

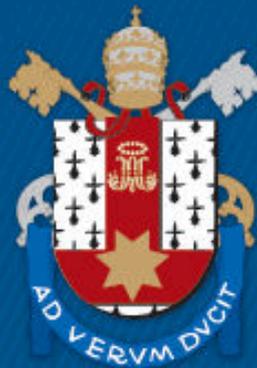
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE  
MATERIAIS  
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

FILIPPI DAMASCENO VIANNA

**FEIÇÕES ESPAÇO-TEMPORAIS EM CORRENTES DE GRAVIDADE  
USANDO MÉTODOS DE VISÃO COMPUTACIONAL**

Porto Alegre  
2021

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



# FEIÇÕES ESPAÇO-TEMPORAIS EM CORRENTES DE GRAVIDADE USANDO MÉTODOS DE VISÃO COMPUTACIONAL

**FILIPPI DAMASCENO VIANNA**

GRADUADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO  
MESTRADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. JORGE HUGO SILVESTRINI

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. MÁRCIO SARROGLIA PINHO

Proposta de Tese realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

*Trabalho vinculado ao projeto "Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Processos Sedimentares com Foco em Correntes de Densidade - SINAPSE". Cooperação Instituição/Empresa com recursos da Petrobras S.A.*

**Porto Alegre  
Julho de 2021**

## Ficha Catalográfica

V617f Vianna, Filipi Damasceno

Feições Espaço-Temporais Em Correntes De Gravidade Usando Métodos De Visão Computacional / Filipi Damasceno Vianna. – 2021.  
106.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Hugo Silvestrini.

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Sarroglia Pinho.

1. Correntes de Gravidade. 2. Estruturas de Lobos e Fendas. 3. Métodos de Visão Computacional. 4. Rastreamento de Pontos Característicos. I. Silvestrini, Jorge Hugo. II. Pinho, Márcio Sarroglia. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



**FEIÇÕES ESPAÇOTEMPORAIS EM CORRENTES DE  
GRAVIDADE USANDO MÉTODOS DE VISÃO  
COMPUTACIONAL**

**CANDIDATO: FILIPI DAMASCENO VIANNA**

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

---

**DR. JORGE HUGO SILVESTRINI - ORIENTADOR**

---

**DR. MARCIO SARROGLIA PINHO - COORIENTADOR**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**DR. CLÉBER GIMENEZ CORRÊA - PPGI - UTFPR**

---

**DR. RAFAEL MANICA - INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - UFRGS**

---

**DR. RUBEM MÁRIO FIGUEIRÓ VARGAS - DO PGETEMA - PUCRS**

*Para Miriam, minha amada esposa, Gustavo e Antônio, meus queridos filhos. Dedico este trabalho a minha família, sem seu apoio e compreensão ele não seria possível.*



# Agradecimentos

Este trabalho não é o fim de uma jornada, e sim mais um degrau a ser vencido na escalada para o conhecimento. Um degrau bastante alto, que sem o apoio de muitas pessoas seria impossível de ser escalado. Eu gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a muitas das pessoas que apoiaram direta ou indiretamente a minha jornada. Em primeiro lugar a minha esposa Miriam, que me incentivou sempre, aos meus filhos Gustavo e Antônio pela sua paciência nestes anos de estudos. Aos meus pais Ernesto e Neuci, por todo seu investimento em minha formação tanto técnica quanto moral.

Durante os anos de estudos, o apoio para a conclusão desta tese veio de muitas fontes, temendo esquecer mencionar alguém, peço desculpas caso alguém deixe de ser nomeado. Devo agradecer a todos aqueles que, graças a sua compreensão, tornaram possível a conclusão deste trabalho. Do IDEIA, Centro de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico da PUCRS, agradeço aos colegas Arno Steiger, Cíntia Palacios, Eduardo Grigolo, Eduardo Pereira, Henrique Bosenbecker, Luis Nunes, Rafael Bellé e em especial ao incentivo dos diretores, Carlos Nelson dos Reis e Eduardo Giugliani. Na Escola Politécnica da PUCRS, minha sincera gratidão aos professores Rubem Reis, Sandra Einloft, Sérgio Boscato Garcia, Carlos Alexandre dos Santos e em especial ao professor Márcio Sarroglia Pinho que coorientou este trabalho.

Esta Tese se desenvolveu no Laboratório de Simulação de Escoamentos Turbulentos (LaSET), na Escola Politécnica da PUCRS, no projeto de pesquisa SINAPSE<sup>1</sup>, em uma cooperação Instituição/Empresa com recursos da Petrobras S.A. Sou grato a toda a equipe do LaSET, que contribuiu de maneira significativa em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho, em especial ao nosso coordenador, Prof. Jorge H. Silvestrini. Agradeço também aos colegas e amigos Bruno Farenzena, Karine Ruschel, Felipe Schuch e Ricardo Frantz.

Todos os recursos computacionais foram providos pelo Laboratório de Alto Desempenho (LAD), da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

---

<sup>1</sup> Modelagem matemática e simulação numérica de processos sedimentares com foco em correntes de densidade (SINAPSE). Termo de Cooperação N.º 5900.0110995.19.9., de Julho de 2019 até o momento.



“Todo o aprender, todo o melhorar, todo o viver é mudar.”

Rui Barbosa



# Resumo

VIANNA, Filipi Damasceno Vianna. **FEIÇÕES ESPAÇO-TEMPORAIS EM CORRENTES DE GRAVIDADE USANDO MÉTODOS DE VISÃO COMPUTACIONAL**. Porto Alegre. 2021. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Estudos experimentais em correntes de gravidade identificaram correlações entre as estruturas visualmente percebidas na porção frontal deste tipo de corrente e os parâmetros relacionados a sua velocidade e turbulência. Desde então estas correlações vêm sendo utilizadas por pesquisadores que estudam esse fenômeno. Em trabalhos mais recentes com simulações numéricas estas correlações continuam sendo validadas para vários parâmetros do escoamento e para maiores velocidades da frente da corrente. Na maioria dos trabalhos relacionados às medidas na frente da corrente de gravidade dependem de imagens da frente para realizarem suas análises e estabelecer correlações. Além disso, avanços em um campo interdisciplinar associado à ciência da computação conhecido como visão computacional traz novas ferramentas para as análises de experimentos com correntes de gravidade. A visão computacional se dedica ao estudo de como imagens digitais podem ser analisadas, como estes resultados podem ser automatizados e qual a exatidão destas análises automáticas. Este trabalho avalia o uso dos algoritmos de visão computacional, utilizados em detecção de cantos e no cálculo do fluxo óptico, para analisar experimentos de correntes de gravidade. Objetivando o acompanhamento automático das estruturas de lobos e fendas nestas correntes, são desenvolvidas duas abordagens, uma combinando detecção de cantos e fluxo óptico e outra combinando detecção de mínimos locais e fluxo óptico. Para determinar a exatidão da técnica proposta é estabelecido um método adotado como referência. Este método é aplicado em conjuntos de dados resultantes de simulações numéricas. A técnica utilizada para rastrear as estruturas apresentou resultados promissores, especialmente em escoamentos com altos números de Reynolds. A abordagem que utilizava detecção de cantos obteve uma exatidão de 50% no conjunto de dados com número de Reynolds global  $Re = 3450$  e 72% com  $Re = 8950$  enquanto a abordagem utilizando detecção de mínimos locais obteve uma exatidão de 100% para ambos os casos.

**Palavras-chave:** Correntes de gravidade; Estruturas de lobos e fendas; Métodos de visão computacional; Rastreamento de pontos característicos.



# Abstract

VIANNA, Filipi Damasceno Vianna. **SPATIOTEMPORAL FLOW FEATURES IN GRAVITY CURRENTS USING COMPUTER VISION METHODS**. Porto Alegre. 2020. PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Previous experimental studies on the characterization of gravity currents verified correlations between the features visually identified at the current flow front and the parameters related to its velocity and turbulence. Researches on gravity currents have used these correlations ever since. And, in more recent works using numerical simulations, these correlations continue to be validated for various flow parameters at higher front velocities. The majority of the works related to measurements at a gravity current front rely on the front images for making its analysis and establishing its correlations. Besides that, there is a field of Computer Science called Computer Vision devoted to studying how digital images can be analyzed, how its results can be automated, and what is the accuracy of these automated analyses. This work describes the use of Computer Vision algorithms, particularly corner detection and optical flow, to automatically track features at the gravity current fronts, either from physical or numerical experiments. In order to determine the accuracy of the proposed approach, we establish a ground-truth method and apply it to data sets of the numerical simulation results. The technique used to trace the front features along the flow showed promising results, especially in flows with a higher Reynolds number.

**Keywords:** Gravity currents; Lobe and cleft; Computer vision methods; Feature point tracking.



# Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Renderização volumétrica dos resultados da simulação numérica de uma corrente de gravidade. A renderização volumétrica é um recurso disponível em softwares de visualização científica e está representando as flutuações normalizadas do campo de massa específica onde cada intervalo da grade corresponde a uma unidade de comprimento ( $Re = 3450$ , instante de tempo $t = 20$ ). . . . .	31
Figura 1.2 – Exemplos de correntes de gravidade percebidos na natureza em diversos ambientes, como uma tempestade de areia (a), uma avalanche (b), um fluxo piroclástico de uma erupção vulcânica (c), ou uma corrente de turbidez representada em (d). Fonte: Press (2018), SCULLAND (2019), Observatory (2017) e Wired.com (2011), respectivamente. . .	32
Figura 1.3 – Visualização da evolução da frente de uma corrente de gravidade obtida a partir de um experimento onde as fendas foram marcadas e acompanhadas manualmente. O intervalo de tempo é de 0,5 segundos e a escala está em mm, $\Delta\rho/\rho = 1\%$ . Fonte: Simpson (1972). . . .	33
Figura 1.4 – Sobreposição das figuras de Espath et al. (2015) ilustrando a coincidência do caminho das fendas com reentrâncias no mapa do depósito de sedimentos. Fonte: Adaptado de Espath et al. (2015). . . . .	34
Figura 1.5 – Imagem de satélite de sedimentos e fitoplâncton em suspensão na Lagoa dos Patos em Maio de 2018 (a). Experimento em tanque de 10 m $\times$ 6 m $\times$ 1 m (b). Imagem aérea em infravermelho na foz do Rio Merrimack mostrando uma corrente de gravidade onde a diferença de densidade se deve a diferença de temperatura da corrente (c). Lama proveniente da barragem de Mariana na foz do Rio Doce (d). Fonte: Feldman (2018), (LUTHI, 1981), Horner-Devine e Chickadel (2017) e Varejão (2015), respectivamente. . . . .	35
Figura 1.6 – Pontos característicos, $P_1, P_2, P_3, P_4$ , etc (a) e seus movimentos são convertidos em vetores de velocidade (b); em (c) é visto uma única imagem do corredor e em (d) são traçados os vetores de movimento conforme a câmera se move pelo corredor (imagens originais de Jean-Yves Bouguet). Fonte: Bradski e Kaehler (2000). . . . .	36
Figura 1.7 – Fluxo óptico utilizado para acompanhar o movimento de um veículo em uma via, mostrados nas imagens em diferentes instantes de tempo (a, b, c, d). Fonte: Parrilla et al. (2008). . . . .	37
Figura 3.1 – Corrente de gravidade formada pela nuvem de detritos gerada pela implosão de torres de arrefecimento. Fonte: freepressjournal.in (2021).	42

Figura 3.2 – Exemplo dos mecanismos de iniciação de correntes de gravidade: <i>remobilização instantânea de material</i> (a) e <i>remobilização não-instantânea de material</i> (b). . . . .	42
Figura 3.3 – Classificação de correntes de gravidade em relação à $\Delta\rho$ : escoamento homopical (a), escoamento mesopical (b), escoamento hipopical (c), escoamento hiperpical (d). Fonte: Adaptado de Mulder e Alexander (2001). . . . .	43
Figura 3.4 – Diferentes configurações do arranjo <i>lock-release</i> em correntes de gravidade hiperpicais: configuração canalizada, condição inicial (a) e início do escoamento (b); configuração canal-bacia, condição inicial (c) e início do escoamento (d); configuração axi-simétrica, condição inicial (e) e início do escoamento (f). . . . .	45
Figura 3.5 – Exemplo das regiões e estruturas presentes em uma corrente de gravidade hiperpical. . . . .	46
Figura 3.6 – Correntes de turbidez. Fonte: Grotzinger et al. (2010). . . . .	47
Figura 3.7 – A imagem mostra as visualizações das estruturas da frente obtidas pelos estudos de Espath et al. (2015) a partir dos planos $(x_1, x_2)$ e $(x_1, x_3)$ juntamente com o traçado manual do caminho das fendas a partir de uma iso-superfície do critério-Q com um iso-valor igual a 1 para $t = 8$ (esquerda) e $t = 14$ (direita). De cima para baixo, $Re = 2.236$ com $u_s = 0,04; 0,03; 0,02$ ; $Re = 5.000$ e $Re = 10.000$ com $u_s = 0,02$ . Fonte: Espath et al. (2015). . . . .	49
Figura 3.8 – Ilustração de como os caminhos das fendas para os casos de números de Reynolds $Re = 2.236$ e $Re = 10.000$ evoluem. O círculo preto indica uma instabilidade espinha de peixe. Fonte: Espath et al. (2015). . . . .	50
Figura 3.9 – Diagrama esquemático do fluxo médio relativo a cabeça da corrente de gravidade incitando os comprimentos característicos $\lambda_n$ (a) e as alturas da cabeça e do nariz da corrente: $\tilde{h}_{\text{head}}$ e $\tilde{h}_{\text{nose}}$ , respectivamente (b). Fonte: Adaptado de Simpson (1972). . . . .	51
Figura 3.10–(a) Velocidade da frente em função do tempo para os trabalhos de Cantero et al. (2007b), Huppert e Simpson (1980), Marino et al. (2005), Houtl (1972), Huppert (1982). (b) A relação entre o comprimento característico em função do número de Reynolds da frente de corrente de gravidade para as simulações de Cantero et al. (2007b) juntamente com a lei de estala de Simpson (1972). Fonte: Cantero et al. (2007b) . . . . .	52
Figura 3.11–Esquema da corrente de gravidade mostrando suas principais características e a nomenclatura utilizada pelos autores. Fonte: Cantero et al. (2007a) . . . . .	52

Figura 3.12–Ilustração da localização da frente da corrente de gravidade ao longo do tempo. Visualização para contornos no fundo do escoamento para uma massa específica $\Delta\rho = 0,015$ . A separação de tempo entre os contornos é de $t = 0,354$ . (a) $Re = 3450$ , e (b) $Re = 8950$ . Fonte: Cantero et al. (2007a) . . . . .	53
Figura 3.13–Impressão das isolinhas de concentração para diferentes passos de tempo para três simulações na configuração canal-bacia. (a) uma DNS configuração de domínio fechado; (b) DNS em configuração de domínio aberto; LES em configuração de domínio aberto. Adaptado de Frantz et al. (2017) e Francisco et al. (2018). . . . .	54
Figura 3.14–Técnica utilizada por Neufeld (2002). Fonte: Neufeld (2002). . . . .	54
Figura 3.15–Resultados da detecção automática de fendas de Neufeld (2002). Os pontos vermelhos indicam as fendas. Fonte: Adaptado de Neufeld (2002). . . . .	55
Figura 3.16–(a) Imagem em infravermelho da pluma inteira no Rio Merrimack vista a oeste a partir do mar. A imagem foi obtida 1 hora depois da maré alta do dia 7 de maio de 2010. Imagens da frente da pluma (b) a distância (altura da imagem equivale a 2km) e (c) uma ampliação. A imagem na Figura 3.16c foi geo-retificada e os eixos são relativos a uma origem fixa arbitrária a oeste da frente. Tons mais claros correspondem a água da pluma que estava a aproximadamente $4^{\circ}C$ mais quente que o oceano. (d) Uma série de tempos de 90s dos contornos frontais extraídos da sequência de imagens em infravermelho. Os pontos vermelhos correspondem as fendas localizadas com um algoritmo baseado em curvatura. Fonte: Adaptado de Horner-Devine e Chickadel (2017). . . . .	56
Figura 3.17–a) Mapeamento do contorno. O movimento em todas as figuras é da esquerda para a direita. b) Curvatura referente a posição da frente do primeiro experimento. Preto corresponde às curvaturas menores que -2 (pixels invertidos), branco às maiores que +2, e a intensidade é linear entre estes valores. c) Posição das fendas sobrepostas a imagem da curvatura. Fonte: McElwaine et al. (2004). . . . .	57
Figura 3.18–Imagem de teste (a) na qual é aplicado um algoritmo de detecção de contornos e os contornos resultantes (b) que podem ser de 2 tipos, contornos externos (tracejados) e buracos (pontilhados). Fonte: Bradski e Kaehler (2008). . . . .	59
Figura 3.19–Os três primeiros quadros de uma animação resultante da extração das linhas de frente individuais da Figura 1.3, proveniente do experimento de Simpson (1972). . . . .	60

Figura 3.20–De acordo com a magnitude dos autovalores pode-se avaliar se uma região analisada é plana (ambos autovalores são pequenos), borda ( $\chi_1$ é pequeno e $\chi_2$ é grande ou vice-e-versa) ou canto quando ambos os autovalores são grandes. . . . .	62
Figura 3.21–Através das aberturas 1 e 3 apenas movimentos perpendiculares (vetor normal) das bordas do quadrado podem ser estimados devido a falta de estrutura local. Dentro da abertura 2, no ponto de canto, o movimento pode ser completamente medido uma vez que há estrutura local o suficiente; ambos os movimentos perpendiculares são visíveis. Fonte: adaptado de Beauchemin e Barron (1995). . . . .	63
Figura 3.22–Funções unidimensionais $F(x)$ , $G(x)$ e o deslocamento $d$ . Adaptado de Beauchemin e Barron (1995). . . . .	65
Figura 3.23–Fluxograma do rastreador de características implementado para rastrear fendas. Fonte: Suhr (2009). . . . .	67
Figura 4.1 – Resultado da aplicação do detector de cantos de Shi-Tomasi nos dados obtidos da Figura 1.3 que ilustra o experimento de Simpson (1972). Os cantos foram marcados com cores aleatoriamente diferentes para evidenciar a distinção entre cantos próximos . . . . .	70
Figura 4.2 – Fendas marcadas usando detecção de cantos, obtidas usando o mesmo protótipo com os dados extraídos da ilustração original de Neufeld (2002) (mostrada na figura 3.15). Os pontos vermelhos marcam as fendas. Fonte: Adaptado de Neufeld (2002). . . . .	70
Figura 4.3 – Visualização esquemática da condição inicial de uma corrente de gravidade na configuração <i>lock-release</i> . . . . .	71
Figura 4.4 – Exemplo da determinação da largura de lobos a partir de uma isolinha de concentração no plano $(x_1, x_3)$ localizado no fundo do canal $(x_2 = 0)$ para um instante de tempo dado. Fonte: Farenzena (2020) . . . . .	74
Figura 4.5 – As linhas de contorno da frente da corrente de gravidade são extraídas de figuras em formato vetorial disponibilizadas nos trabalhos de Cantero et al. (2007a), Frantz et al. (2017) e Francisco et al. (2018). . . . .	76
Figura 4.6 – Fluxograma do rastreador de características implementado para rastrear fendas indicando onde o método de detecção de pontos característicos é alterado para cada uma das abordagens. Fonte: Adaptado de Suhr (2009). . . . .	77
Figura 5.1 – Representação volumétrica do campo de concentração para os casos LR895 (a) e (b), LR3450 (c) e (d) LR8950 (e) e (f) no instante de tempo $t = 10$ (a), (c) e (e) e $t = 20$ (b), (d) e (f), onde cada intervalo espacial da grade corresponde a uma unidade de comprimento. . . . .	79

Figura 5.2 – Velocidade da frente em função do tempo da simulação realizada e os dados disponíveis em Cantero et al. (2007b) para $Re = 895$ (a), $Re = 3450$ (b) e $Re = 8950$ (c). . . . .	80
Figura 5.3 – Evolução temporal das isolinhas da projeção para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c). É adotado um isovalor de $\varphi_p = 10^{-2}$ para desenhar cada isolinha com um passo de tempo variável que corresponde uma variação constante da posição da frente de aproximadamente 0,15.	81
Figura 5.4 – Comparação entre o tamanho médio dos lobos em função no número de Reynolds da frente dos casos de simulação LR3450 e LR8950 com a Eq. (4.7). Resultados obtidos com ferramentas de análise de sinais.	82
Figura 5.5 – Rastros das fendas para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).	83
Figura 5.6 – Rastros das fendas sobrepostos no registro da evolução temporal da projeção das isolinhas de concentração para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c). . . . .	83
Figura 5.7 – Estruturas do tipo espinha de peixe observadas na imagem resultante do algoritmo proposto para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).	84
Figura 5.8 – Tamanho médio dos lobos como função do número de Reynolds da frente para os casos simulados LR3450 (a) e LR8950 (b), comparando com os resultados obtidos das ferramentas de processamento de sinais com os métodos de visão computacional e a Eq. (4.7). . . . .	84
Figura 5.9 – Detalhes indicando classificações incorretas para a detecção e rastreamento de alguns pontos característicos. . . . .	85
Figura 5.10–Resultados obtidos utilizando a detecção de cantos como mecanismo de identificação dos pontos características para o caso axi-simétrica com número de Reynolds $Re = 8500$ . (a) Traçado da caminho das fendas sobreposto as isolinhas de concentração da figura de Cantero et al. (2007a). (b) Apenas o traçado das fendas. . . . .	86
Figura 5.11–Resultados obtidos utilizando a detecção de cantos como mecanismo de identificação dos pontos características para o caso canal-bacia com número de Reynolds $Re = 5000$ . (a) Traçado da caminho das fendas sobreposto as isolinhas de concentração da figura de Frantz et al. (2017). (b) Apenas o traçado das fendas. . . . .	87
Figura 5.12–Rastros das fendas para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).	87
Figura 5.13–Rastros das fendas sobrepostos no registro da evolução temporal da projeção das isolinhas de concentração para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c). . . . .	88
Figura 5.14–Detalhes indicando a convergência das fendas em estruturas estilo espinha de peixe, para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c). . . .	88

