formato e fase da onda de pressão (Soares *et al.*, 2017);
- A utilização de técnicas de pré-suavização é essencial para garantir a mitigação de picos de pressão nas frentes de onda geradas pelo CSPM. O algoritmo proposto nesse trabalho, o qual se baseia na correção do perfil de velocidades das partículas durante os primeiros passos de tempo, foi capaz de eliminar os picos de pressão nas primeiras frentes de onda. Observou-se que o algoritmo foi eficiente quando aplicado em, no mínimo, seis passos de tempo.

Quanto a possíveis recomendações de estudos e trabalhos futuros, elencam-se os seguintes tópicos:

- Incorporação de outros modelos de perdas por atrito transiente, especialmente aqueles que permitem calibração por meio de dados experimentais;
- Validação dos parâmetros PAR_1 , PAR_2 e PAR_3 por meio da simulação de transitórios hidráulicos em demais sistemas experimentais;
- Utilização e proposição de novas funções de suavização, uma vez que a escolha de um kernel otimizado depende das condições iniciais e de contorno de cada problema analisado;
- Aplicação do CSPM a sistemas reais que utilizam dispositivos de proteção, tais como reservatórios hidropneumáticos e chaminés de equilíbrio;
- Aplicação do CSPM a tubulações plásticas, em que é necessário considerar o efeito da viscoelasticidade;
- Utilização do CSPM para simulações em que a movimentação das partículas não é restringida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.215-1: Projeto de adutora de água – Parte 1: Conduto forçado. Rio de Janeiro, p. 26. 2017.
- Bertaglia, G.; Ioriatti, M.; Valiani, A.; Dumbser, M.; Caleffi, V. (2018). Numerical Methods for Hydraulic Transients in visco-elastic pipes. *Journal of Fluids and Structures*, v.81, p. 230-254.
- Boulos, P. F; Karney, B. W; Wood, D. J.; Lingireddy, S. (2005). Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. *Journal AWWA*, 97:5.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Chen, J. K., Beraun, J. E., Carney, T. C., (1999). A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 46: 231–252 p.
- Chen, J. K., Beraun, J. E., Jih, C. J. (2001). A corrective smoothed particle method for transient elastoplastic dynamics. *Computational Mechanics*, 27, 177-187.
- Colagrossi, A. (2004). *A Meshless Lagrangian Method for Free–Surface and Interface Flows with Fragmentation*. Università di Roma La Sapienza.
- Covas, D.; Ramos H.; Almeida, A. B. (2005). Impulse Response Method for Solving Hydraulic Transients in Viscoelastic Pipes. Em: XXXI IAHR Congress, Seoull, Korea, 12-18 Set. 2005.
- Diniz, A.B.N. (2020). *Transitórios Hidráulicos e Cavitação em Linhas de Recalque com Ventosas*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM – XX/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135p.
- Fulk, D. A. (1994). *A numerical analysis of smoothed particle hydrodynamics*. PhD Thesis: Air Force Institute of Technology.
- Gingold, R. A.; Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 181. 375–389 p.
- Halliwell, A. R. (1963). Velocity of a Water-Hammer Wave in an Elastic Pipe. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 89, n. HY4, p. 1-21, July.
- Hou, Q; Kruisbrink, A.; Tijsseling A. S.; Keramat, A., (2012). Simulating water hammer with corrective smoothed particle method. BHR Group – 11th International Conferences on Pressure Surges.