Figura 5.15–Tamanho médio dos lobos como função do número de Reynolds da frente para os casos simulados LR3450 (a) e LR8950 (b), comparando com os resultados obtidos das ferramentas de processamento de sinais com o método que combina processamento de sinais e fluxo óptico e a Eq. (4.7). . . . .	89
Figura 5.16–Resultados apresentados pelos métodos desenvolvidos para o caso de $Re = 3450$ . (a) Fendas detectadas utilizando mínimos locais com o respectivo caminho sobreposto às isolinhas de concentração. (b) Apenas as linhas dos caminhos para a abordagem que utiliza mínimos locais. (c) Caminhos das fendas identificadas por detecção de cantos sobrepostos às isolinhas de concentração. (d) Apenas as linhas dos caminhos detectados pela abordagem de detecção de cantos. . . . .	90
Figura 5.17–Resultados apresentados pelos métodos desenvolvidos para o caso de $Re = 8950$ . (a) Fendas detectadas utilizando mínimos locais com o respectivo caminho sobreposto às isolinhas de concentração. (b) Apenas as linhas dos caminhos para a abordagem que utiliza mínimos locais. (c) Caminhos das fendas identificadas por detecção de cantos sobrepostos às isolinhas de concentração. (d) Apenas as linhas dos caminhos detectados pela abordagem de detecção de cantos. . . . .	91
Figura 5.18–Detalhes indicando a convergência das fendas formando estruturas estilo espinha de peixe utilizando a abordagem KLT para os casos LR3450 (a) e LR8950 (b) com a abordagem que localiza as fendas por meio dos mínimos locais para os casos LR3450 (c) e LR8950 (d). . . . .	92
Figura 5.19–Classificações incorretas (falsos positivos), indicadas manualmente ao se aplicar a abordagem KLT para os casos LR3450 (a) e LR8950 (b). . . . .	93
Figura 5.20–Classificações incorretas (falsos positivos), indicadas manualmente ao se aplicar a nova abordagem utilizando mínimos locais para os casos LR3450 (a) e LR8950 (b). . . . .	94

# Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros numéricos. Todas as simulações têm $L_1 = 25$ , $L_{1,b} = 1$ , $L_2 = 1$ , $L_3 = 4$ e $Sc = 1$ . . . . .	73
---	----



# Lista de abreviaturas e siglas

h.o.t.	Termos de alta ordem (high order terms)
LK	Lucas-Kanade
ST	Shi-Tomasi
KLT	Kanade Lucas Tomasi
DNS	Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation)
LES	Simulação de Grandes Escalas (Large Eddy Simulation)
RAM	Memória volátil de acesso aleatório



# Lista de símbolos

$\tilde{g}$	Aceleração da gravidade $[L][T]^{-2}$
$\tilde{h}_{\text{head}}$	Altura da cabeça da frente da corrente de gravidade [L]
$\tilde{H}$	Altura da coluna de fluido com acréscimo de massa específica [L]
$\tilde{h}_B$	Altura do corpo da frente da corrente de gravidade [L]
$\tilde{h}_{\text{nose}}$	Altura do nariz da frente da corrente de gravidade [L]
$\bar{h}_H$	Altura média da cabeça da frente da corrente de gravidade [L]
$\tilde{S}_1$	Área da seção longitudinal da corrente de gravidade na configuração axi-simétrica $[L]^2$
$\tilde{S}_2$	Área da seção azimutal da corrente de gravidade na configuração axi-simétrica $[L]^2$
$\tilde{A}$	Área da seção longitudinal do escoamento $[L]^2$
$\Delta\rho$	Diferença entre a massa específica da corrente de gravidade e a massa específica do fluido ambiente $[M][L]^{-3}$
$\tilde{\lambda}$	Largura de estrutura de lobos e fendas [L]
$\bar{\lambda}$	Largura média das estruturas de lobos e fendas [L]
$\rho_1$	Massa específica da corrente de gravidade $[M][L]^{-3}$
$\rho_0$	Massa específica do fluido ambiente $[M][L]^{-3}$
$\tilde{x}_f$	Posição da frente da corrente de gravidade [L]
$\tilde{r}_0$	Raio inicial da corrente de gravidade [L]
$\tilde{r}_F$	Raio da frente da corrente de gravidade [L]
$\tilde{u}_b$	Velocidade de flutuação $[L][T]^{-1}$
$\tilde{u}_f$	Velocidade da frente da corrente de gravidade $[L][T]^{-1}$
$\bar{u}_F$	Velocidade média da frente da corrente de gravidade $[L][T]^{-1}$
$e_2$	Vetor unitário na direção vertical
$\tilde{\nu}$	Viscosidade cinemática $[L]^2[T]^{-1}$

$\tilde{V}$	Volume de fluido [L] <sup>3</sup>
$\chi_i$	Autovalores da matriz M
$\chi_{min}$	Autovalor mínimo
$u_i$	Campo de velocidades
$L_1$	Comprimento do domínio computacional na direção de propagação do escoamento
$L_2$	Comprimento do domínio computacional na direção vertical
$L_3$	Comprimento do domínio computacional na direção perpendicular a propagação do escoamento
$x$	Comprimento do domínio computacional para a configuração axi-simétrica
$L_{1,b}$	Comprimento inicial da corrente de gravidade
$\varphi$	Concentração escalar ( $\Delta\rho/\rho$ )
$k$	Constante de ajuste para a pontuação da detecção de cantos
$d$	Deslocamento entre funções unidimensionais
$E$	Diferença de intensidade de imagem para um deslocamento
$x_i$	Espaço de coordenadas
$E_{LK}$	Função de erro de Lucas-Kanade
$w$	Função de janela de imagem
$F$	Função unidimensional
$G$	Função unidimensional deslocada
$I$	Intensidade de imagem
$y$	Largura do domínio computacional para a configuração axi-simétrica
<b>M</b>	Matriz de deslocamento de imagem
$n_1$	Número de pontos da malha de cálculo na direção de propagação do escoamento
$n_2$	Número de pontos da malha de cálculo na direção vertical
$n_3$	Número de pontos da malha de cálculo na direção perpendicular a propagação do escoamento

$Re$	Número de Reynolds
$Re_{\text{head}}$	Número de Reynolds da cabeça da corrente de gravidade
$Sc$	Número de Schmidt
$\sigma$	Parâmetro arbitrário utilizado para ajuste em detecção de cantos
$\Delta t$	Passo de tempo
$P_i$	Pontos característicos detectados em imagens
$R$	Pontuação utilizada para avaliação da detecção de um canto em uma imagem
$R_{ST}$	Pontuação utilizada para avaliação da detecção de um canto em uma imagem pelo método de Shi-Tomasi
$p$	Pressão
$\Omega$	Região de interesse em uma imagem
$t$	Tempo
$v_i$	Velocidade do fluxo óptico



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>39</b>
2.1	Objetivos específicos	39
<b>3</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>41</b>
3.1	Correntes de gravidade	41
3.1.1	A configuração <i>Lock-release</i>	44
3.1.2	A anatomia de uma corrente de gravidade e as estruturas de lobos e fendas	46
3.1.3	Correntes de turbidez e o caminho das fendas	46
3.1.4	Comprimentos Característicos em função do número de Reynolds da cabeça da corrente	50
3.2	Outras configurações, Axi-simétrica e Canal-Bacia	52
3.3	Automação da detecção das estruturas de lobos e fendas	53
3.4	Visão Computacional	57
3.4.1	Detecção de contornos	58
3.4.2	Detecção de cantos	59
3.4.3	Fluxo Óptico	62
3.4.4	Problema da abertura	63
3.4.5	Abordagens de Fluxo Óptico	63
3.4.6	Método de Lucas-Kanade	64
3.4.7	Combinando Fluxo Óptico e Detecção de Cantos (KLT)	66
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>69</b>
4.1	Primeiros testes	69
4.2	Obtenção de dados	70
4.2.1	Simulações realizadas	71
4.2.2	Determinação das largura das estruturas de lobos e fendas	74
4.2.3	Obtendo dados em outras configurações de <i>lock-release</i>	75
4.3	Aplicando os algoritmos nos dados	75
4.3.1	Biblioteca de visão computacional OpenCV	78
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>79</b>
5.1	Simulações Numéricas	79
5.2	Métodos de Visão Computacional	81
5.3	Avaliando a Abordagem de Detecção de Cantos e Fluxo Óptico	82
5.4	Avaliando a Abordagem de Mínimos locais e Fluxo Óptico	86
5.5	Configuração Axi-simétrica	89
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>95</b>

<b>7 Proposta para trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>Referências . . . . .</b>	<b>99</b>

# 1 Introdução

A análise de dados provenientes de fenômenos físicos simulados, normalmente envolve alguma representação gráfica das variáveis obtidas como resultados das simulações. Grandezas como temperatura, massa específica, velocidade, entre outras, podem ser representadas de diferentes maneiras, incluindo imagens e sequências de imagens. Pesquisadores estudando esses fenômenos usam softwares de visualização científica para ajudar a dar sentido e permitir uma interpretação correta da grande quantidade de dados gerados pelas simulações (Figura 1.1). Em muitos casos, essas ferramentas geram novas imagens representando aspectos do escoamento analisado, e tais imagens também podem ser analisadas para gerar conclusões científicas .

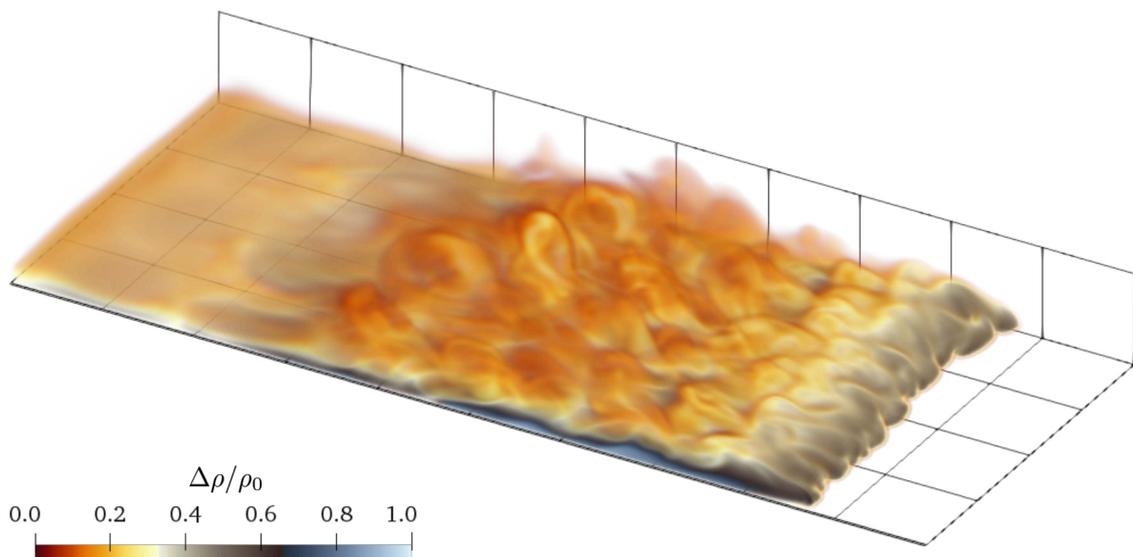


Figura 1.1 – Renderização volumétrica dos resultados da simulação numérica de uma corrente de gravidade. A renderização volumétrica é um recurso disponível em softwares de visualização científica e está representando as flutuações normalizadas do campo de massa específica onde cada intervalo da grade corresponde a uma unidade de comprimento ( $Re = 3450$ , instante de tempo  $t = 20$ ).

Dentre muitos tipos de fenômenos físicos são estudadas as correntes de gravidade. Estas correntes são escoamentos nos quais dois fluidos com massas específicas diferentes interagem guiados por um campo gravitacional resultando em um escoamento predominantemente horizontal (SIMPSON, 1999). Este escoamento pode ser causado pela diferença de massa específica, proveniente da diferença de temperatura, salinidade ou pela presença de sedimentos em suspensão. Existem muitos exemplos da ocorrência de correntes de gravidade na natureza, como uma tempestade de areia (Figura 1.2a),

avalanches (Figura 1.2b), o fluxo piroclástico de um vulcão em erupção (Figura 1.2c) ou correntes de turbidez no leito oceânico, representadas na (Figura 1.2d). Muitos destes fenômenos podem colocar em riscos as estruturas feitas pelo homem (KAYE et al., 2009; AL-HEMOUD et al., 2019; STEFANSKI; SIVAKUMAR, 2009).

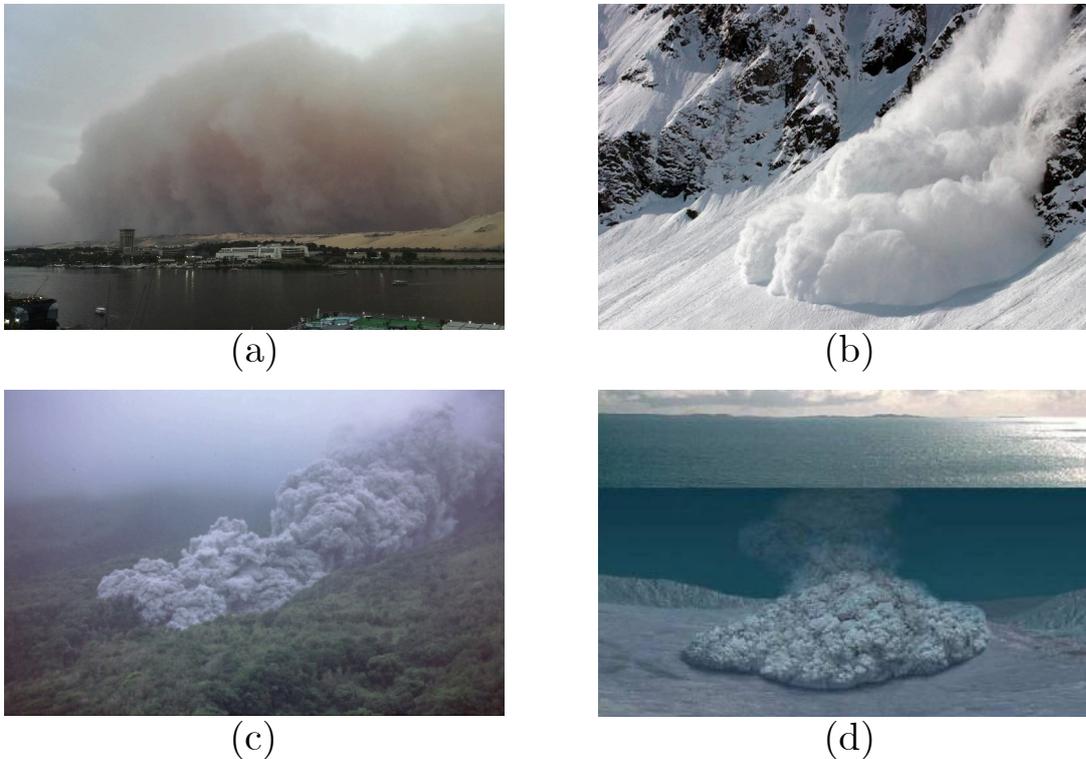


Figura 1.2 – Exemplos de correntes de gravidade percebidos na natureza em diversos ambientes, como uma tempestade de areia (a), uma avalanche (b), um fluxo piroclástico de uma erupção vulcânica (c), ou uma corrente de turbidez representada em (d). Fonte: Press (2018), SCULLAND (2019), Observatory (2017) e Wired.com (2011), respectivamente.

Em correntes gravitacionais, algumas características únicas, associadas com a região frontal das mesmas, podem ser percebidas quando observadas a partir de uma imagem da corrente projetada no fundo do escoamento. Um observador humano pode distinguir com facilidade essas características, denominadas estruturas de lobos e fendas (detalhadas na seção 3.1.2). Tais estruturas podem ser identificadas nas visualizações de simulações numéricas, modelos de simulação em laboratórios e em ocorrências naturais de correntes de gravidade.

Simpson (1972), com um arranjo experimental de canal confinado, fez o primeiro mapeamento manual da evolução da frente de uma corrente de gravidade marcando o traçado das fendas e acompanhando seu comportamento. Isto permitiu que ele pudesse medir a largura dos lobos e seu comportamento conforme a frente da corrente de gravidade se movia. Em virtude de limitações na tecnologia disponível na época, este experimento possuía uma taxa de aquisição de imagens alta o suficiente para registrar apenas

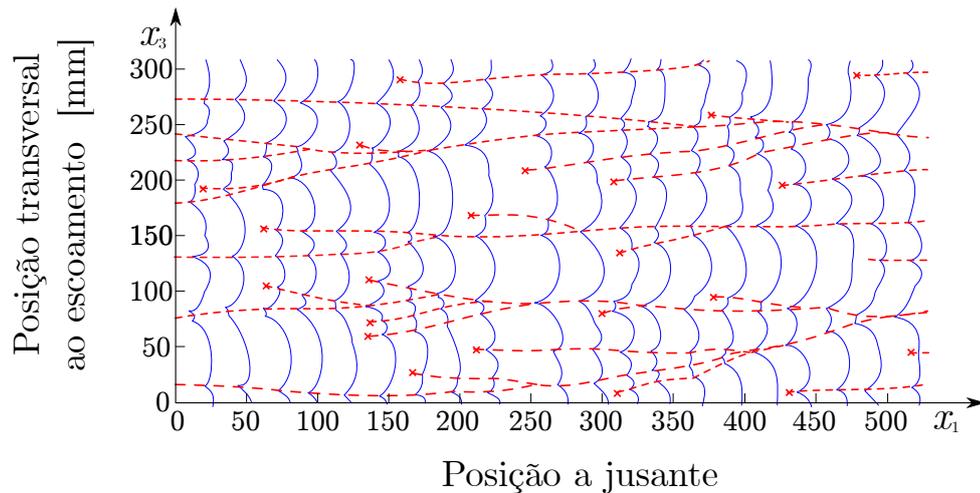


Figura 1.3 – Visualização da evolução da frente de uma corrente de gravidade obtida a partir de um experimento onde as fendas foram marcadas e acompanhadas manualmente. O intervalo de tempo é de 0,5 segundos e a escala está em mm,  $\Delta\rho/\rho = 1\%$ . Fonte: Simpson (1972).

20 posições da frente. Estes resultados experimentais tinham poucas frentes marcadas e poucas fendas para rastrear, permitindo um procedimento manual de marcação e traçado das fendas. A Figura 1.3 mostra uma visão superior esquemática do contorno da frente da corrente de gravidade a partir de fotos subsequentes tiradas a intervalos de tempo fixos, as fendas marcadas com  $\times$  e seus caminhos indicados com linhas tracejadas.

Uma das abordagens para simular correntes de gravidade é conhecida como *lock-release* (HACKER et al., 1996), detalhada neste trabalho na seção 3.1.1. Esta abordagem nos permite avaliar a frente da corrente de gravidade em função da direção transversal do escoamento. Assim, os mínimos locais ao longo da frente são fendas. Uma abordagem similar pode ser utilizada em diferentes configurações de *lock-release*, como a configuração cilíndrica. Nesta configuração, o perfil da frente poderia ser avaliado em função da direção azimutal e as fendas também poderiam ser obtidas pelos mínimos locais em coordenadas polares. Em ambos os casos, as posições das fendas podem ser localizadas.

A análise da evolução temporal das estruturas de lobos e fendas considera o quanto o tamanho dos lobos reduz, fazendo com que fendas se juntem, assim como o quanto os lobos crescem até um tamanho crítico em que um lobo se divide em dois, criando uma nova fenda entre eles (SIMPSON, 1972). O número de fendas associado com outros parâmetros físicos tais como velocidade de propagação da frente, a frequência das fendas e o tamanho dos lobos (NEUFELD, 2002) é fundamental para a correta avaliação do fenômeno. Além disso, Espath et al. (2015) correlacionaram o traçado do caminho das fendas com a topologia de depósitos gerados por sedimentos de correntes de turbidez. Tais depósitos também são correlacionados com a formação de reservatórios

de hidrocarbonetos (MEIBURG; KNELLER, 2010; SYVITSKI et al., 1996a). A Figura 1.4 mostra a sobreposição das figuras apresentadas pelos autores, ilustrando a coincidência do caminho das fendas com reentrâncias no mapa do depósito de sedimentos.

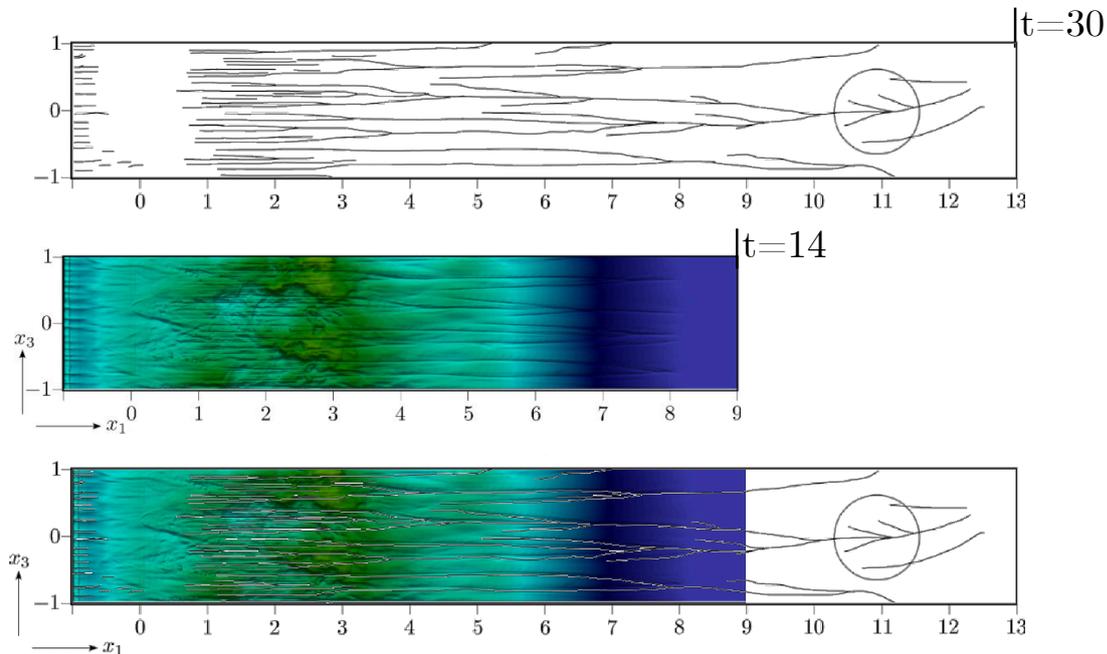


Figura 1.4 – Sobreposição das figuras de Espath et al. (2015) ilustrando a coincidência do caminho das fendas com reentrâncias no mapa do depósito de sedimentos. Fonte: Adaptado de Espath et al. (2015).

Assim como Simpson (1972), Espath et al. (2015) também traçaram manualmente o caminho das fendas. Entretanto, em experimentos mais recentes com taxas de amostragens maiores, comparadas com o experimento de Simpson (1972), possibilitando mais fendas para serem rastreadas, tornando sua marcação e traçado mais difícil. O mesmo acontece em simulações numéricas cujos resultados possibilitam a geração de imagens com uma quantidade maior de feições e taxas de amostragens ainda maiores.

O estudo das correntes de gravidade baseado em imagens se estende além de imagens de simulações de computador (ESPATH et al., 2015; CANTERO et al., 2007b; FARENZENA, 2020) ou imagens de canais relativamente pequenos com dimensões em torno de 500 mm de comprimento (SIMPSON, 1972; NEUFELD, 2002). Com a disponibilidade de imagens de satélites que possibilitam a visualização de sedimentos (Figura 1.5a), ou imagens aéreas como as do trabalho de Horner-Devine e Chickadel (2017) (Figura 1.5c) ou ainda as imagens de desastres naturais (Figura 1.5d), correntes de turbidez podem ser estudadas em escala real. Além de experimentos com tanques maiores como o de Luthi (1981) de 10 m × 6 m × 1 m (1.5b) permitem o estudo das características em um conjunto maior de escalas nas correntes de turbidez, isto é, as grandes escalas ficam maiores e é possível visualizar com detalhes as escalas menores.

Ao ser registrado em vídeo, o movimento da frente da corrente de gravidade pode

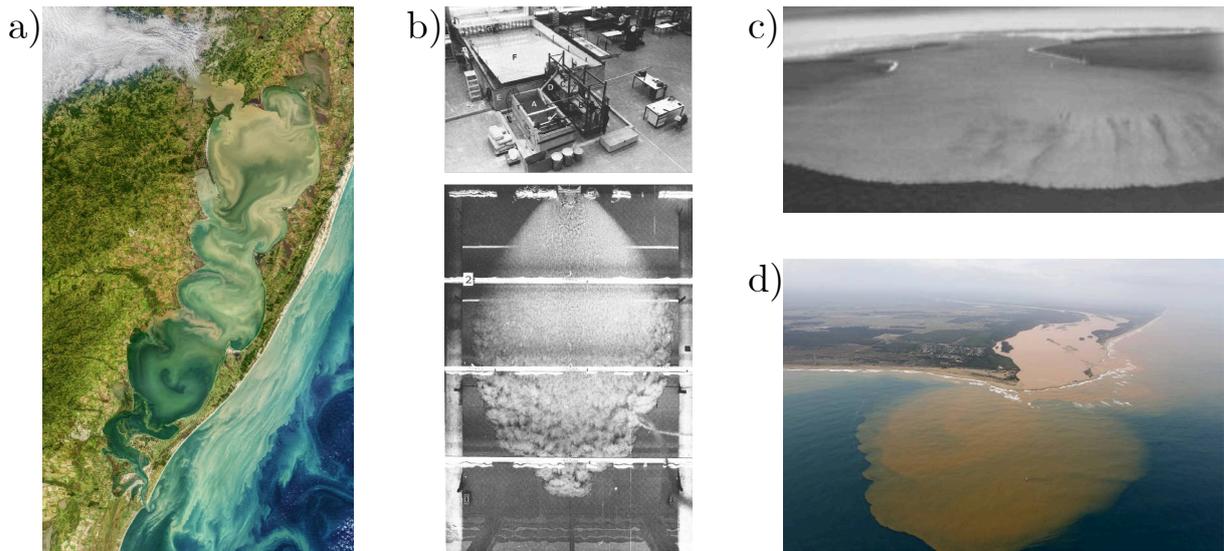


Figura 1.5 – Imagem de satélite de sedimentos e fitoplâncton em suspensão na Lagoa dos Patos em Maio de 2018 (a). Experimento em tanque de 10 m × 6 m × 1 m (b). Imagem aérea em infravermelho na foz do Rio Merrimack mostrando uma corrente de gravidade onde a diferença de densidade se deve a diferença de temperatura da corrente (c). Lama proveniente da barragem de Mariana na foz do Rio Doce (d). Fonte: [Feldman \(2018\)](#), ([LUTHI, 1981](#)), [Horner-Devine e Chickadel \(2017\)](#) e [Varejão \(2015\)](#), respectivamente.

ser representado por um conjunto sequencial de imagens diferentes umas das outras, passíveis de serem processadas por técnicas de visão computacional. Por meio destas técnicas, estruturas características, como os lobos e as fendas, podem ser detectadas e rastreadas entre as diferentes imagens. Desta forma, o problema do traçado das fendas ao longo do escoamento pode ser abordado algoritmicamente utilizando combinações de diferentes técnicas. Além disso, um algoritmo de uso geral, que possa ser utilizado tanto em imagens resultantes de simulações numéricas, registros fotográficos de experimentos de laboratórios de diferentes escalas, imagens aéreas ou de satélite, seria uma ferramenta valiosa para os estudos das correntes de gravidade, em particular as correntes de turbidez.

Baseado neste contexto, podemos avaliar como estas estruturas de fendas podem ser rastreadas ao longo do escoamento utilizando visão computacional. Uma dessas técnicas, chamada fluxo óptico, tem tarefa de estimar o movimento por pixel entre dois quadros consecutivos em um vídeo. Basicamente, a tarefa do fluxo óptico implica o cálculo do vetor de deslocamento para os pixels conforme o deslocamento de um objeto varia entre duas imagens vizinhas. A ideia principal do fluxo óptico é estimar o vetor de deslocamento de um objeto, causado por seu movimento ou pelo movimento da câmera. A Figura 1.6 mostra como a técnica de fluxo óptico é utilizada para rastrear pontos característicos ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ , etc), quadrados fixados na parede de um corredor (Figura 1.6a). Por meio do fluxo óptico, o movimento aparente dos quadrados é convertido em vetores

de velocidade (Figura 1.6b). Na Figura 1.6c, é mostrada uma imagem única do corredor e na Figura 1.6d, são traçados os vetores de movimento conforme a câmera se move ao longo do corredor, produzindo múltiplas imagens.

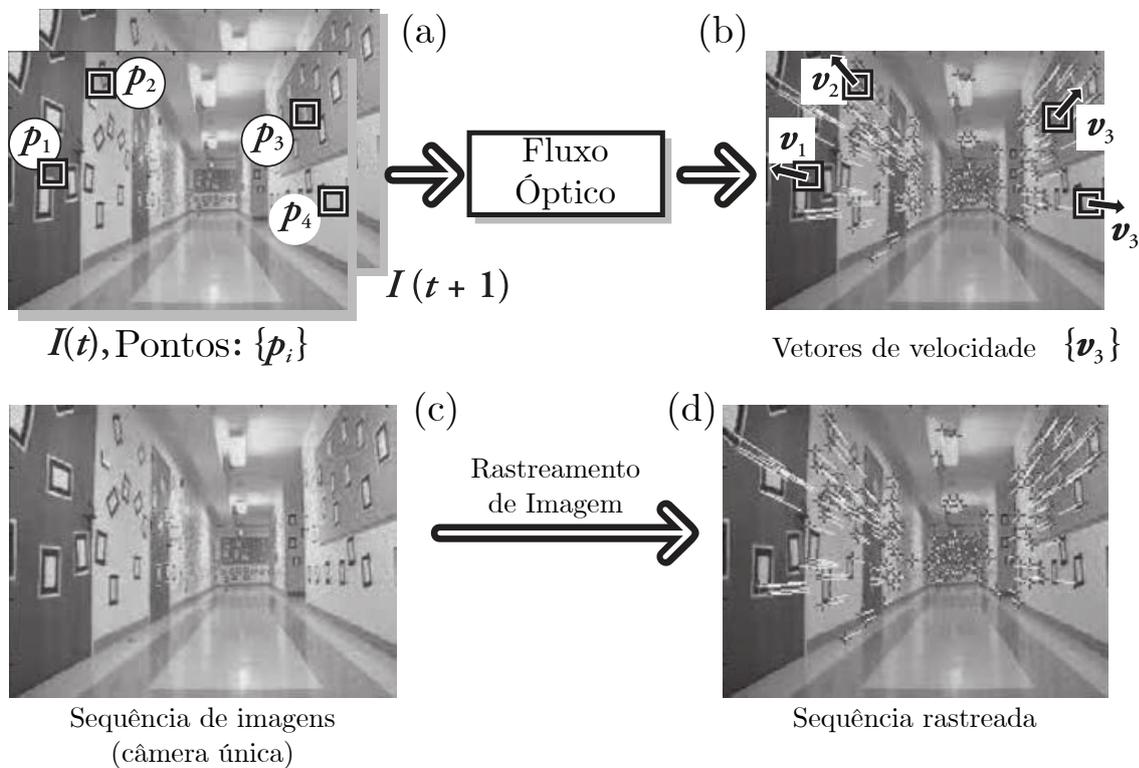


Figura 1.6 – Pontos característicos,  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , etc (a) e seus movimentos são convertidos em vetores de velocidade (b); em (c) é visto uma única imagem do corredor e em (d) são traçados os vetores de movimento conforme a câmera se move pelo corredor (imagens originais de Jean-Yves Bouguet). Fonte: [Bradski e Kaehler \(2000\)](#).

Existem muitas aplicações para algoritmos de fluxo óptico, [Parrilla et al. \(2008\)](#) utilizam esta técnica para rastrear um veículo se deslocando ao longo de uma via (Figura 1.7). Além disso, o mesmo pode ser usado em muitas áreas onde a informação do movimento de objetos é crucial. Técnicas de fluxo óptico são utilizadas em editores de vídeo para compressão, estabilização, câmera-lenta, etc. Fluxo óptico também encontra aplicações no reconhecimento de ações ([SEVILLA-LARA et al., 2018](#); [MOTA, 2011](#); [DANAFAR](#); [GHEISSARI, 2007](#); [GUO et al., 2010](#)) e rastreamento em tempo real.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 são apresentados os objetivos e questões de pesquisa, no capítulo 3, é apresentada uma revisão sobre correntes de gravidade, como as mesmas são caracterizadas, uma revisão sobre os métodos automáticos para a detecção de fendas em correntes de gravidade e são apresentados os métodos de visão computacional utilizados: detecção de contornos, detecção de cantos Shi-Tomasi, fluxo óptico Lucas-Kanade e o algoritmo KLT; no capítulo 4, são

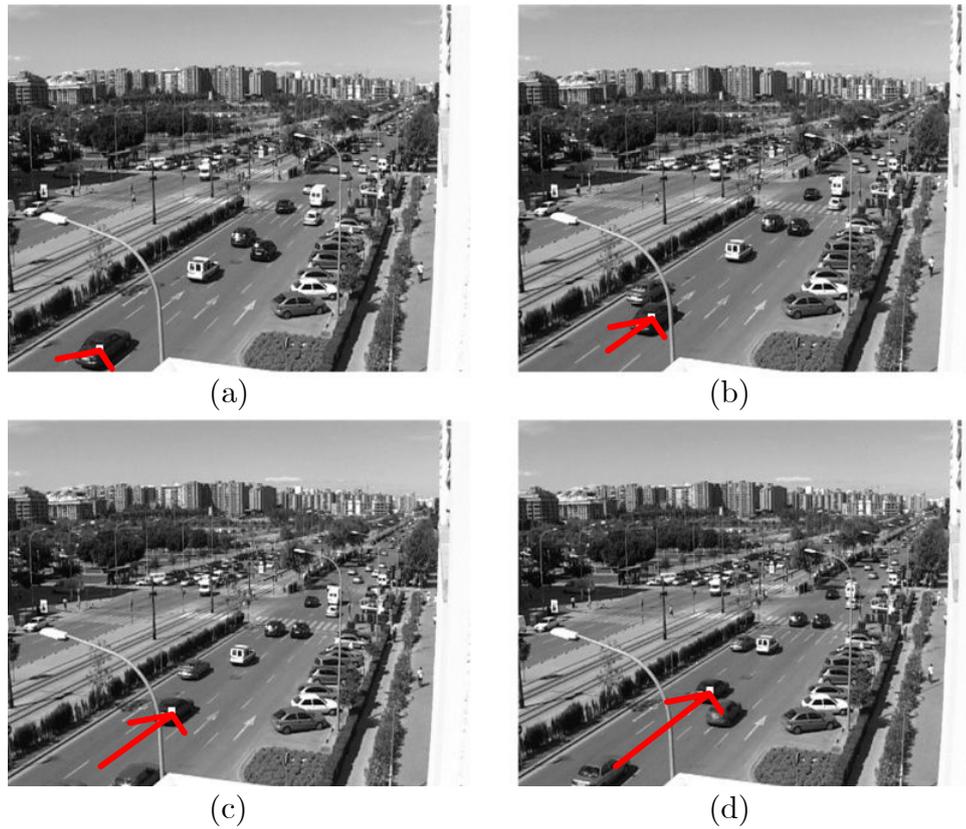


Figura 1.7 – Fluxo óptico utilizado para acompanhar o movimento de um veículo em uma via, mostrados nas imagens em diferentes instantes de tempo (a, b, c, d).  
Fonte: Parrilla et al. (2008).

descritas as simulações numéricas realizadas para a obtenção de dados; os resultados são mostrados no capítulo 5 e finalmente no capítulo 6 é apresentado um sumário com as observações e conclusões.



## 2 Objetivos

O objetivo primário deste trabalho é, inicialmente formular um algoritmo baseado em processamento de imagens, que permita localizar e rastrear características específicas, ou feições, denominadas lobos e fendas formadas na porção frontal das correntes de gravidade. Com o intuito de se chegar a um algoritmo geral aplicável a maior gama possível de configurações de escoamento, pretende-se definir uma referência para comparação, justificar o uso da mesma e validar medidas obtidas pelo método proposto com ela.

Seguindo esta linha de pesquisa, o trabalho levanta as questões:

**“É possível rastrear automaticamente as feições detectadas e acompanhá-las durante a evolução temporal do escoamento?”**

**“Qual a acurácia do método na localização correta das feições?”**

**“O desempenho do método está associado aos parâmetros do escoamento?”**

### 2.1 Objetivos específicos

Com a finalidade de responder as questões levantadas pelos objetivos, surgem objetivos específicos:

- Elaborar um método de aferição da acurácia do método;
- Avaliar qualitativamente o método proposto;
- Avaliar quantitativamente o método proposto;
- Verificar qualitativamente o desempenho do método proposto com diferentes configurações experimentais.



## 3 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão tratados alguns assuntos fundamentais para a melhor compreensão deste trabalho. Inicialmente, são apresentadas as correntes de gravidade incluindo classificações e como estas são estudadas, apresentando as principais configurações experimentais utilizadas em seus estudos. Em seguida é feita uma revisão mostrando como outros trabalhos realizam medidas para a caracterização das estruturas presentes na frente da corrente de gravidade e são indicadas potenciais limitações destas abordagens. Finalmente, são descritas as técnicas de visão computacional utilizadas no algoritmo proposto.

### 3.1 Correntes de gravidade

Como abordado anteriormente, correntes de gravidade, também chamadas de correntes de densidade, são fenômenos que podem ocorrer espontaneamente na natureza (Figura 1.2) assim como podem ser gerados pela ação do homem, como a nuvem de detritos proveniente da implosão de uma construção (Figura: 3.1). Estas correntes são escoamentos nos quais dois fluidos com massas específicas diferentes interagem conduzidos por um campo gravitacional resultando em um fluxo predominantemente horizontal (SIMPSON, 1999). Esse pode ser causado por um evento de remobilização instantânea como rompimento de taludes ou de uma barragem, ou por alimentação contínua como o fluxo de um rio.

Para uma melhor segmentação do problema sendo analisado neste trabalho, devemos definir como as correntes de gravidade são classificadas. Desta forma, a classificação pode ser feita por meio do mecanismo de iniciação assim como por meio da relação entre as densidades dos fluidos envolvidos do escoamento. Estas classificações auxiliam na escolha das estratégias utilizadas para estudar este tipo de escoamento assim como na escolha pela melhor configuração experimental para realizar os estudos.

Em relação ao mecanismo de formação, podemos dizer que as correntes de gravidade podem ser iniciadas de duas maneiras. Na primeira, a corrente é formada a partir do deslocamento de um volume finito de material. Este mecanismo de iniciação é conhecido como remobilização instantânea de material (3.2a). Outra maneira de gerar uma corrente de gravidade é por meio do mecanismo conhecido como remobilização não-instantânea de material (3.2b). Por meio dele a corrente é gerada por meio de um fluxo de material continuamente injetado ao longo de um determinado tempo.

Além do mecanismo de formação, as correntes de gravidade também podem ser



Figura 3.1 – Corrente de gravidade formada pela nuvem de detritos gerada pela implosão de torres de arrefecimento. Fonte: [freepressjournal.in](http://freepressjournal.in) (2021).

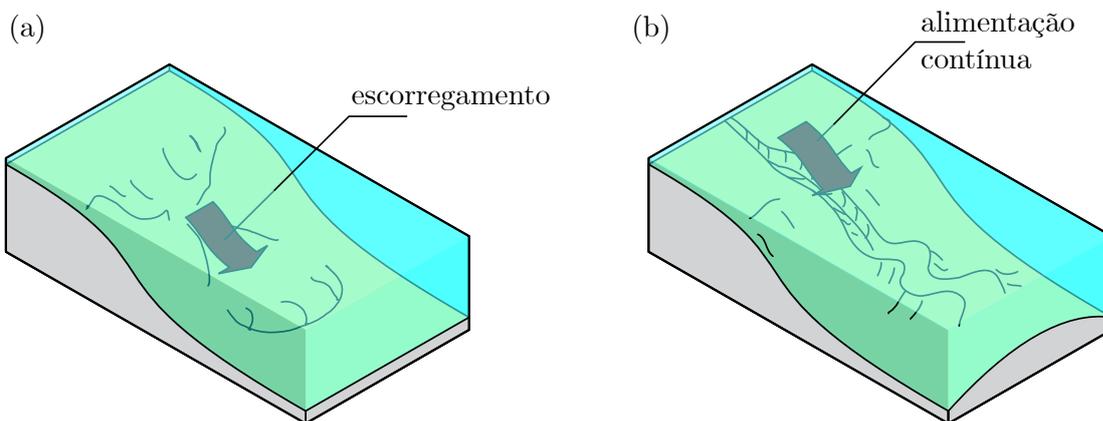


Figura 3.2 – Exemplo dos mecanismos de iniciação de correntes de gravidade: *remobilização instantânea de material* (a) e *remobilização não-instantânea de material* (b).

distinguidas a partir da relação entre as massas específicas dos dois fluidos que interagem ao longo do escoamento. Primeiro pode-se assumir que em um fluido ambiente com massa específica  $\rho_0$ , se desloca uma corrente de gravidade com massa específica  $\rho_1$ . Neste contexto, quando a massa específica do fluido ambiente for constante e uniformemente distribuída, [Mulder e Alexander \(2001\)](#) classificam o escoamento como homopícnal, mesopícnal, hipopícnal e hiperpícnal.

No escoamento homopícnal, a massa específica da corrente de gravidade é igual a do fluido ambiente ( $\rho_0 = \rho_1$ ), ilustrado na Figura 3.3a. Quando a massa específica do fluido ambiente possui uma estratificação tal que  $\rho_{0,\min} < \rho_1 < \rho_{0,\max}$ , o escoamento é definido como mesopícnal (Figura 3.3b). No escoamento hipopícnal a massa específica da corrente de gravidade da corrente de gravidade é menor que a do fluido ambiente ( $\rho_0 < \rho_1$ ), ilustrado na Figura 3.3c. E finalmente no escoamento hiperpícnal massa específica

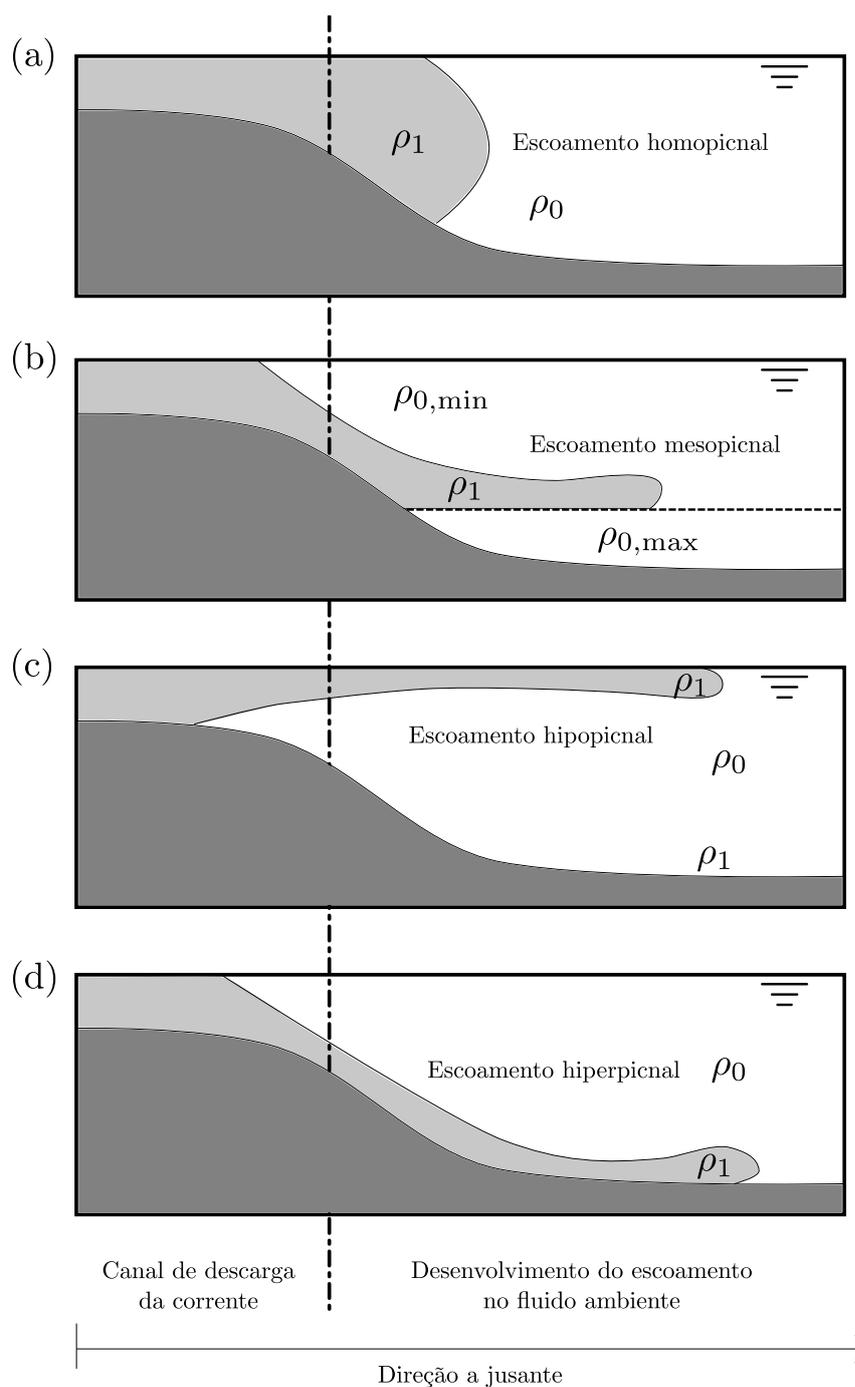


Figura 3.3 – Classificação de correntes de gravidade em relação à  $\Delta\rho$ : escoamento homopícnal (a), escoamento mesopícnal (b), escoamento hipopícnal (c), escoamento hiperpícnal (d). Fonte: Adaptado de [Mulder e Alexander \(2001\)](#).

da corrente de gravidade é maior que a do fluido ambiente ( $\rho_0 > \rho_1$ ), ilustrado na Figura 3.3d.