- Hou, Q., Wang, S., Kruisbrink, A. C. H., Tijsseling, A. S. (2015). Lagrangian modelling of fluid transients in pipelines with entrapped air. Proceedings of the 12th International Conference on Pressure Surges (pp. 215-227). BHR Group.
- Fernandes Júnior, J. (2021). Análise do Transitório Hidráulico com Perda por Atrito Variável em Conduitos Forçados através do Método SPH. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Publicação PTARH.DM – XX/2020, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 79p.
- Karney, B. W. (2000). Hydraulics of Pressurized Flow. In: MAYS, L. W. (ed): Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill, USA, p. 2.1-2.43.
- Liu, M. B.; Liu, G. R.; Lam, K. Y. (2002). Investigations into water mitigations using a meshless particle method. Shock Waves, 12(3). 181-195 p.
- Liu, G. R., Liu, M. B. (2003). Smoothed Particle Hydrodynamics: A MeshfreeParticle Method. Singapura: World Scientific Publishing CO Pte Ltd.
- Liu, G. R.; Liu, M. B. (2010). Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments. Archives of Computational Methods in Engineering, v. 17, p. 25-76.
- Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astronomical Journal, 82 (12). 1013-1024 p.
- Martins, N. M. C., Soares, A. K., Ramos, H. M., Covas, D. I. C. (2016). CFD modelling of transient flow in pressurized pipes. Computers & Fluids, 126, 129–140.
- Monaghan, J. J., Gingold, R. A. (1983). Shock simulation by the particle method SPH. Journal of Computational Physics, 52(2), 374-389.
- Monaghan, J. J.; Lattanzio, J. C. (1985). A refined particle method for astrophysical problems. Astron. Astrophys., 149. 135–143 p.
- Monaghan, J. J. (1997). SPH and Riemann Solvers. Journal of Computational Physics, 136(2), 298-307.
- Morimoto, L. (2023). Análise de um sistema de bombeamento durante escoamento em regime transiente: Estudo de caso elevatória Mestre D'Armas. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p.
- Pan, T., Zhou, L., Ou, C., Wang, P., & Liu, D. (2022). Smoothed particle hydrodynamics with unsteady friction model for water hammer pipe flow. Journal of Hydraulic Engineering, 148(2), 04021057.

- Riasi, A.; Tazraei, P. (2017). Numerical Analysis of the Hydraulic Transient Response in the Presence of Surge Tanks and Relief Valves. *Journal Renewable Energy*, p. 138-146.
- SGPAM – Saint-Gobain. Válvula de retenção tipo portinhola emborrachada, posição a 35°, DN 50 a 700. Disponível em: www.sgpam.com.br. Acesso em: 10 novembro de 2025.
- SGPAM – Saint-Gobain. Ventosa tríplice função, DN 50 a 200. Disponível em: www.sgpam.com.br. Acesso em: 10 novembro de 2025.
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation for irregularly-spaced data function. *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference* (pp. 517-524). ACM.
- Soares, A. K. (2007). *Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento transitório*. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Soares, A. K., Martins, N. M. C., & Covas, D. I. C. (2017). Transient vaporous cavitation in a horizontal copper pipe. *Journal of Hydraulic Research*, 55(5), 731–736.
- Swamee, P. K. (1993). Design of a Submarine Pipeline. *Journal of Transportation Engineering*, v. 119, n.1. 159-170 p
- Trikha, A. K. (1975). “An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow”. *Journal of Fluids Engineering*, v. 97, n. 1, p. 97-105.
- Tsutiya, M. T. (2014). *Abastecimento de água*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 4ª Edição, São Paulo.
- Vardy, A. E.; Hwang, K. L.; Brown, J. M. B. (1993). “A Weighting Function Model of Transient Turbulent Pipe Friction”. *Journal of Hydraulic Research*, v. 31, n. 4, p. 533-548.
- Violeau, D., & Rogers, B. D. (2016). Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for free-surface flows: past, present and future. *Journal of Hydraulic Research*, 54(1), 1–26.
- Wang, C.; Nilsson, H.; Yang, J.; Petit, O. (2017). 1D–3D Coupling for Hydraulic System Transient Simulations. *Journal Computer Physics Communications*, 210, p. 1-9.
- Weston, S. L.; Collins, R. P.; Boxall, J. B. (2021). An experimental study of how hydraulic transients cause mobilization of material within drinking water distribution systems. *Journal Water Research*, 194, 116890.
- Wylie, E.B.; Streeter, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, New Jersey.
- Youssef, L. E. M. (2021). *Avaliação do Comportamento de um Reservatório Hidropneumático durante Transitório Hidráulico em Sistema de Bombeamento*.

Estudo de Caso da EAT Mestre D'Armas. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Zhang, C., Zhu, Yj., & Wu, D. (2022). Smoothed particle hydrodynamics: Methodology development and recent achievement. *Journal of Hydrodynamics*, 34(5), 767-805.

Zhao, M., & Ghidaoui, M. S. (2004). Godunov-type solutions for water hammer flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(4), 341-348.

Zielke, W. (1968). "Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow". *Journal of Basic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers 90, 109–115.