Correntes de gravidade hipopícnais resultam em um escoamento sobre o fluido ambiente e normalmente, em um contexto geofísico, são consideradas mais importantes próximas da foz de rios onde ocorre a dispersão de sedimentos ([MULDER; ALEXANDER, 2001](#)). Enquanto que correntes de gravidade hiperpícnais são caracterizadas por um es-

coamento sob o fluido ambiente, correspondendo a correntes que interagem com o leito. O caso mesopicnal trata de um escoamento intermediário entre correntes hipopicnais e hiperpicnais. É importante constatar que esta classificação simplificada não é estática, porque quando ocorre a interação entre os fluidos da corrente e do ambiente, o valor da diferença de massa específica pode variar.

### 3.1.1 A configuração *Lock-release*

A abordagem *lock-release* é uma maneira simples de replicar eventos de remobilização instantânea de material em escalas experimentais. Ela é utilizada tanto em arranjos de laboratórios quanto em simulações numéricas. Esta abordagem consiste na liberação instantânea de um volume fixo de um fluido com uma determinada massa específica em um fluido ambiente com menor massa específica por meio da retirada de uma placa que inicialmente mantém ambos fluidos separados (Figura 3.4a,c,e). Nos experimentos, esta abordagem é utilizada para replicar escoamentos hiperpicnais utilizando algum mecanismo que promova a diferença de massa específica, como sal ou açúcar dissolvido ou sedimentos em suspensão. Uma vez que a placa que separa os fluidos é retirada, a corrente de gravidade começa a se desenvolver. A Figura 3.4b,d,f) mostra o início do desenvolvimento da corrente, logo após a liberação da barreira.

De maneira mais frequente são utilizadas as configurações canalizadas (SIMPSON, 1972; HACKER et al., 1996; SHER; WOODS, 2015; CANTERO et al., 2007b), axi-simétricas (CANTERO et al., 2007a; ZGHEIB et al., 2015) e de canal/bacia (FRANCISCO et al., 2018). A maneira como a corrente de gravidade evolui ao longo do escoamento está relacionada com a condição inicial do fluido antes da remoção da barreira. Em configurações canalizadas o fluido está inicialmente restrito (Figura 3.4a) na porção inicial do canal e quando a barreira é liberada, iniciando o escoamento (Figura 3.4b) se observam variações na velocidade e de massa específica da corrente na direção vertical na direção a jusante do escoamento. Já em configurações axi-simétricas o fluido está inicialmente restrito a um quarto de cilindro (Figura 3.4c) e quando o escoamento é iniciado (Figura 3.4d), forma-se uma corrente de gravidade que se propaga de forma circular onde são observadas variações mais importantes de velocidade e de massa específica nas direções vertical e radial. Finalmente em configurações canal/bacia, o fluido é inicialmente confinado em um pequeno canal (Figura 3.4e) e quando o escoamento é iniciado (Figura 3.4f) a corrente de gravidade resultante é liberada em uma região não-confinada, resultando em um escoamento onde todas as direções possuem variações importantes de velocidade e massa específica.

Ao utilizar a configuração canalizada da abordagem de *lock-release*, podemos adotar a definição de KÁrmán (1940) para a velocidade de flutuação ( $\tilde{u}_b$ ). Para determinar esta velocidade podemos assumir que existe uma conversão de energia potencial em

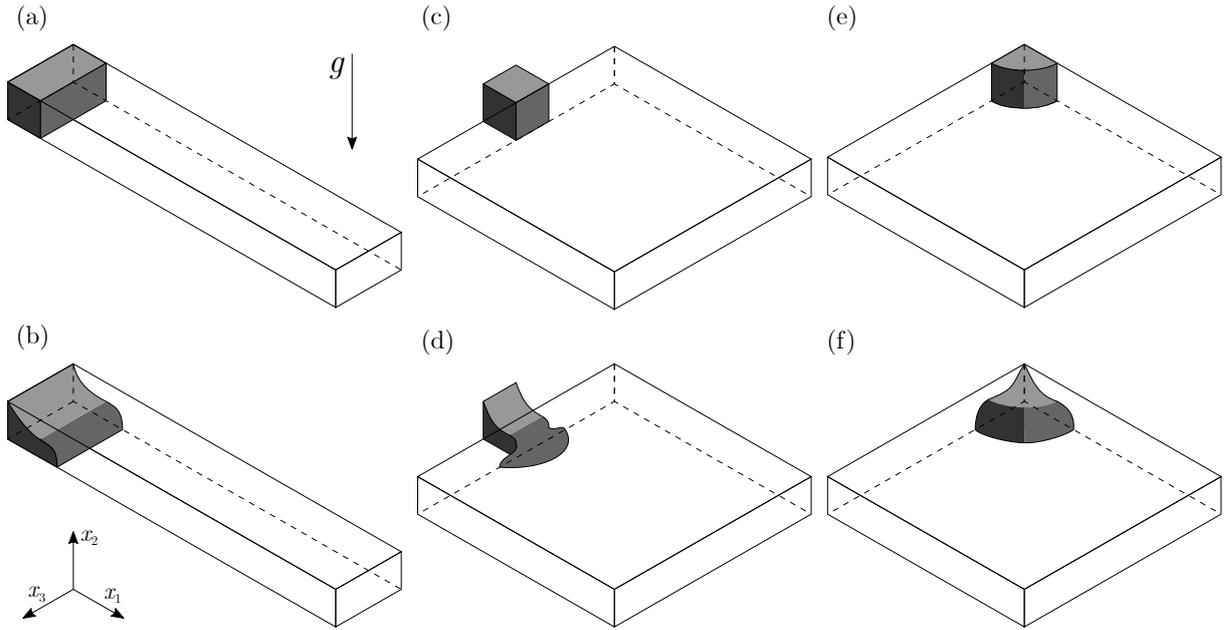


Figura 3.4 – Diferentes configurações do arranjo *lock-release* em correntes de gravidade hiperpicnais: configuração canalizada, condição inicial (a) e início do escoamento (b); configuração canal-bacia, condição inicial (c) e início do escoamento (d); configuração axi-simétrica, condição inicial (e) e início do escoamento (f).

energia cinética a partir de uma coluna de fluido com altura  $\tilde{H}$ , volume  $\tilde{V}$ , área de seção longitudinal  $\tilde{A}$  e massa específica acrescida de uma variação de massa específica ( $\Delta\rho$ ) em relação a do fluido ambiente ( $\rho_0$ ) na forma:

$$\underbrace{\tilde{A} \int_0^{\tilde{H}} \tilde{g} \Delta\rho \tilde{x}_2 d\tilde{x}_2}_{\text{Energia potencial}} = \underbrace{\frac{1}{2} \tilde{V} \rho_0 \tilde{u}_b^2}_{\text{Energia cinética}}, \quad (3.1)$$

sendo  $\tilde{g}$  a aceleração da gravidade e  $\tilde{x}_2$  é a coordenada vertical. Integrando a energia potencial e isolando a velocidade de flutuação, a velocidade potencial é determinada em função da aceleração da gravidade, altura da coluna de fluido, massa específica do fluido ambiente e o incremento da massa específica em relação ao fluido ambiente:

$$\tilde{u}_b = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0} g \tilde{H}}. \quad (3.2)$$

Ao se realizar a adimensionalização para um problema do tipo *lock-release*, podemos associar o valor característico de velocidade com o número adimensional de Reynolds ( $Re$ ). No estudo de correntes de gravidade, como em questão, é comum considerar a velocidade de flutuação e a altura da coluna de fluido mais denso como escalas características, assim o número de Reynolds pode ser definido como

$$Re = \frac{\tilde{u}_b \tilde{H}}{\nu} = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0} g \tilde{H}^3}, \quad (3.3)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

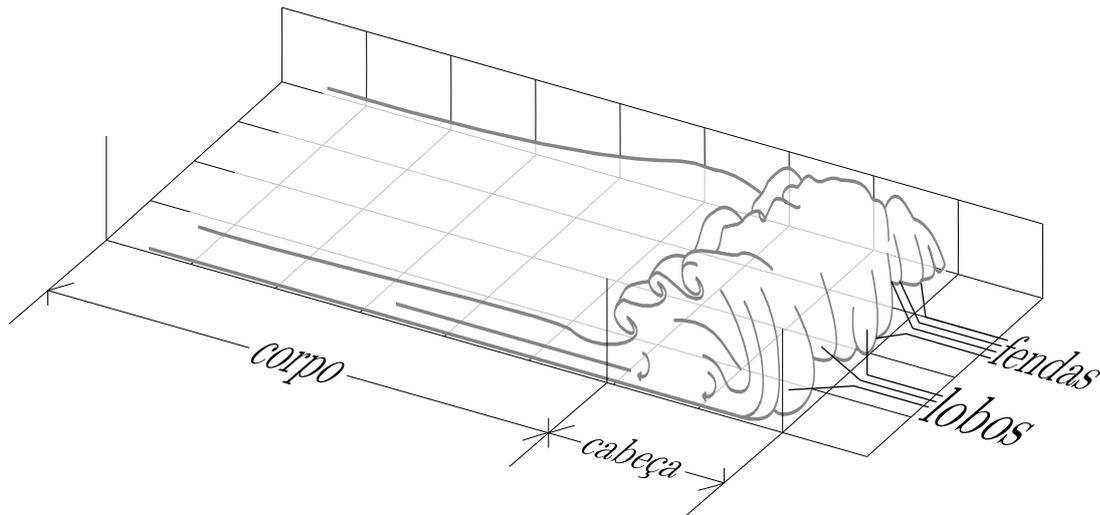


Figura 3.5 – Exemplo das regiões e estruturas presentes em uma corrente de gravidade hiperpicnal.

### 3.1.2 A anatomia de uma corrente de gravidade e as estruturas de lobos e fendas

Conforme a corrente de gravidade evolui ao longo do escoamento, diferentes partes dessa corrente começam a apresentar características distintas, tanto nos aspectos morfológicos quanto hidrodinâmicos. De acordo com o modelo de corrente de gravidade hiperpicnal apresentado na Figura 3.5, existe uma região frontal referida como cabeça e, à montante, outra região chamada de corpo da corrente (SIMPSON, 1999). Outros ainda citam uma região à montante do corpo chamada de cauda (HACKER et al., 1996).

A cabeça da corrente, já estudada experimentalmente (SIMPSON, 1972; SIMPSON; BRITTER, 1979; GARCÍA; PARSONS, 1996; NOGUEIRA et al., 2014; NEUFELD, 2002), teoricamente (ALLEN, 1971) e numericamente (HÄRTEL et al., 2000), é referida como a região frontal da corrente que penetra no fluido ambiente. Nesta região é onde ocorre um maior entranhamento de fluido ambiente na corrente. Este entranhamento de fluido ambiente na cabeça de uma corrente de gravidade pode causar heterogeneidades na porção mais frontal da cabeça. Estas heterogeneidades, por sua vez se propagam na direção transversal à propagação do escoamento e são conhecidas como estruturas de lobos e fendas.

### 3.1.3 Correntes de turbidez e o caminho das fendas

Correntes de turbidez são correntes de gravidade nas quais a diferença de massa específica é causada por partículas em suspensão (MEIBURG; KNELLER, 2010). Elas apresentam uma dinâmica complexa, com instabilidades de lobos e fendas se formando na frente e seguida por uma região de intensa mistura na direção transversal do escoamento através da formação de vórtices de Kelvin-Helmholtz na interface entre a corrente

e o fluido ambiente. As correntes de turbidez são um importante mecanismo na natureza e têm um papel importante em eventos geológicos como, por exemplo, na formação de características morfológicas como canais, ravinas, ondas sedimentares Puhl (2012), diques (NAKAJIMA; SATOH, 2001; HUPPERT, 2006), turbiditos e sistemas de leques submarinos (Figura 3.6). Elas podem se formar quando a água doce de um rio encontra com a água salgada do oceano com a habilidade de modificar a forma do fundo do mar erodindo grandes áreas e/ou depositando grandes quantidades de sedimentos. Elas ainda podem desempenhar um papel central na formação de reservatórios de hidrocarbonetos conforme Syvitski et al. (1996b), Meiburg e Kneller (2010). Ou ainda consequências catastróficas impactando a estabilidade de estruturas submarinas localizadas no fundo do mar como tubulações e cabos submersos (NISBET; PIPER, 1998; ZAKERI et al., 2008) como o caso da corrente de turbidez em Grand Banks em 1929 (PIPER; AKSU, 1987) que causou a ruptura dos cabos de comunicação trans-atlânticos.

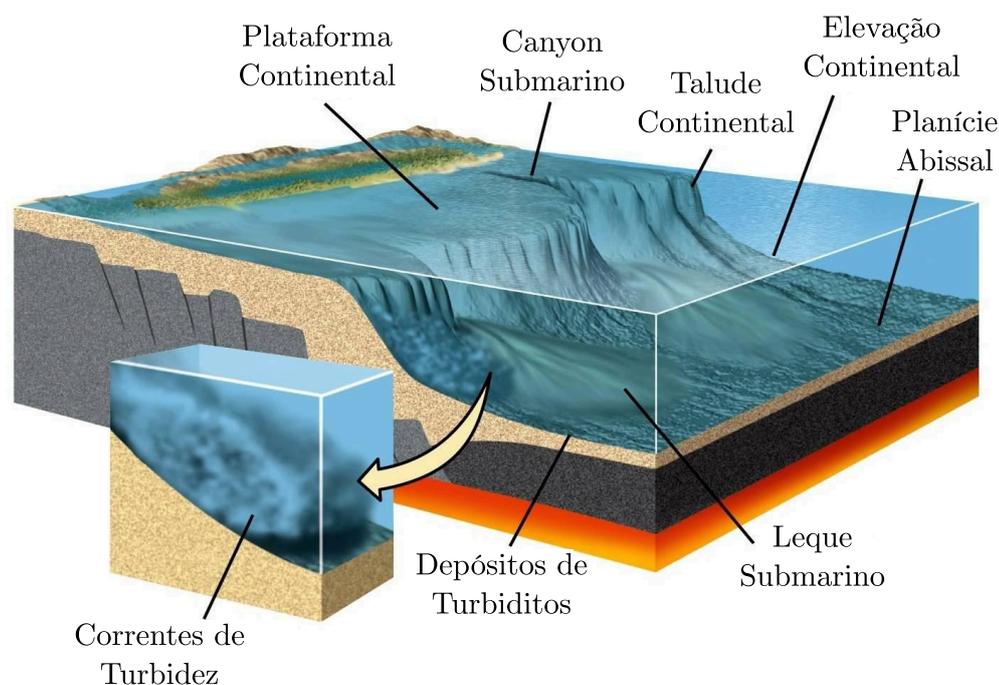


Figura 3.6 – Correntes de turbidez. Fonte: Grotzinger et al. (2010).

Experimentos (SIMPSON, 1972; BRITTER; SIMPSON, 1978; SIMPSON, 1999) investigando padrões de lobos e fendas têm tipicamente obtido imagens pela superfície inferior da corrente de gravidade, permitindo que o crescimento, mistura e bifurcação das estruturas sejam rastreados. Esta análise identificou a origem da instabilidade uma vez que a estratificação instável gerada como fluido ambiente é invadida pela cabeça da corrente, sujeita a uma superfície friccional. Como argumento de convencimento, mais experimentos foram realizados utilizando uma placa móvel se deslocando no fundo na direção do escoamento para suprimir esta instabilidade (SIMPSON, 1999). Além disso, McElwaine et al. (2004) mostraram que conforme a corrente de gravidade se propaga, as

estruturas de lobos e fendas são menos sensíveis à instabilidade gravitacional sugerindo a existência de um mecanismo alternativo dependente do número de Reynolds criando a instabilidade e gerando o padrão de lobos e fendas. Adicionalmente, como já mencionado, [Espath et al. \(2015\)](#) correlacionaram o traçado do caminho das fendas com a topologia de depósitos gerados por sedimentos de correntes de gravidade. A partir dos resultados de uma série de simulações numéricas, os autores puderam traçar manualmente o caminho percorrido pelas fendas presentes na frente da corrente ao longo da evolução da mesma, o que eles chamaram de assinaturas das estruturas da frente. Na Figura 3.7 são mostradas as visualizações das estruturas da frente obtidas pelos estudos de [Espath et al. \(2015\)](#) a partir dos planos  $(x_1, x_2)$  e  $(x_1, x_3)$  juntamente com o traçado manual do caminho das fendas a partir de uma iso-superfície do critério-Q com um iso-valor igual a 1 para  $t = 8$  (esquerda) e  $t = 14$  (direita). De cima para baixo são mostrados os resultados com número de Reynolds  $Re = 2.236$  e velocidades de queda adimensionais  $u_s = 0,04; 0,03; 0,02$  e para os números de Reynolds  $Re = 5.000$  e  $Re = 10.000$  com velocidades de queda  $u_s = 0,02$ .

Utilizando este traçado do caminho das fendas, associado às imagens dos sedimentos depositados no fundo do canal, os autores puderam utilizar a dinâmica turbulenta interna das estruturas de lobos e fendas para explicar a topologia dos depósitos de sedimentos. Além disso, a Figura 3.8 ilustra como os caminhos das fendas para os casos de números de Reynolds  $Re = 2.236$  e  $Re = 10.000$  evoluem e chama atenção para a estrutura marcada com o círculo preto a qual os autores denominam instabilidade espinha de peixe.

Muitos estudos numéricos também focam em estruturas de lobos e fendas em escoamentos na configuração de canal confinado sobre leito plano, mas também com topografias um pouco mais complexas ([OOI et al., 2009](#); [NASR-AZADANI; MEIBURG, 2014](#)). Os estudos fornecem informações valiosas e detalhadas sobre a dinâmica da corrente de turbidez como, por exemplo, a evolução espaço-temporal das estruturas turbulentas, campos de concentração de partículas, ou tensão de cisalhamento na parede. Infelizmente, apenas poucas DNS (sigla em inglês para *Direct Numerical Simulation* ou Simulação Numérica Direta) foram conduzidas com número de Reynolds relativamente alto e sedimentação de partículas. Para correntes de turbidez, o maior número de Reynolds simulado até então é 10.000 ([ESPATH et al., 2014](#)).

Comparações entre simulações 3D e 2D para vários números de Reynolds são usadas para avaliar quais grandezas de interesse podem ser avaliadas rapidamente pelos pesquisadores. Foi descoberto que simulações 2D não permitem a previsão com exatidão das principais características obtidas com simulações 3D, com exceção da taxa de sedimentação para a qual uma concordância qualitativa pode ser encontrada entre as simulações 2D e 3D.

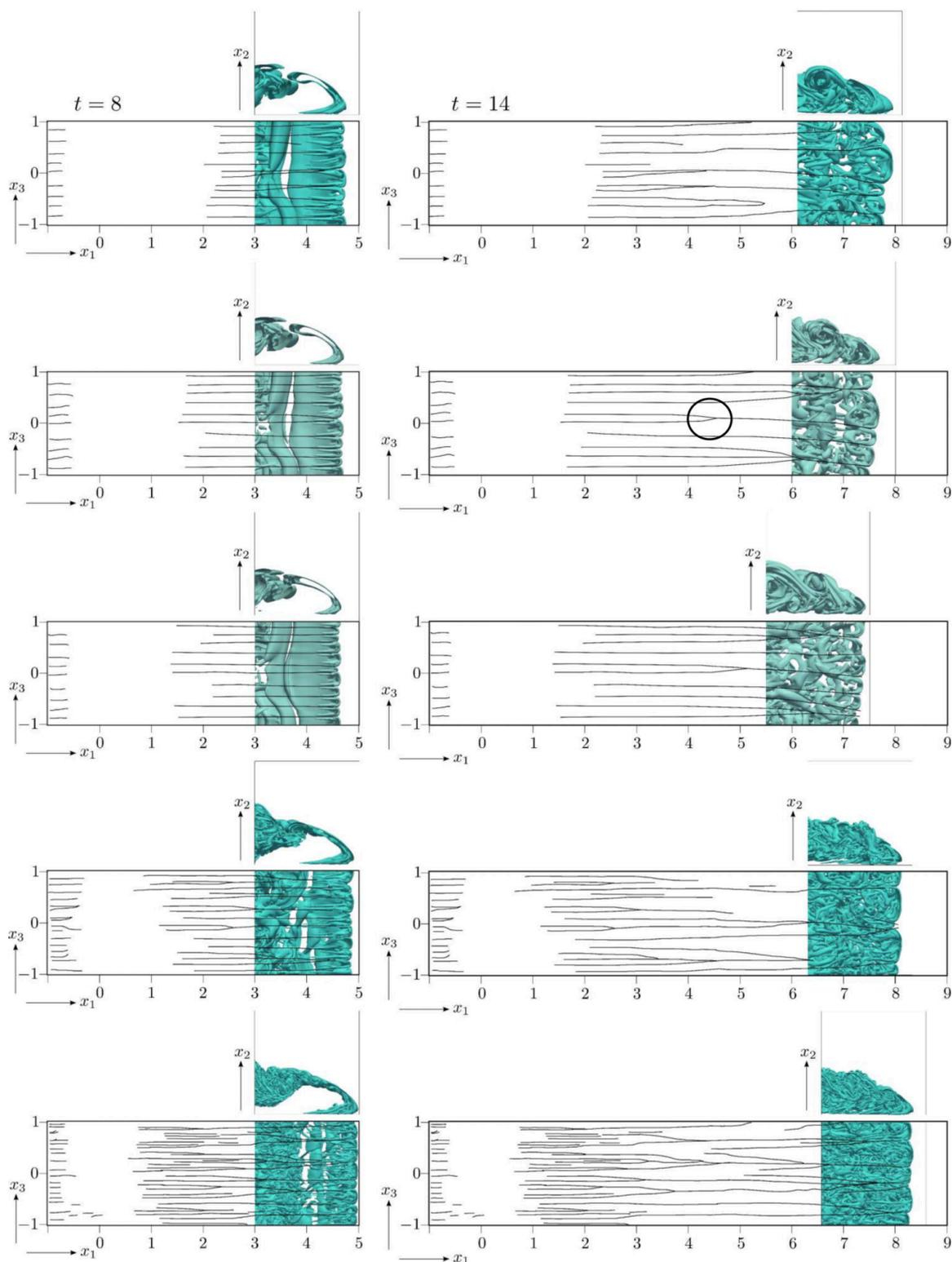


Figura 3.7 – A imagem mostra as visualizações das estruturas da frente obtidas pelos estudos de [Espath et al. \(2015\)](#) a partir dos planos  $(x_1, x_2)$  e  $(x_1, x_3)$  juntamente com o traçado manual do caminho das fendas a partir de uma iso-superfície do critério-Q com um iso-valor igual a 1 para  $t = 8$  (esquerda) e  $t = 14$  (direita). De cima para baixo,  $Re = 2.236$  com  $u_s = 0,04; 0,03; 0,02$ ;  $Re = 5.000$  e  $Re = 10.000$  com  $u_s = 0,02$ . Fonte: [Espath et al. \(2015\)](#).

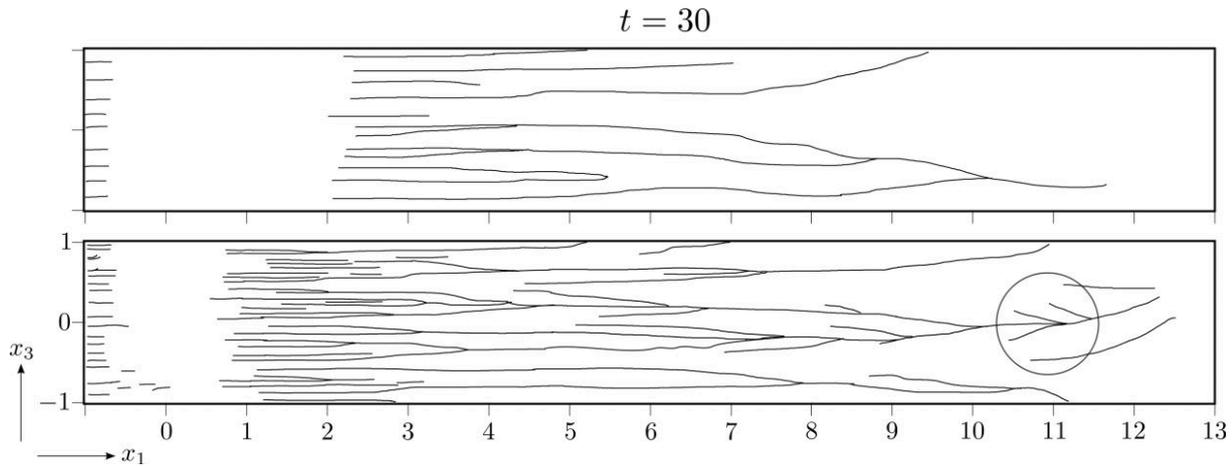


Figura 3.8 – Ilustração de como os caminhos das fendas para os casos de números de Reynolds  $Re = 2.236$  e  $Re = 10.000$  evoluem. O círculo preto indica uma instabilidade espinha de peixe. Fonte: [Espath et al. \(2015\)](#).

### 3.1.4 Comprimentos Característicos em função do número de Reynolds da cabeça da corrente

[Simpson \(1972\)](#) realizou uma série de experimentos com correntes de gravidade hiperpicnais com o intuito de determinar relações quantitativas que possibilitasse avaliar as diferentes escalas geométricas encontradas na cabeça de uma corrente de gravidade. Nestes experimentos o autor testou diferentes valores para a altura da lâmina d'água e a concentração do sal do fluido mais denso e mediu a velocidade de propagação do escoamento ( $\tilde{u}_f$ ), as alturas da cabeça e do nariz da corrente ( $\tilde{h}_{\text{head}}$  e  $\tilde{h}_{\text{nose}}$  respectivamente; Figura 3.9a) e a largura média das estruturas de lobos e fendas ( $\tilde{\lambda}$ , Figura 3.9b).

Estas experiências permitiram que o autor pudesse determinar a relação das alturas do nariz e da cabeça, a relação entre largura média das estruturas de lobos e fendas e a altura da cabeça e o número de Reynolds associado à cabeça da corrente de gravidade, determinado na forma:

$$Re_{\text{head}} = \frac{\tilde{u}_f \tilde{h}_{\text{head}}}{\nu}. \quad (3.4)$$

Com isso o autor pode estabelecer as seguintes leis de escala para as relações entre os comprimentos característicos em função do número de Reynolds da cabeça da corrente de gravidade:

$$\frac{\tilde{h}_{\text{nose}}}{\tilde{h}_{\text{head}}} = 0,61 Re_{\text{head}}^{-0,23 \pm 0,01}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{h}_{\text{head}}} = 7,4 Re_{\text{head}}^{-0,39 \pm 0,02}. \quad (3.6)$$

A partir destes experimentos, pode-se concluir que, observadas as limitações técnicas dos mesmos, que quanto maior é o valor do número de Reynolds, o nariz da corrente

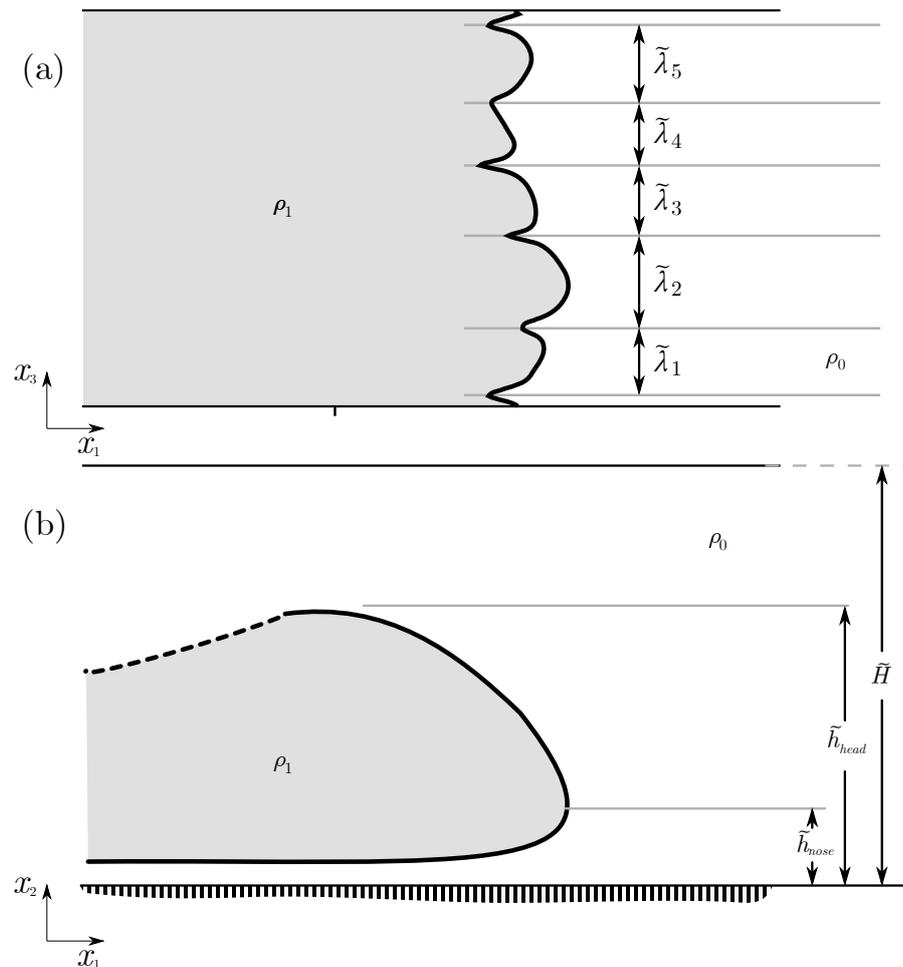


Figura 3.9 – Diagrama esquemático do fluxo médio relativo a cabeça da corrente de gravidade incidindo os comprimentos característicos  $\lambda_n$  (a) e as alturas da cabeça e do nariz da corrente:  $\tilde{h}_{head}$  e  $\tilde{h}_{nose}$ , respectivamente (b). Fonte: Adaptado de [Simpson \(1972\)](#).

estará mais próximo do leito e as estruturas de lobos e fendas serão menores e em maior número.

Em um trabalho mais recente, [Cantero et al. \(2007b\)](#) revisitaram as leis de escala de [Simpson \(1972\)](#) com simulações numéricas tridimensionais na configuração *lock-release* canalizada para casos com os seguintes números de Reynolds:  $Re = 895$ ,  $Re = 3450$  e  $Re = 8950$ . Os autores utilizam um código computacional pseudo-espectral ([CANUTO et al., 1988](#)) e os parâmetros numéricos relacionados ao número de pontos de malha em cada direção ( $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$ ) sendo  $768 \times 64 \times 80$ ,  $924 \times 84 \times 110$  e  $1536 \times 112 \times 180$ , para os casos com números de Reynolds 895, 3450 e 8950 respectivamente. Os comprimentos característicos utilizados nos três casos simulados  $L_1 = 25$ ,  $L_{1,b} = 1$ ,  $L_2 = 1,5$ ,  $L_3 = 1$  (Figura 4.3). Como validação de seus resultados os autores comparam velocidade da frente em função do tempo com os trabalhos de [Huppert e Simpson \(1980\)](#), [Marino et al. \(2005\)](#), [Hoult \(1972\)](#), [Huppert \(1982\)](#) (Figura 3.10a). Também são comparados dados quantitativos relativos ao comprimento característico dos lobos em função do número de

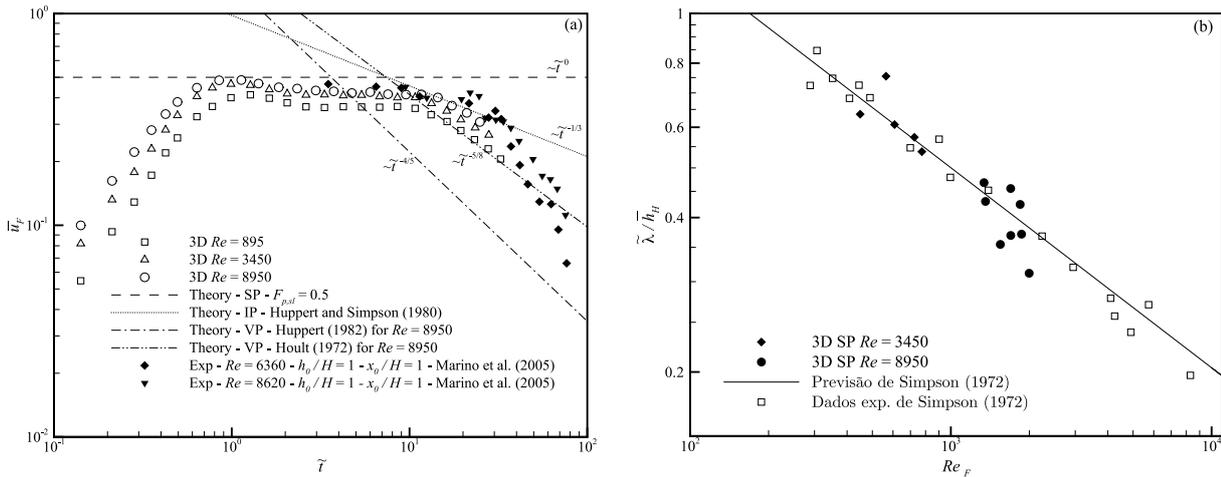


Figura 3.10 – (a) Velocidade da frente em função do tempo para os trabalhos de Cantero et al. (2007b), Huppert e Simpson (1980), Marino et al. (2005), Hout (1972), Huppert (1982). (b) A relação entre o comprimento característico em função do número de Reynolds da frente de corrente de gravidade para as simulações de Cantero et al. (2007b) juntamente com a lei de estala de Simpson (1972). Fonte: Cantero et al. (2007b)

Reynolds da frente de corrente de gravidade para as simulações com a lei de estala de Simpson (1972) (Figura 3.10b).

### 3.2 Outras configurações, Axi-simétrica e Canal-Bacia

Cantero et al. (2007a) desenvolveram simulações, utilizando DNS, em configuração axi-simétrica para dois casos  $Re = 3450$  e  $Re = 8950$ . Um volume cilíndrico de altura  $H$  e raio  $r_0$  contendo o fluido pesado é liberado no fluido ambiente, mais leve. A Figura 3.11 mostra a nomenclatura utilizada pelos autores na condição inicial do escoamento. Os mesmos se concentraram na condição  $r_0 = H$ .

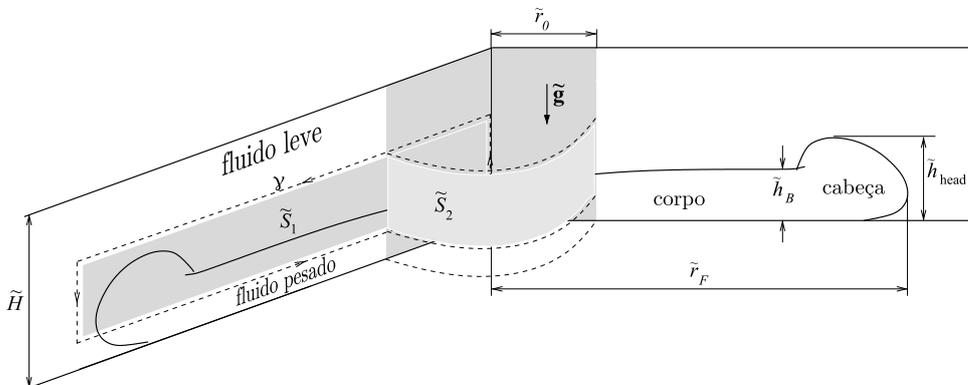


Figura 3.11 – Esquema da corrente de gravidade mostrando suas principais características e a nomenclatura utilizada pelos autores. Fonte: Cantero et al. (2007a)

Como resultado destas simulações, os autores geraram as imagens apresentadas

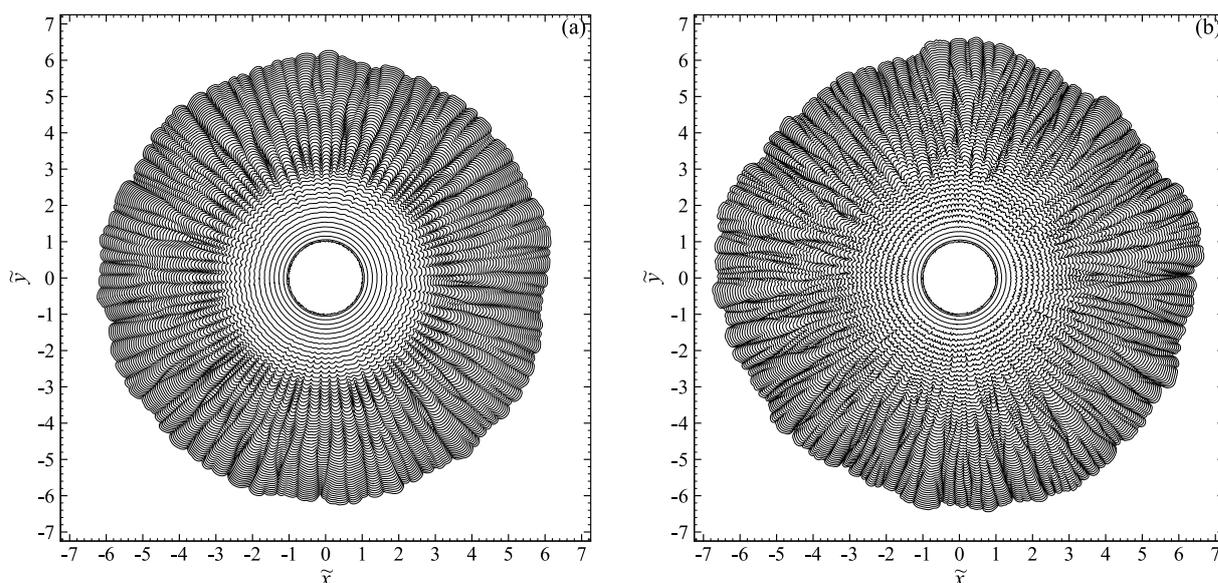


Figura 3.12 – Ilustração da localização da frente da corrente de gravidade ao longo do tempo. Visualização para contornos no fundo do escoamento para uma massa específica  $\Delta\rho = 0,015$ . A separação de tempo entre os contornos é de  $t = 0,354$ . (a)  $Re = 3450$ , e (b)  $Re = 8950$ . Fonte: [Cantero et al. \(2007a\)](#)

na Figura 3.12. Estas imagens mostram as linhas de contorno da frente da corrente de gravidade para os dois casos simulados. A partir dessa imagem é possível gerar um conjunto de dados contendo informação visual para cada linha de contorno representando a frente da corrente de gravidade.

Em relação às configurações canal bacia, apesar de existirem extensos estudos relacionados à topologia da frente da corrente de gravidade e sua velocidade ([FRANCISCO et al., 2018](#); [FRANCISCO, 2018](#)) não há referências que permitam uma comparação quantitativa relacionada especificamente às estruturas de lobos e fendas. No entanto, avaliações qualitativas podem ser feitas visualizando o caminho das fendas apenas observando o padrão visual formado ao se graficar as isolinhas de concentração para múltiplos passos de tempo na mesma imagem. [Frantz et al. \(2017\)](#) comparam três abordagens de simulação tridimensionais cujas visualizações das isolinhas de concentração são apresentadas na Figura 3.13. Neste caso, a avaliação o caminho das fendas é feita apenas de forma qualitativa.

### 3.3 Automação da detecção das estruturas de lobos e fendas

Existem maneiras de automatizar a análise de experimentos de correntes de gravidade; tanto em imagens provenientes de um experimento físico quanto de uma simulação numérica. [Neufeld \(2002\)](#) analisou imagens obtidas usando aquisição de imagens de um experimento de *lock-release* plano. Neste experimento as imagens foram registradas com um intervalo menor de tempo entre cada uma, comparado com a taxa de amostra-

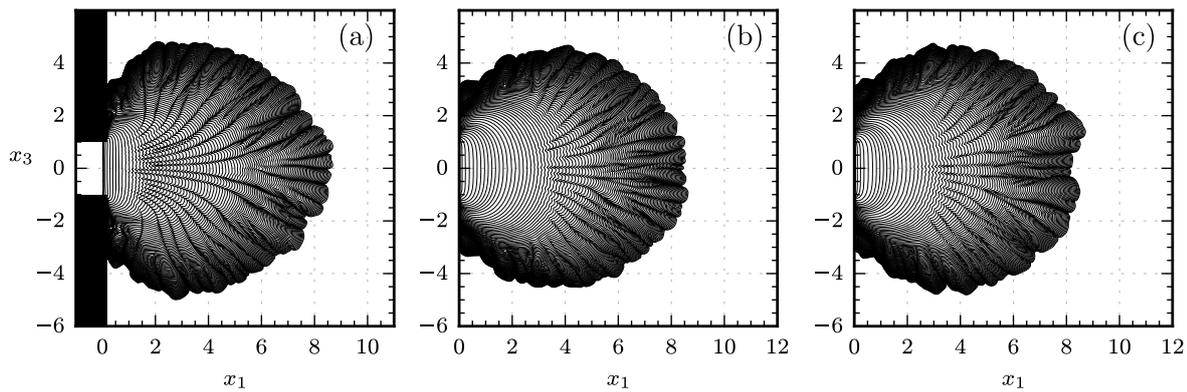


Figura 3.13 – Impressão das isolinhas de concentração para diferenças passos de tempo para três simulações na configuração canal-bacia. (a) uma DNS configuração de domínio fechado; (b) DNS em configuração de domínio aberto; LES em configuração de domínio aberto. Adaptado de [Frantz et al. \(2017\)](#) e [Francisco et al. \(2018\)](#).

gem de [Simpson \(1972\)](#), resultando em mais fendas a serem rastreadas. O algoritmo proposto por [Neufeld \(2002\)](#) para identificar as fendas faz uma varredura transversal da frente em cada passo de tempo, comparando a cada cinco pontos o ponto central com as médias dos pontos dos extremos, como indicado na Figura 3.14. Se ambas as médias têm uma magnitude maior que o ponto entre elas, este ponto é considerado uma fenda. Desta maneira o autor pode detectar automaticamente as fendas e marcar suas localizações, permitindo que elas possam ser rastreadas manualmente ao se acompanhar visualmente os pontos marcados em cada linha. Ele aplicou esta técnica em imagens de uma série de experimentos que replicavam simulações numéricas realizadas por [Härtel et al. \(2000\)](#).

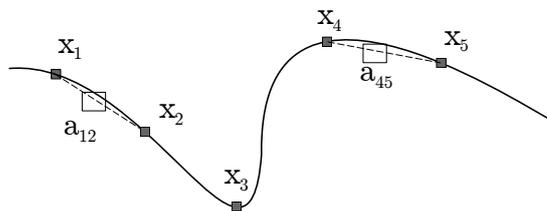


Figura 3.14 – Técnica utilizada por [Neufeld \(2002\)](#). Fonte: [Neufeld \(2002\)](#).

[Horner-Devine e Chickadel \(2017\)](#) puderam extrair a localização de estruturas similares a fendas utilizando-se de uma gravação contendo dados acústicos e térmicos em infravermelho de uma pluma na foz do Rio Merrimack, permitindo a análise de um evento em escala real. A Figura 3.16 mostra os resultados obtidos. Assim como no estudo de [Neufeld \(2002\)](#) as fendas foram indicadas com pontos vermelhos. Em ambos os trabalhos, os resultados foram avaliados qualitativamente e o tamanho dos lobos foi

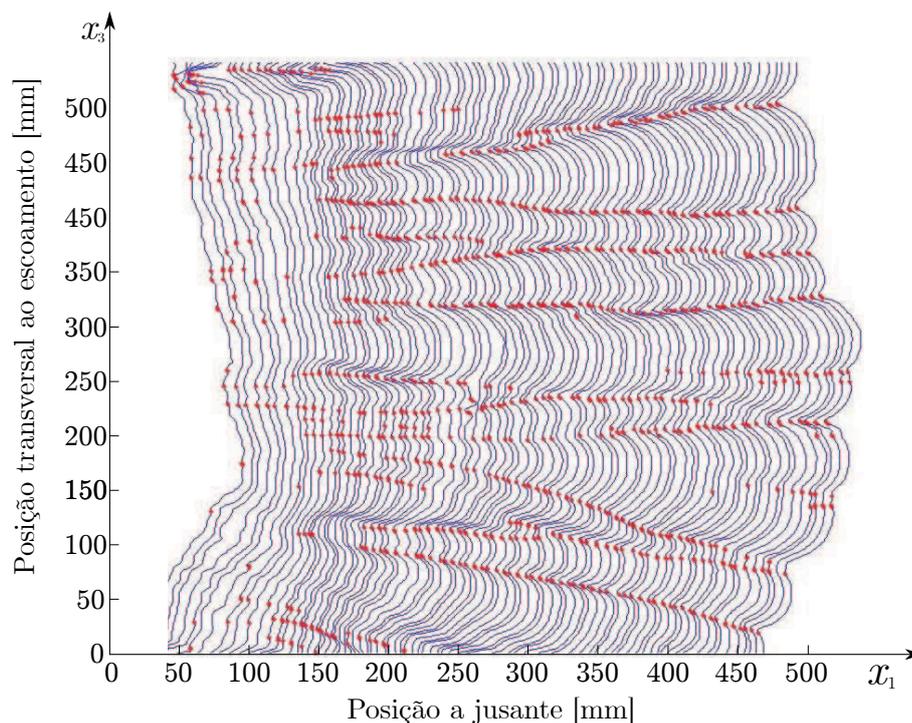


Figura 3.15 – Resultados da detecção automática de fendas de Neufeld (2002). Os pontos vermelhos indicam as fendas. Fonte: Adaptado de Neufeld (2002).

medido linearmente por meio da distância entre cada fenda. Entretanto, os artigos não mencionam uma avaliação da acurácia da detecção da posição das fendas.

Em se tratando do rastreamento das fendas ao longo do caminho percorrido pela corrente de gravidade, McElwaine et al. (2004) propuseram um método que traça automaticamente o caminho das fendas a partir de sequências de imagens ou vídeo de experimentos físicos utilizando uma configuração de *lock-release* canalizado. O método proposto também trata a linha de contorno da frente como uma função na direção transversal ao escoamento, não sendo adequado para qualquer outra configuração de *lock-release* diferente das canalizadas. Para detectar e rastrear as fendas eles convertem a sequência de vídeo da frente em movimento em uma imagem com diferentes níveis de cor. Os níveis de cor são obtidos medindo o deslocamento da linha de contorno da frente da corrente de gravidade na direção do escoamento para cada quadro do vídeo. A Figura 3.17a mostra o traçado do contorno da frente da corrente de gravidade, do qual são obtidos os níveis de cores referentes à posição da frente da Figura 3.17b. Nesta imagem o preto corresponde às curvaturas menores que -2 (pixels para atrás da linha média do contorno), branco às maiores que +2, e a intensidade é linear entre estes valores. Finalmente na Figura 3.17c vemos o traçado da posição das fendas sobreposto a imagem da curvatura.

Este método requer que taxa de amostragem do sistema de aquisição de imagem seja proporcional a velocidade de propagação da frente, uma vez que cada quadro

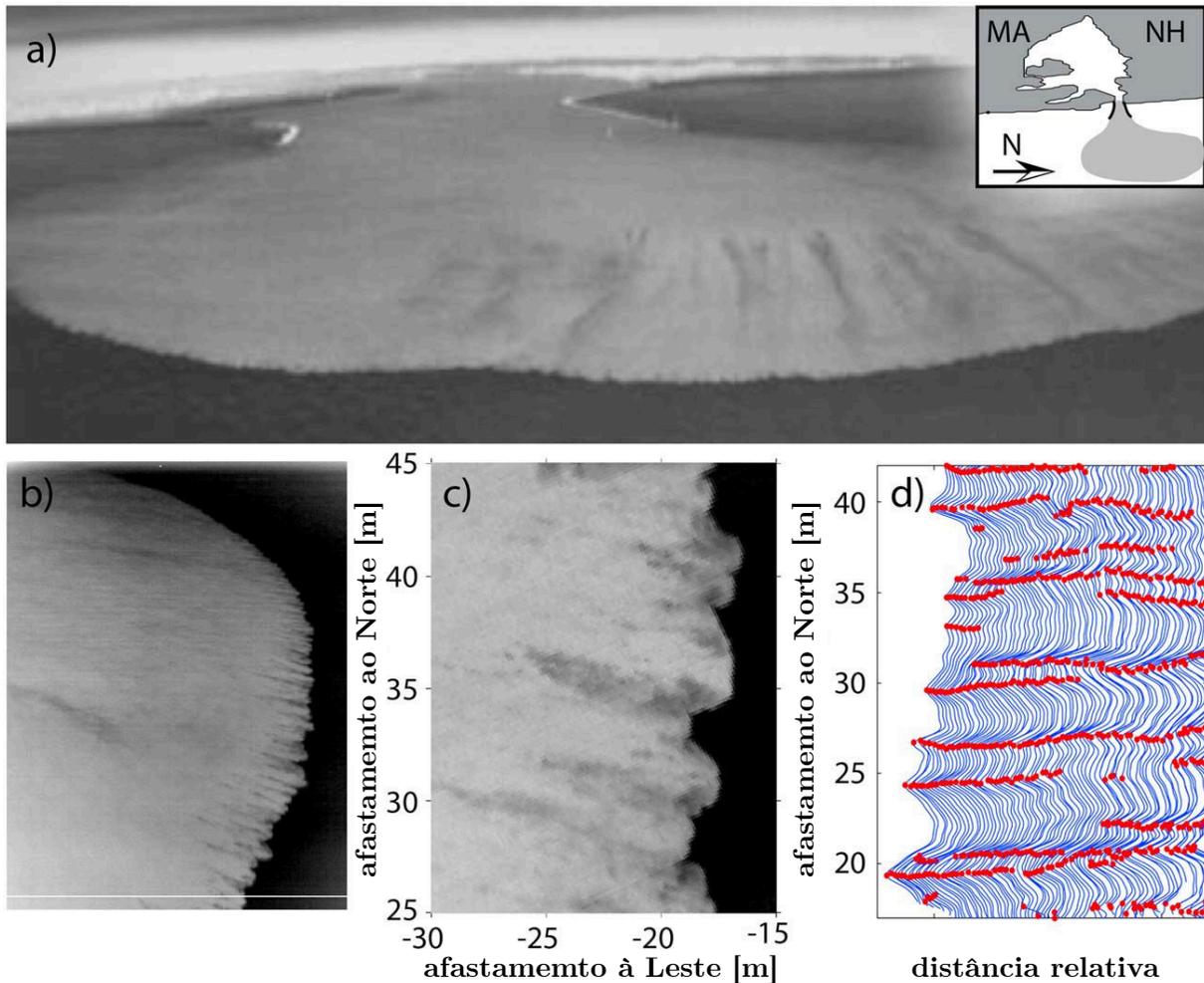


Figura 3.16 – (a) Imagem em infravermelho da pluma inteira no Rio Merrimack vista a oeste a partir do mar. A imagem foi obtida 1 hora depois da maré alta do dia 7 de maio de 2010. Imagens da frente da pluma (b) a distância (altura da imagem equivale a 2km) e (c) uma ampliação. A imagem na Figura 3.16c foi geo-retificada e os eixos são relativos a uma origem fixa arbitrária a oeste da frente. Tons mais claros correspondem a água da pluma que estava a aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$  mais quente que o oceano. (d) Uma série de tempos de 90s dos contornos frontais extraídos da sequência de imagens em infravermelho. Os pontos vermelhos correspondem as fendas localizadas com um algoritmo baseado em curvatura. Fonte: Adaptado de [Horner-Devine e Chickadel \(2017\)](#).

do vídeo será associado com um pixel da imagem com os níveis de cor. Para correntes de gravidade com velocidades mais altas, é necessária uma maior taxa de amostragem. Além deste método nenhum outro trabalho foi encontrado que realizasse o traçado do caminho das fendas utilizando um algoritmo automático. Desde os experimentos de [Simpson \(1972\)](#) até as simulações numéricas mais recentes, o acompanhamento das fendas é feito manualmente por pessoas traçando as fendas correspondentes de um passo de tempo para outro.

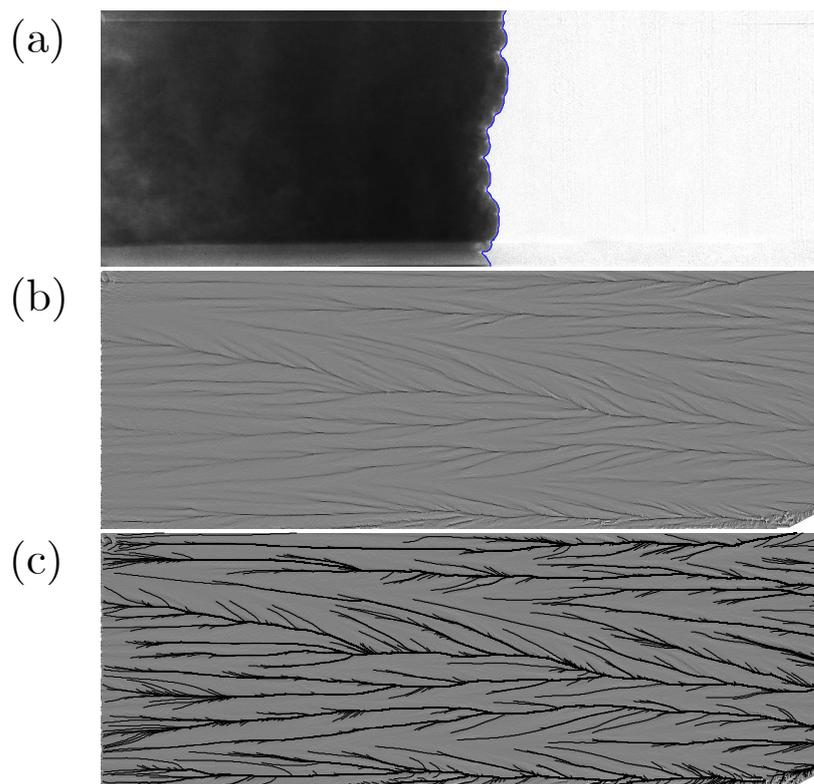


Figura 3.17 – a) Mapeamento do contorno. O movimento em todas as figuras é da esquerda para a direita. b) Curvatura referente a posição da frente do primeiro experimento. Preto corresponde às curvaturas menores que -2 (pixeis invertidos), branco às maiores que +2, e a intensidade é linear entre estes valores. c) Posição das fendas sobrepostas a imagem da curvatura. Fonte: [McElwaine et al. \(2004\)](#).

### 3.4 Visão Computacional

A visão humana processa naturalmente as imagens e representações em vídeo ([BALLARD; BROWN, 1982](#)) encontradas nos resultados de simulações numéricas, associando essas imagens com as ocorrências naturais. Entretanto, análises mais detalhadas dos experimentos, em que a enorme quantidade de dados gerados torna sua análise custosa e com um elevado grau de dificuldade em se observar o comportamento de um fenômeno em particular sendo estudado ([CAMATA et al., 2018](#)), baseado apenas na visão humana. O campo da visão computacional desenvolve e pesquisa algoritmos que reproduzem no computador o que a visão humana faz naturalmente. Uma opção, a qual permite a automação do processo de análise dos resultados de simulações numéricas em que estes resultados são imagens é a visão computacional. Esta que por sua vez é um vasto campo da ciência da computação, possui várias técnicas e algoritmos que podem ser utilizados com diferentes resultados.

O uso da visão computacional consiste em detectar, extrair e rastrear características em imagens e/ou quaisquer outros dados multidimensionais ([BROWN, 1988](#)), de

modo similar ao que o cérebro humano faz intuitivamente ao reconhecer e diferenciar uma imagem de outra ou mesmo acompanhando uma pessoa se movendo em um vídeo. Existem várias técnicas de algoritmos de visão computacional para detecção e rastreamento de características em imagens. Entre elas, temos detectores de bordas e detectores de cantos para detectar características do tipo bordas e cantos em imagens e algoritmos de fluxo óptico para acompanhar estas características entre um quadro e outro de um filme ou animação.

### 3.4.1 Detecção de contornos

Dentre as técnicas de visão computacional a serem utilizadas para a detecção da frente de uma corrente de gravidade, uma que pode ser destacada é a detecção de contornos. Inicialmente é importante definirmos o que é um contorno. Um contorno é uma lista de pontos que representa, de uma maneira ou de outra, uma curva em uma imagem (BRADSKI; KAEHLER, 2008). Esta representação pode ser diferente, dependendo do problema em questão. Existem muitas maneiras de se representar uma curva. Em visão computacional, contornos são representados por sequências onde cada item destas contém informação referente a localização do próximo ponto da curva.

Suzuki et al. (1985) descrevem um algoritmo para análise topológica de imagens binarizadas por meio de detecção e acompanhamento de bordas. Conforme os autores, é possível descrever contornos em imagens com apenas 2 tons de cores, isto é, binárias. Observando a Figura 3.18 que demonstra o uso do método proposto para encontrar contornos onde a contenção dos mesmos é respeitada diferenciando contornos externos e buracos. Na Figura 3.18a é mostrada uma imagem de teste contendo algumas regiões brancas (incisadas com pelas letras A até E) em um fundo escuro. Na imagem as regiões escuras são ilustradas como cinza, entretanto esta imagem pode ser segmentada por um valor limiar de tal modo que as regiões cinzas passem a ser pretas antes do algoritmo de detecção de contornos ser aplicado. Na Figura 3.18b, a mesma imagem é apresentada juntamente com os contornos detectados pelo algoritmo de Suzuki et al. (1985). Estes contornos são indicados com as etiquetas  $cX$  e  $hX$ , onde “c” indica contorno e “h” indica um buraco e “X”, um número. Alguns desses contornos são linhas tracejadas, estes representam fronteiras externas das regiões brancas, isto é, regiões diferentes de zero. Estas regiões são diferenciadas das regiões pontilhadas que podem ser interpretadas como fronteiras interiores ou fronteiras exteriores dos buracos, isto é, regiões iguais a zero. Assim, este algoritmo permite a distinção de contornos internos ou contidos dentro de outros contornos.

O conceito de contenção pode ser importante para muitas aplicações como no caso das árvores de contorno, descritas por Reeb (1946) com desenvolvimentos posteriores em Daniel e Schikoret (1997), Kreveld et al. (1997), Kreveld et al. (1997) e Carr et

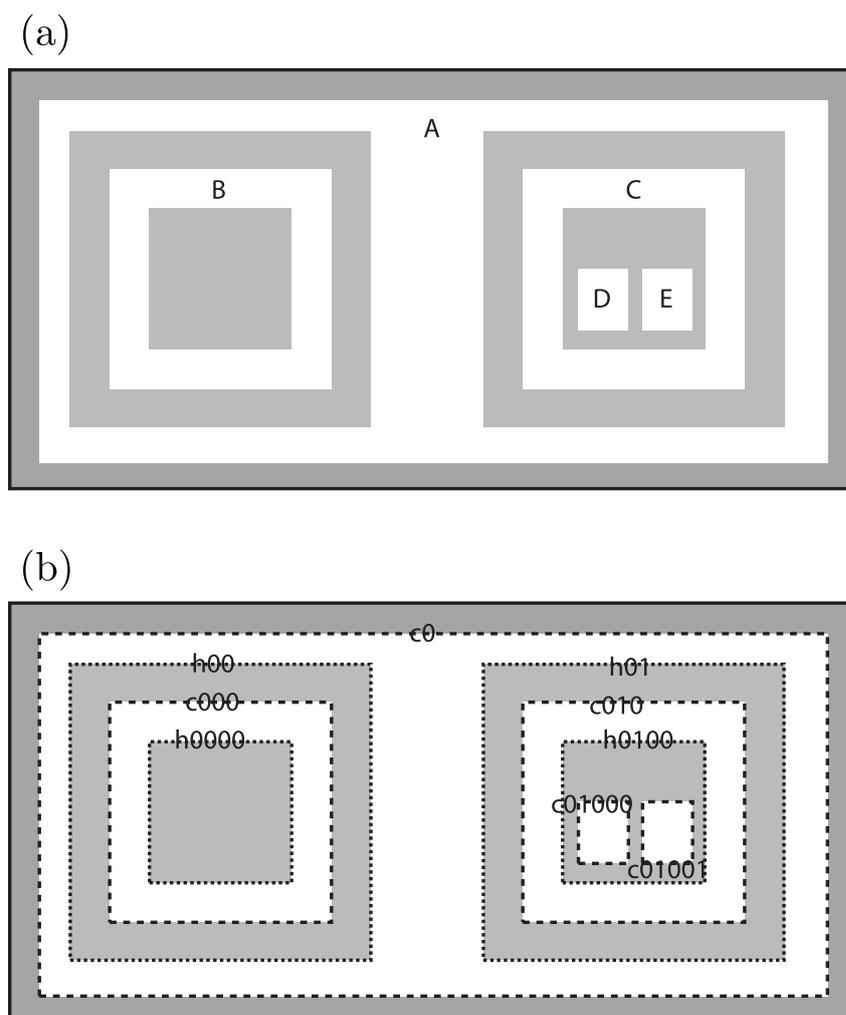


Figura 3.18 – Imagem de teste (a) na qual é aplicado um algoritmo de detecção de contornos e os contornos resultantes (b) que podem ser de 2 tipos, contornos externos (tracejados) e buracos (pontilhados). Fonte: [Bradski e Kaehler \(2008\)](#).

[al. \(2004\)](#). Entretanto, para os casos utilizados neste trabalho, detalhados no capítulo 4, não é necessário a observação da contenção e mesmo a distinção entre contorno externo e/ou interno, de modo que a sequências representando as localizações dos pontos dos contornos podem ser ordenadas e tratadas com um único contorno.

### 3.4.2 Detecção de cantos

Um aspecto dos algoritmos de visão computacional é que eles se aplicam a imagem como um todo, independente do conteúdo da mesma. Desta forma, estas características visuais observadas nos resultados de uma simulação numérica, as estruturas de lobos e fendas, podem ser interpretadas como estas *feições* (ou características) dos algoritmos de visão computacional.

Com o intuito de identificar e acompanhar uma ou mais características da frente

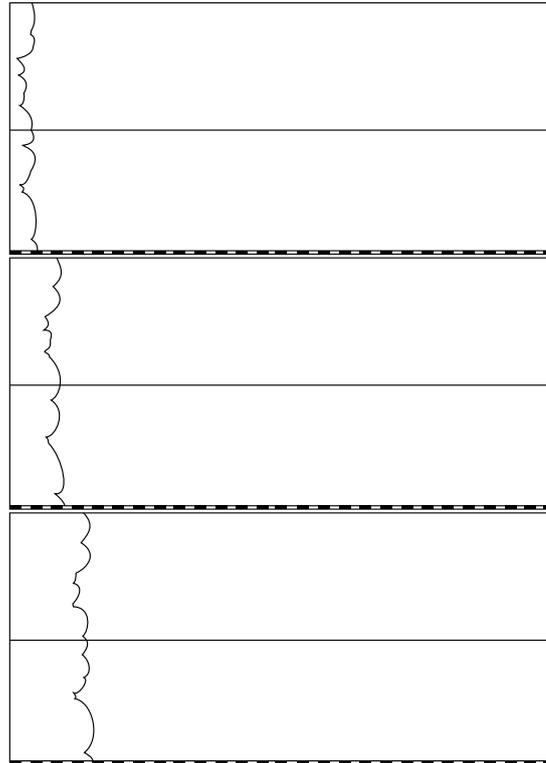


Figura 3.19 – Os três primeiros quadros de uma animação resultante da extração das linhas de frente individuais da Figura 1.3, proveniente do experimento de Simpson (1972).

da corrente de gravidade por meio do deslocamento desta frente usando visão computacional, é necessário um conjunto de imagens do escoamento. Cada imagem tendo informação visual relacionada a posição e forma da frente da corrente de gravidade em um determinado tempo. Os algoritmos de visão computacional tratam estas imagens como um uma animação digital ou filme, onde cada imagem é chamada quadro. As imagens podem vir de simulações ou de experimentos, mas também podem ser extraídas de figuras ou ilustrações. Por exemplo, as linhas representando a frente na Figura 1.3 mostrando os resultados do experimento de Simpson (1972) podem ser extraídas, e esta imagem em particular (Figura 1.3) resultaria em uma animação com 20 quadros dos quais os primeiros três quadros podem ser vistos na Figura 3.19. Em particular, as fendas são tratadas como cantos e existem vários algoritmos para detecção de cantos, tais como o detector de cantos de Harris e Stephens (1988) e o detector de cantos de Shi-Tomasi (SHI; TOMASI, 1994).

O detector de cantos de Harris (HARRIS; STEPHENS, 1988) começa calculando a diferença de intensidade de imagem como

$$E(\Delta x_1, \Delta x_3) = \sum_{x_1, x_3} \left\{ \underbrace{w(x_1, x_3)}_{\text{função janela}} \left[ \underbrace{I(x_1 + \Delta x_1, x_3 + \Delta x_3)}_{\text{intensidade deslocada}} - \underbrace{I(x_1, x_3)}_{\text{intensidade}} \right]^2 \right\}, \quad (3.7)$$

onde  $E$  é a diferença de intensidade para um deslocamento  $(\Delta x_1, \Delta x_3)$  em ambas as

direções,  $x_1$  e  $x_3$ ,  $I(x_1, x_3)$  é a função de intensidade de imagem para uma imagem bi-dimensional,  $I(x_1 + \Delta x_1, x_3 + \Delta x_3)$  é a função de intensidade de imagem deslocada por  $\Delta x_1, \Delta x_3$ .  $w(x_1, x_3)$  é uma função de janela que pode ser retangular ( $w(x_1, x_3) = 1$ ) ou Gaussiana e dá os pesos aos pixels abaixo da janela. Uma janela Gaussiana como

$$w(x_1, x_3) = \exp - \left( \frac{x_1^2 + x_3^2}{2\sigma^2} \right) \quad (3.8)$$

é recomendada quando a resposta da diferença de intensidade ( $E$ ) é ruidosa (HARRIS; STEPHENS, 1988), o parâmetro  $\sigma$  deve ser escolhido de acordo com o nível de ruído. Para detecção de cantos, esta diferença de intensidade (Eq. 3.7) deve ser maximizada e, para isso a intensidade deslocada é maximizada.

Após a aplicação da expansão por séries de Taylor na Eq. (3.7), podemos aproximar a diferença de intensidade por

$$E(\Delta x_1, \Delta x_3) \approx \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_3 \end{bmatrix} \mathbf{M} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

e a matriz  $\mathbf{M}$  como

$$\mathbf{M} = \sum_{x_1, x_3} w(x_1, x_3) \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial x_1} & \frac{\partial I}{\partial x_1} & \frac{\partial I}{\partial x_1} & \frac{\partial I}{\partial x_3} \\ \frac{\partial I}{\partial x_1} & \frac{\partial I}{\partial x_3} & \frac{\partial I}{\partial x_3} & \frac{\partial I}{\partial x_3} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Assim, de acordo com Harris e Stephens (1988), para determinar se a janela contém um canto ou não, é necessário calcular a pontuação  $R$  como

$$R = \det(\mathbf{M}) - k \text{trace}(\mathbf{M})^2, \quad (3.11)$$

onde  $k$  é uma constante usada como parâmetro de ajuste, normalmente com valores entre 0,04 e 0,06. Se  $|R|$  é pequeno, a região é plana; se  $R < 0$ , a região é uma borda e se  $R$  é grande a região é um canto. Operando  $\det(\mathbf{M}) = \chi_1 \chi_2$  e  $\text{trace}(\mathbf{M}) = \chi_1 + \chi_2$ , sendo  $\chi_1$  e  $\chi_2$  os autovalores de  $\mathbf{M}$ , podemos expressar a pontuação  $R$  como

$$R = \chi_1 \chi_2 - k (\chi_1 + \chi_2)^2. \quad (3.12)$$

Shi e Tomasi (1994) propuseram um método mais simples para avaliar esta função de pontuação como

$$R_{ST} = \min(\chi_1, \chi_2). \quad (3.13)$$

Se  $R_{ST}$  é maior que um valor mínimo, a região contém um canto, i.e., apenas quando  $\chi_1$  e  $\chi_2$  são superiores este mínimo,  $\chi_{min}$  ele é considerado um canto. Por meio desta abordagem a classificação quanto a plano, borda ou canto passa a depender dos autovalores (Figura 3.20). Neste sentido, para avaliar o limiar de  $\chi_{min}$  são utilizados os valores mínimos de  $\chi_1, \chi_2$  da matriz  $\mathbf{M}$  (Eq. 3.10).

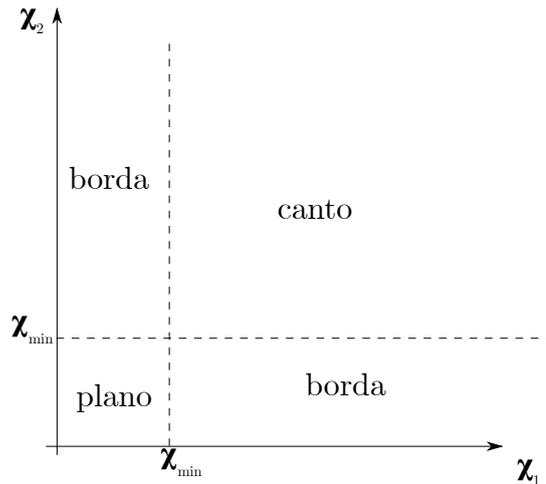


Figura 3.20 – De acordo com a magnitude dos autovalores pode-se avaliar se uma região analisada é plana (ambos autovalores são pequenos), borda ( $\chi_1$  é pequeno e  $\chi_2$  é grande ou vice-versa) ou canto quando ambos os autovalores são grandes.

### 3.4.3 Fluxo Óptico

Fluxo Óptico é o padrão de movimento aparente de objetos, superfície ou cantos causado pelo movimento relativo entre um observador e uma câmera. Em visão computacional, determinar o fluxo óptico corresponde a determinar o campo de velocidade que descreve o movimento de cada pixel (BARRON et al., 1994). Sendo  $I(x_1, x_3, t)$  a função de intensidade de brilho do ponto  $(x_1, x_3)$  no quadro número  $t$  em uma sequência de imagens. Podemos assumir que em um pequeno intervalo de tempo ( $\Delta t = 1$ ) um objeto pode mudar de posição, embora sua reflectividade e iluminação não varie, o que pode ser modelado por

$$I(x_1 + v_1, x_3 + v_3, t + \Delta t) \approx I(x_1, x_3, t). \quad (3.14)$$

Aplicando a Expansão em Séries de Taylor na Eq. 3.14 temos

$$I(x_1 + \Delta x_1, x_3 + \Delta x_3, t + \Delta t) = I(x_1, x_3, t) + \frac{\partial I}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial I}{\partial x_3} \Delta x_3 + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t + \text{h.o.t.} \quad (3.15)$$

Para que a 3.15 continue válida ao se ignorar os termos de alta ordem, é necessário que a condição

$$\frac{\partial I}{\partial x_1} v_1 + \frac{\partial I}{\partial x_3} v_3 + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t = 0 \quad (3.16)$$

seja satisfeita e  $\Delta t = 1$  (incremento de um quadro), assim temos a primeira restrição de fluxo óptico expressa como

$$\nabla I \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

onde o gradiente de intensidade de imagem é definido como

$$\nabla I = \left[ \frac{\partial I}{\partial x_1}, \frac{\partial I}{\partial x_3} \right]^T \quad (3.18)$$

e  $v = [v_1, v_3]^T$  é o vetor de fluxo óptico.

Assumir que essa condição é cumprida é equivalente a considerar que todos os pixels no quadro  $t$  vão permanecer intactos na imagem no quadro  $t + \Delta t$  e não vão variar em brilho. Isto é uma suposição forte para casos reais. O erro associado a medidas de fluxo óptico em casos reais tende a ser alto, uma vez que não há garantias que pixels não serão criados ou destruídos a cada quadro.

#### 3.4.4 Problema da abertura

Considerando apenas a condição principal do fluxo óptico (Eq. 3.17), é possível estimar a componente de movimento da direção do gradiente espacial. Mas esta condição não é suficiente para estimar corretamente as outras componentes do campo. Esta limitação é conhecida como “problema da abertura”.

Este problema é acentuado em regiões de brilho homogêneo, onde o gradiente da imagem é nulo. Nestas regiões qualquer ponto na vizinhança pode ser o ponto correspondente na outra imagem. Desta forma, as medidas de fluxo óptico se tornam ambíguas e esta condição é insuficiente.

A Figura 3.21 ilustra o problema da abertura. Ao longo das bordas, o fluxo óptico representa apenas movimentos na direção do vetor normal. No canto (2), há informação suficiente do gradiente local, desta forma o vetor de fluxo óptico representa corretamente a medida do movimento.

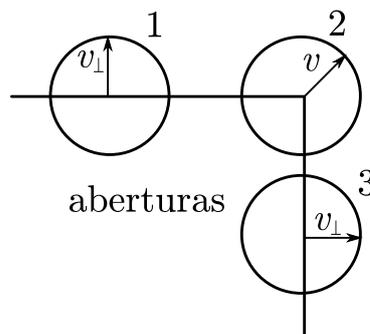


Figura 3.21 – Através das aberturas 1 e 3 apenas movimentos perpendiculares (vetor normal) das bordas do quadrado podem ser estimados devido a falta de estrutura local. Dentro da abertura 2, no ponto de canto, o movimento pode ser completamente medido uma vez que há estrutura local o suficiente; ambos os movimentos perpendiculares são visíveis. Fonte: adaptado de [Beauchemin e Barron \(1995\)](#).

#### 3.4.5 Abordagens de Fluxo Óptico

Em virtude do problema da abertura, é necessário definir condições de contorno para que seja possível detectar o fluxo óptico não apenas na direção do gradiente. A

partir desta necessidade, surgem várias abordagens baseadas em diferentes conjuntos de condições de contorno. Segundo [Barron et al. \(1994\)](#) estas abordagens podem ser classificadas como:

- Métodos diferenciais: as condições de contorno adicionais são baseadas em derivadas espaço-temporais do brilho da imagem ou consideram versões filtradas das imagens. Estas abordagens podem ser classificadas em locais (fluxo óptico esparso) e globais (fluxo óptico denso) dependendo da quantidade de informação usada para estimar o fluxo óptico. Os métodos de [Horn e Schunck \(1981\)](#), [Lucas e Kanade \(1981\)](#) e [Nagel \(1987\)](#) são exemplos de métodos diferenciais.
- Métodos baseados em regiões: baseados em medidas de similaridade entre os pixels na primeira imagem e os pixels candidatos na segunda imagem. Estes métodos são menos sensíveis ao ruído comparados com os métodos diferenciais. Entretanto, são computacionalmente mais caros em virtude do número de comparações necessárias. Alguns métodos são usados em conjunto com técnicas de extração de características para tentar reduzir o custo computacional. [Bergen et al. \(1992\)](#) é um exemplo de método hierárquico baseado em regiões.
- Métodos baseados em energia: baseados em energia e filtros sintonizados pela velocidade. Alguns dos métodos desta abordagem utilizam o domínio da frequência (Fourier) e poderiam ser chamados métodos espectrais. Um exemplo de método que utiliza esta abordagem é o de [Heeger \(1988\)](#)
- Métodos baseados em fase: neste método a velocidade é definida como a fase nos valores de saída em filtros passa banda. Exemplos dessa abordagem são os métodos de [Waxman et al. \(1988\)](#) e [Fleet e Jepson \(1990\)](#).

#### 3.4.6 Método de Lucas-Kanade

O método de [Lucas e Kanade \(1981\)](#), utiliza uma abordagem diferencial e local. Métodos locais também são conhecidos como métodos de fluxo óptico esparso. E, segundo a revisão de [Barron et al. \(1994\)](#), é um método que alia precisão e desempenho. No contexto deste trabalho o fluxo óptico será utilizado para acompanhar características (fendas) detectadas previamente por meio de detecção de cantos. Por este motivo, um dos critérios na escolha do método de fluxo óptico utilizado é que este seja um método esparso (ou local) e a acurácia do método será avaliada qualitativamente neste trabalho. O desempenho e velocidade do algoritmo não é uma questão fundamental, mas por questões práticas, preferimos o uso de um método que permitisse a realização de mais ensaios nos dados obtidos.

Obter o fluxo óptico entre duas funções  $G(x)$  e  $F(x)$  significa determinar o vetor de deslocamento  $d$  de modo que  $F(x + d) = G(x)$ . Lucas e Kanade (1981) definem formas de se medir o erro  $G(x)$  e  $F(x + d)$  em uma região de interesse  $\Omega$ . Para simplificar a análise, podemos assumir um caso unidimensional onde  $x$  é um valor escalar, assim é possível estimar o fluxo óptico como uma aproximação do deslocamento  $d$  entre duas funções  $F(x)$  e  $G(x)$  considerando  $G(x) = F(x + d)$  (figura 3.22).

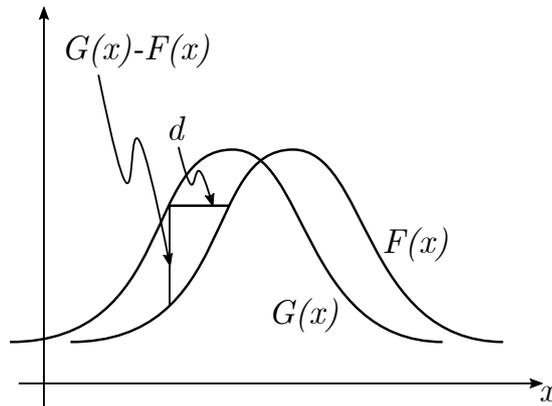


Figura 3.22 – Funções unidimensionais  $F(x)$ ,  $G(x)$  e o deslocamento  $d$ . Adaptado de Beauchemin e Barron (1995).

Este método resolve o fluxo óptico considerando uma janela ponderada em torno de cada pixel ( $\Omega$ ) e faz um ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Lucas e Kanade (1981) assumem que em uma pequena vizinhança o fluxo é suave. Portanto, considerando as equações definidas na seção 3.4.4, o valor do deslocamento pode ser aproximado pela média

$$d \approx \sum_{x \in \Omega} \frac{G(x) - F(x)}{F'(x)} \quad (3.19)$$

Esta aproximação pode ser melhorada, uma vez que pontos mais próximos da vizinhança resultam em valores mais exatos de  $\frac{\partial F}{\partial x}$ . Portanto, esta abordagem combina múltiplas estimativas de  $d$  em vários valores de  $x$  fazendo a soma ponderada de derivadas em uma vizinhança pequena definida por

$$d \approx \frac{\sum_{x \in \Omega} \frac{w(x)G(x) - F(x)}{F'(x)}}{\sum_{x \in \Omega} w(x)} \quad (3.20)$$

Esta condição é então generalizada para um deslocamento em mais dimensões:

$$F(\mathbf{x} + d) = F(\mathbf{x}) + d \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} F(d), \text{ com } \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} = \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (3.21)$$

Neste caso, o termo a ser minimizado neste método, para um deslocamento  $d$ , é definido como

$$d = \left[ \sum_{x \in \Omega} \left( \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \cdot [G(\mathbf{x}) - F(\mathbf{x})] \right] \cdot \left[ \sum_{x \in \Omega} \left( \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right) \right]^{-1} \quad (3.22)$$

Normalmente a máscara de ponderação utilizada é uma máscara gaussiana de tamanho independente, variando com a quantidade de elementos vizinhos desejados no processo de cálculo do fluxo óptico. Estendendo a solução ao domínio da imagem, a função de erro a ser minimizada neste método é definida por

$$E_{LK} = \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} w^2(\mathbf{x}) \cdot \left( \nabla I(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (3.23)$$

Finalmente, a solução é dada considerando um sistema linear do tamanho da vizinhança de cada pixel. A maior vantagem deste método quando comparado ao método global de [Horn e Schunck \(1981\)](#) é a reduzida sensibilidade a descontinuidades no fluxo em virtude de considerar a variação sobre uma janela ponderada.

### 3.4.7 Combinando Fluxo Óptico e Detecção de Cantos (KLT)

Implementar um rastreador de feições usando uma combinação de detecção de cantos e fluxo óptico requer um algoritmo iterativo onde novas características possam ser descobertas e certas características possam ser declaradas perdidas. O algoritmo KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) ([SUHR, 2009](#); [TOMASI; KANADE, 1991](#)) combina o detector de cantos de Shi-Tomasi e o fluxo óptico de Lucas-Kanade de forma iterativa. Este algoritmo pode ser implementado segundo o fluxograma da Figura [3.23](#).

O algoritmo também diferencia uma matriz de intensidade para identificar o deslocamento de pixels entre duas imagens, em virtude dessas premissas assumidas ao se aplicar a expansão de Taylor, o deslocamento do pixel deve ser pequeno. Por este motivo não foi possível aplicar o rastreamento em conjuntos de dados com taxas de amostragem pequenas com cuja velocidade da frente seja muito alta. É o caso, por exemplo, do conjunto de 20 quadros obtidos da figura de [Simpson \(1972\)](#) (Figura [1.3](#)), neste caso o deslocamento dos pixels é muito grande.

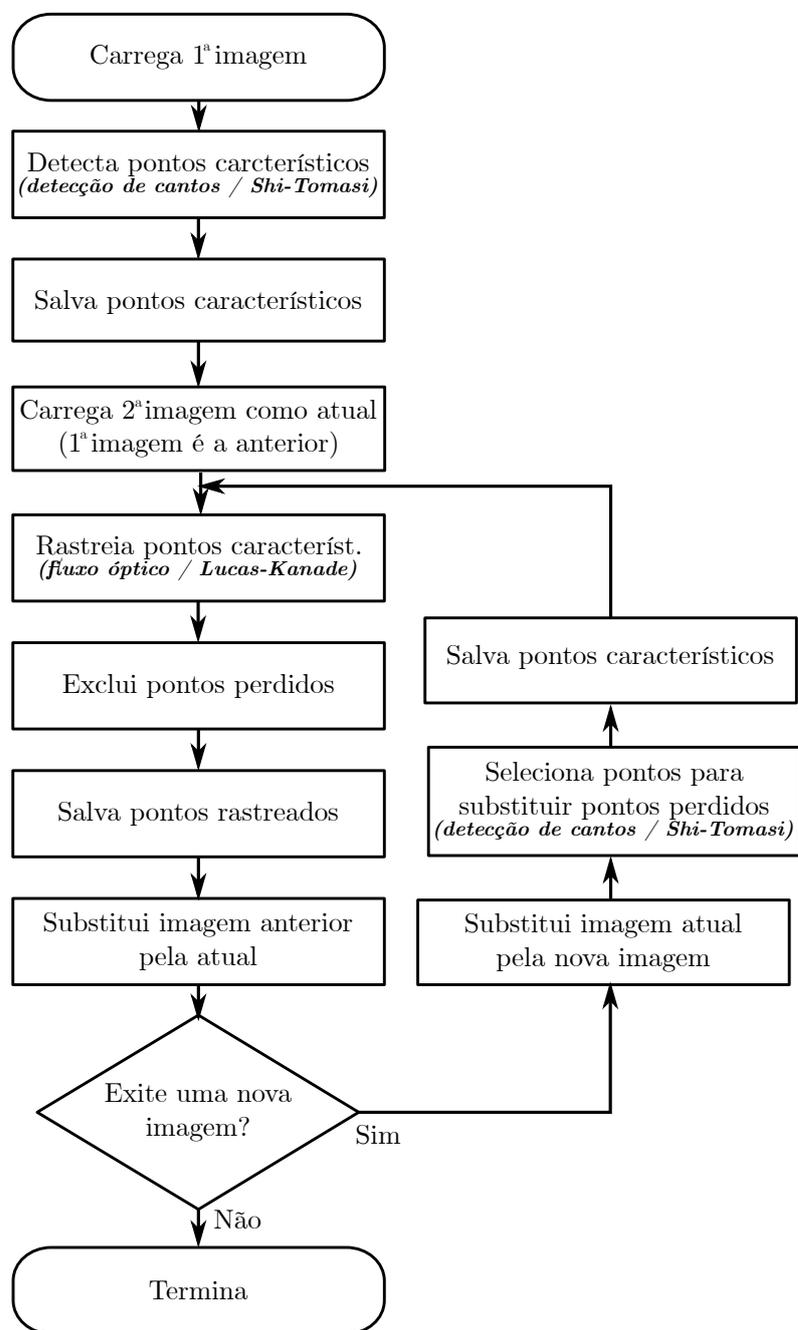


Figura 3.23 – Fluxograma do rastreador de características implementado para rastrear fendas. Fonte: Suhr (2009).



## 4 Metodologia

### 4.1 Primeiros testes

Para os primeiros testes as imagens analisadas foram extraídas de figuras disponíveis nos trabalhos de [Simpson \(1972\)](#) e [Neufeld \(2002\)](#). Em ambos os trabalhos o canal utilizado nos experimentos tem dimensões próximas, em virtude disso foram geradas imagens com resoluções similares. Nos experimentos de [Simpson \(1972\)](#) o canal é de 300mm × 550mm enquanto [Neufeld \(2002\)](#) utiliza um canal de 550mm × 550mm. Este último adquiriu imagens com resoluções de 512 × 512 pixels e disponibiliza seus resultados figuras em formato vetorial, enquanto no primeiro estão disponíveis apenas figuras de baixa definição. Desta forma, foram geradas imagens com resoluções de 512 × 512 pixels a partir das figuras em formato vetorial de [Neufeld \(2002\)](#) e as figuras de baixa definição de [Simpson \(1972\)](#) foram convertidas para formato vetorial manualmente e então foram geradas imagens com resoluções de 308 × 512 pixels.

Usando a função de pontuação de [Shi e Tomasi \(1994\)](#) (Eq. 3.13), descrita na seção 3.4.2, podemos assumir que as inflexões mais acentuadas na função da frente, as fendas, são classificadas como cantos, enquanto os lobos são classificados como bordas ou planos. A Figura 4.1 mostra o resultado obtido com um protótipo usando a implementação do detector de cantos de Shi-Tomasi disponível da biblioteca de visão computacional OpenCV em um conjunto de dados composto de uma animação com 20 quadros obtidos do experimento do lock-exchange de [Simpson \(1999\)](#) extraídos da figura 1.3. Para este teste em particular, foi apenas utilizado o detector de cantos de Shi-Tomasi para cada quadro, além disso os cantos foram marcados com cores aleatoriamente diferentes para evidenciar a distinção entre cantos próximos. Até este ponto, uma avaliação quantitativa não pode ser feita devido ao pequeno número de fendas marcadas na imagem original. Apesar disso, numa inspeção visual qualitativa comparando com a ilustração original de [Simpson \(1972\)](#) (Figura 1.3), percebe-se que todas as fendas foram marcadas corretamente, e até fendas muito próximas, que o trabalho original assumiu como sendo uma única fenda.

O mesmo teste qualitativo, aplicando detecção de cantos em cada quadro de uma animação, foi conduzido utilizando um conjunto de dados com 76 imagens extraídas de uma figura disponível no trabalho de [Neufeld \(2002\)](#). Neste caso os resultados parecem qualitativamente menos exatos e podem ser vistos na Figura 4.2 com as fendas detectadas como cantos. Embora os resultados mostrem diferenças, eles não são tão discrepantes. Entretanto, como não há análise de exatidão nos dados originais do autor, a avaliação até este ponto só pode ser feita de forma qualitativa.

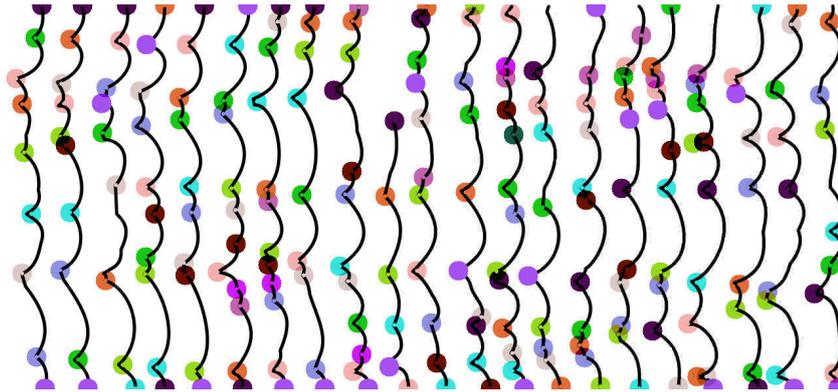


Figura 4.1 – Resultado da aplicação do detector de cantos de Shi-Tomasi nos dados obtidos da Figura 1.3 que ilustra o experimento de Simpson (1972). Os cantos foram marcados com cores aleatoriamente diferentes para evidenciar a distinção entre cantos próximos

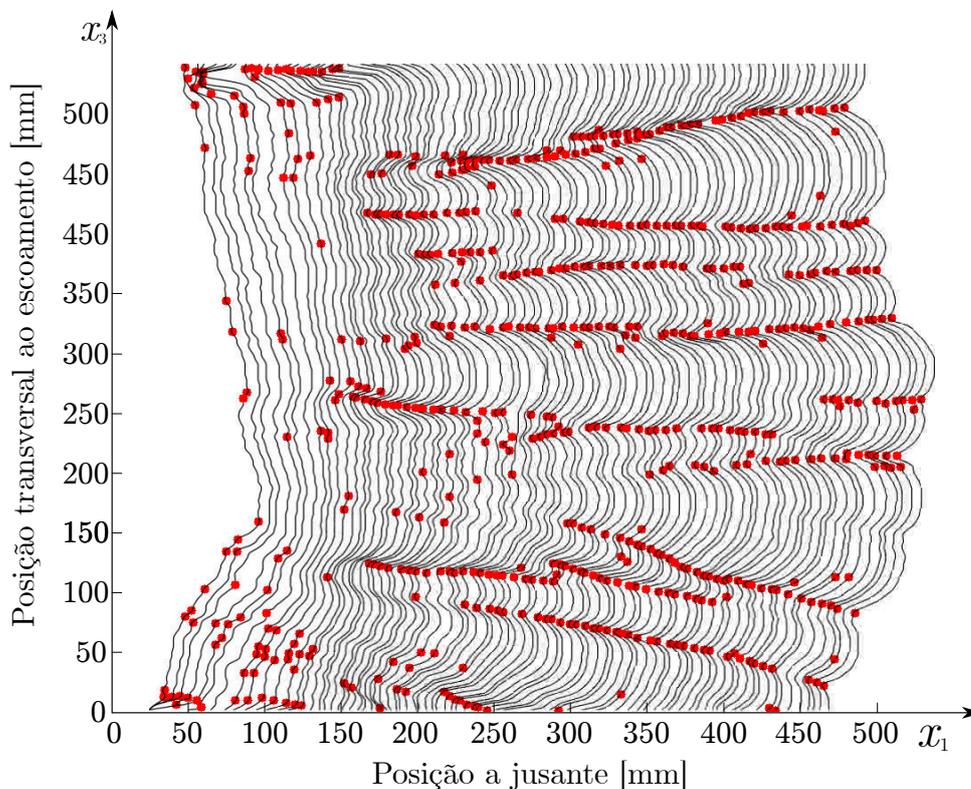


Figura 4.2 – Fendas marcadas usando detecção de cantos, obtidas usando o mesmo protótipo com os dados extraídos da ilustração original de Neufeld (2002) (mostrada na figura 3.15). Os pontos vermelhos marcam as fendas. Fonte: Adaptado de Neufeld (2002).

## 4.2 Obtenção de dados

Embora testes iniciais tenham sido conduzidos utilizando-se dados extraídos de ilustrações de publicações relacionadas aos estudos das correntes de densidade e estes testes tenham se mostrado bastante promissores, não é possível uma avaliação quantitativa adequada do método proposto tomando como base estes dados. Para uma avaliação

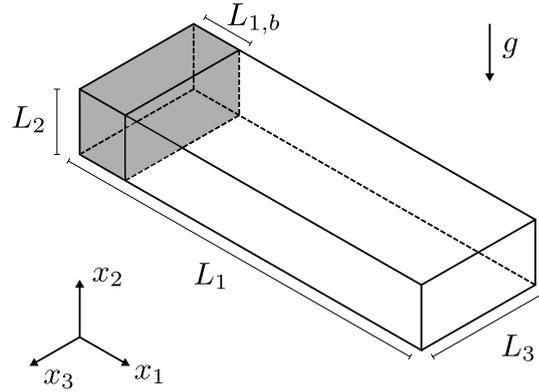


Figura 4.3 – Visualização esquemática da condição inicial de uma corrente de gravidade na configuração *lock-release*.

quantitativa do processo foram realizadas simulações numéricas de um escoamento na configuração *lock-release* plana para diferentes números de Reynolds, sendo a massa específica da corrente de gravidade e do fluido ambiente, a mesma em todos os três casos simulados, assim como as dimensões do canal. Nesta seção serão detalhados os casos simulados e como as medidas das larguras dos lobos foram realizadas para efeito de comparação com as localizações das fendas feitas por técnicas de visão computacional.

#### 4.2.1 Simulações realizadas

Como descrito anteriormente, a configuração *lock-release* plana consiste na rápida liberação de um volume finito de um fluido denso em um volume de um fluido mais leve pela remoção de uma barreira. A Figura 4.3 retrata a condição inicial deste arranjo canônico, onde  $x_1$  é a direção do fluxo,  $x_2$  a direção vertical e  $x_3$  a direção transversal. Nesta configuração de escoamento, o fluido denso é representado pelo volume  $L_{1,b} \times L_2 \times L_3$  como mostrado na Figure 4.3. Com a remoção da barreira em  $t_0$ , ambos os fluidos entram em contato, ocorre uma conversão direta da energia potencial gravitacional em energia cinética devido aos efeitos de flutuabilidade, formando uma corrente de gravidade que se propaga horizontalmente.

É assumido para esta configuração que o escoamento é compressível sob as aproximações de Boussinesq. As equações governantes correspondentes, sob estas hipóteses, no sistema de coordenadas cartesiano  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T$ , são dadas na forma adimensional como

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} - \varphi \mathbf{e}_2, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \varphi = \frac{1}{ScRe} \nabla^2 \varphi, \quad (4.3)$$

onde  $t$  é o tempo,  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T$  é o campo de velocidade  $p$  é a pressão,  $e_2$  é o vetor unitário na direção vertical,  $Re$  é o número de Reynolds,  $Sc$  o número de Schmidt e  $\varphi$  é um campo escalar adimensional que descreve a diferença de massa específica entre os fluidos  $\Delta\rho$ . O número de Reynolds em tal configuração é definido como

$$Re = \frac{\tilde{H}}{\nu} \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \tilde{g} \tilde{H}}, \quad (4.4)$$

onde  $\tilde{H}$  é o comprimento característico, no escoamento de configuração *lock-release* a altura do canal é um escolha conveniente,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\tilde{g}$  é a aceleração gravitacional. O número de Schmidt é definido como a razão entre a viscosidade cinemática do fluido e a difusividade mássica. Para manter o custo computacional mínimo, é adotado  $Sc = 1$ .

As condições de contorno consideradas para a velocidade são: sem deslizamento em  $x_2 = 0$ , deslizamento livre em  $x_1 = 0$ ,  $x_1 = L_1$  e  $x_2 = 1$ ; e para o campo escalar sem fluxo em  $x_1 = 0$ ,  $x_1 = L_1$ ,  $x_2 = 0$  e  $x_2 = 1$ ; periódica na direção  $x_3$  para os campos escalar e de velocidade. A condição inicial do campo escalar é descrita com o uso de uma função suave para evitar descontinuidades locais

$$\varphi(\mathbf{x}, 0) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \left[ \sqrt{ReSc} (x_1 - L_{1,b}) \right]. \quad (4.5)$$

Uma perturbação aleatória, com amplitude  $O(10^{-1})$  é imposta em todas as componentes do campo de velocidade localizadas na vizinhança da posição da barreira ( $x_1 = L_{1,b}$ ).

As simulações foram conduzidas com o código paralelo de fonte aberto Incompact3D (Laizet; Lamballais, 2009) projetado para simulação numérica direta (DNS<sup>1</sup>) e simulações de grandes escalas (LES<sup>2</sup>) de escoamentos incompressíveis. O mesmo é baseado em esquemas de diferenças finitas compactos de sexta ordem para discretização espacial (LELE, 1992). O termo não linear da equação de momento é discretizado na forma antissimétrica para minimizar erros de *aliasing* e aumentar a estabilidade (KRAVCHENKO; MOIN, 1997). Um método Adams-Bashforth explícito é utilizado na integração temporal. A pressão é obtida com o auxílio de passo de tempo fracionado (método predição/correção) resolvendo a equação de Poisson no espaço espectral com o auxílio da Transformada Rápida de Fourier utilizando um pacote de computação distribuída.

Baseado no trabalho de Cantero et al. (2007b), três simulações numéricas na configuração *lock-release* foram conduzidas variando número de Reynolds ( $Re$ ) e mantendo o tamanho de domínio computacional constante, considerado como  $(L_1 \times L_2 \times L_3) =$

<sup>1</sup> Direct Numerical Simulation

<sup>2</sup> Large Eddy Simulations

Tabela 4.1 – Parâmetros numéricos. Todas as simulações têm  $L_1 = 25$ ,  $L_{1,b} = 1$ ,  $L_2 = 1$ ,  $L_3 = 4$  e  $Sc = 1$ .

Caso	$Re$	$n_1 \times n_2 \times n_3$	$\Delta t$	$t_f$	Abordagem numérica
LR895	895	$1351 \times 55 \times 216$	$10^{-3}$	160	DNS
LR3450	3450	$801 \times 93 \times 128$	$10^{-3}$	120	ILES
LR8950	8950	$1601 \times 145 \times 256$	$5 \times 10^{-4}$	90	ILES

( $25 \times 1 \times 4$ ) com  $L_{1,b} = 1$ . Este domínio computacional corresponde a série “ajuste de liberação plana pequena” de [Cantero et al. \(2007b\)](#), entretanto foi utilizado um domínio maior nas direções  $x_1$  e  $x_3$  para aumentar a amostragem das estruturas de lobos e fendas quando comparado com o estudo de referência. Os parâmetros numéricos, incluindo o número de pontos de malha em cada direção ( $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$ ), incremento do passo de tempo ( $\Delta t$ ), tempo de simulação ( $t_f$ ) e a abordagem correspondente para cada simulação estão resumidos na tabela 4.1. A simulação LR895 é resolvida usando Simulação Numérica Direta (DNS), enquanto os casos LR3450 e LR8950 com uma abordagem Implícita de Simulação de Grandes Escalas (ILES) baseado no método proposto por [Dairay et al. \(2017\)](#). A abordagem ILES é empregada para reduzir o custo computacional das simulações uma vez que serão utilizados números de Reynolds elevados que são considerados bons para testar o método proposto de detecção e rastreamento de características em virtude da baixa resolução de malha quando comparada com a abordagem DNS.

Com o intuito de se obter uma melhor comparação dos dados com simulação numérica e as leis de escala propostas por [Simpson \(1972\)](#) e traçar figuras similares a Figura 1.3 é usada a projeção da corrente de gravidade no plano ( $x_1, x_3$ ) para cada tempo. Tal projeção do campo tridimensional  $\varphi$  deve ser o equivalente numérico a tirar uma fotografia a partir do topo do canal e tem a seguinte forma:

$$\varphi_p(x_1, x_3, t) = \int_0^1 \varphi(\mathbf{x}, t) dx_2. \quad (4.6)$$

Combinando as simulações numéricas e o tratamento de dados proposto, a análise é validada comparando os resultados com as leis de escala propostas por [Simpson \(1972\)](#). A lei de escala de interesse neste trabalho descreve o comprimento característico médio dos lobos ( $\bar{\lambda}$ ) normalizada pela altura ( $h$ ), como uma função do número de Reynolds da frente ( $Re_f$ ):

$$\frac{\bar{\lambda}}{h} = 7.4 Re_f^{-0.39 \pm 0.02}, \quad \text{with } Re_f \geq 200, \quad (4.7)$$

onde o número de Reynolds da frente é obtido ajustando a escala do número de Reynolds global ( $Re$ ) com a altura adimensional da cabeça e a velocidade da frente, na forma [Cantero et al. \(2007b\)](#):

$$Re_f = u_f h Re. \quad (4.8)$$

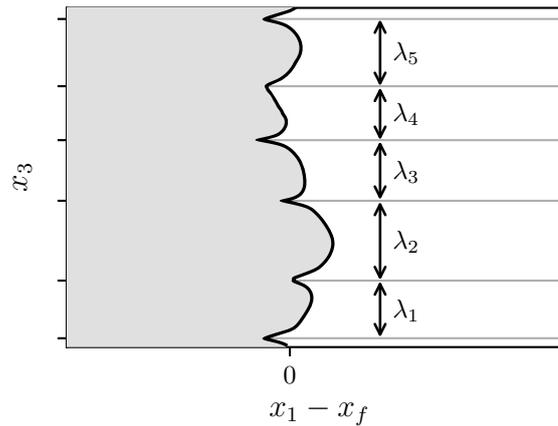


Figura 4.4 – Exemplo da determinação da largura de lobos a partir de uma isolinha de concentração no plano  $(x_1, x_3)$  localizado no fundo do canal ( $x_2 = 0$ ) para um instante de tempo dado. Fonte: [Farenzena \(2020\)](#)

Para a avaliação da Eq. (4.7), [Simpson \(1972\)](#) considera que a altura da cabeça possui um valor constante medindo metade de  $H$  (i.e.  $h = 0.5$ ).

De acordo com [Cantero et al. \(2007b\)](#), a velocidade da frente é derivada da posição da frente na forma:

$$u_f(t) = \frac{dx_f}{dt}, \quad (4.9)$$

e a posição da frente ( $x_f$ ) é definida, para cada instante de tempo, como o valor máximo de  $x_1$  onde a média transversal de  $\varphi_p$  é maior que  $10^{-2}$ .

#### 4.2.2 Determinação das largura das estruturas de lobos e fendas

Objetivando a comparação dos resultados obtidos por meio de simulação numérica, em ambas configurações de escoamento, com a relação empírica descrita pela Eq. (3.6), é necessário medir a largura das estruturas de lobos e fendas nos dados adquiridos. No presente estudo, esta grandeza é medida como distância entre mínimos locais de uma isolinha do campo de concentração escalar no plano  $(x_1, x_3)$  localizado no fundo do canal ( $x_2 = 0$ ) para cada instante de tempo, conforme apresentado na Figura 4.4. Os isocontornos são obtidos usando um valor de referência  $\varphi_0 = 10^{-2}$ , por meio da rotina `matplotlib.pyplot.contour` presente na biblioteca `matplotlib` da linguagem de programação Python, enquanto que os mínimos locais são localizados utilizando a rotina `scipy.signal.argrelextrema` presente na biblioteca `scipy` da mesma linguagem de programação.

Uma vez que os mínimos locais da isolinha de concentração escalar são localizados e as diferenças entre pontos de mínimos vizinhos são quantificadas, calcula-se a

média de distância entre todos os intervalos na forma:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (4.10)$$

onde  $N$  é o número de intervalos encontrados e  $\lambda_i$  o comprimento dos intervalos. Este processo é repetido para cada instante de tempo.

#### 4.2.3 Obtendo dados em outras configurações de *lock-release*

Além dos dados obtidos das simulações realizadas na configuração de *lock-release* canalizado, também foram gerados conjuntos de dados para as configurações canal-bacia e axi-simétrica. Estes dados foram extraídos de imagens em formato vetorial contendo linhas de contorno da frente da corrente de gravidade. Como visto na seção 3.2, para essas duas configurações não foram encontradas na literatura funções matemáticas que permitissem uma avaliação quantitativa dos resultados. No entanto, [Cantero et al. \(2007a\)](#) apresentam medidas do comprimento característico dos lobos para uma configuração axi-simétrica.

Como conjuntos de dados representando a configuração axi-simétrica, foram utilizadas as imagens disponibilizadas no trabalho de [Cantero et al. \(2007a\)](#) para dois os dois casos simulados nesta configuração ( $Re = 3450$  e  $Re = 8950$ ). Para a configuração canal-bacia foram utilizadas imagens disponibilizadas no trabalho de [Frantz et al. \(2017\)](#) para os três casos simulados pelos autores nesta configuração: uma DNS configuração de domínio fechado; DNS em configuração de domínio aberto e LES em configuração de domínio aberto.

Para esses conjuntos de dados, as imagens foram extraídas de modo que cada passo de tempo distinto correspondesse a uma imagem com um único contorno representando a frente da corrente de gravidade (Figura 4.5). Estas imagens foram agrupadas em ordem sequencial, quadro-a-quadro, e aplicadas nos algoritmos avaliados neste trabalho.

### 4.3 Aplicando os algoritmos nos dados

O algoritmo proposto, como forma de detectar e rastrear as fendas se deslocando na porção frontal de correntes de gravidade utiliza a técnica KLT, detalhada na seção 3.4.7. Este algoritmo tem uma etapa de detecção de pontos característicos e uma etapa de acompanhamento destes pontos entre duas imagens utilizando o algoritmo de fluxo óptico de [Lucas e Kanade \(1981\)](#). Conforme o fluxograma 3.23, o algoritmo KLT utiliza métodos de detecção de cantos para a detecção de pontos característicos. Entretanto, neste trabalho este algoritmo será utilizado com duas abordagens distintas para a detecção de pontos característicos. Uma delas utilizando detecção de cantos e outra a partir

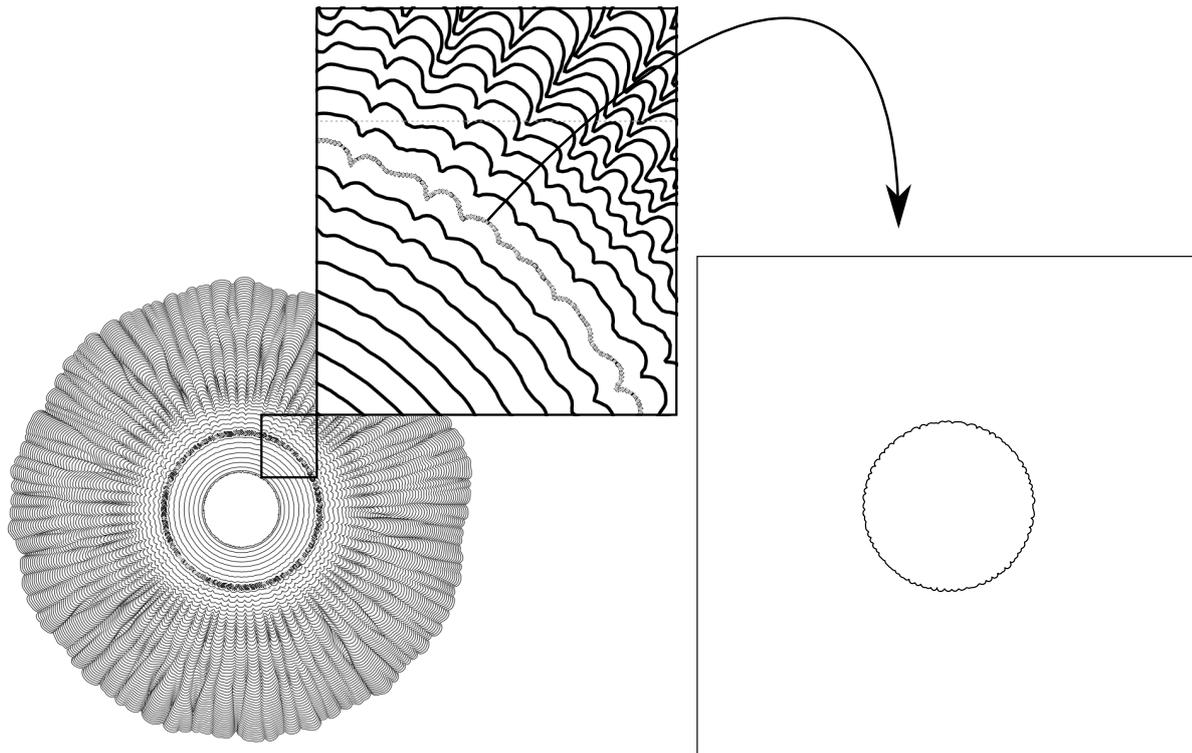


Figura 4.5 – As linhas de contorno da frente da corrente de gravidade são extraídas de figuras em formato vetorial disponibilizadas nos trabalhos de [Cantero et al. \(2007a\)](#), [Frantz et al. \(2017\)](#) e [Francisco et al. \(2018\)](#).

dos mínimos locais identificados na linha de contorno da frente de corrente de gravidade. Estas abordagens são implementadas apenas alterando a técnica de detecção de pontos característicos adotada no método KLT. Na Figura 4.6 são indicadas no fluxograma do método utilizado quais etapas são alteradas para cada uma das abordagens adotadas.

Uma vez concluídas as simulações numéricas, os resultados contendo os campos escalares de concentração para todos os passos de tempo foram pós-processados usando as bibliotecas `numpy`, `matplotlib` e `scipy` disponíveis das distribuições da linguagem Python. Este pós-processamento incluía a projeção do valor escalar da concentração ao longo da altura do canal no fundo, a segmentação dessa projeção em isolinhas de contorno indicando a frente da corrente de gravidade. Desta forma, foram geradas imagens, contendo o contorno da frente, uma imagem para cada posição diferente da frente. Foi adotado um passo de tempo variável de modo que as imagens fossem geradas com uma variação constante da posição da frente.

A implementação do protótipo de software de visão computacional desenvolvido para este trabalho foi feita utilizando a biblioteca de visão computacional de código aberto OpenCV ([BRADSKI; KAEHLER, 2000](#)) usando a linguagem de programação Python. O software desenvolvido utiliza como entrada um conjunto de imagens, onde cada imagem contém um contorno da frente da corrente de gravidade para um dado passo de tempo. Como saída o software informa a coordenada das fendas detectadas, possibilitando a

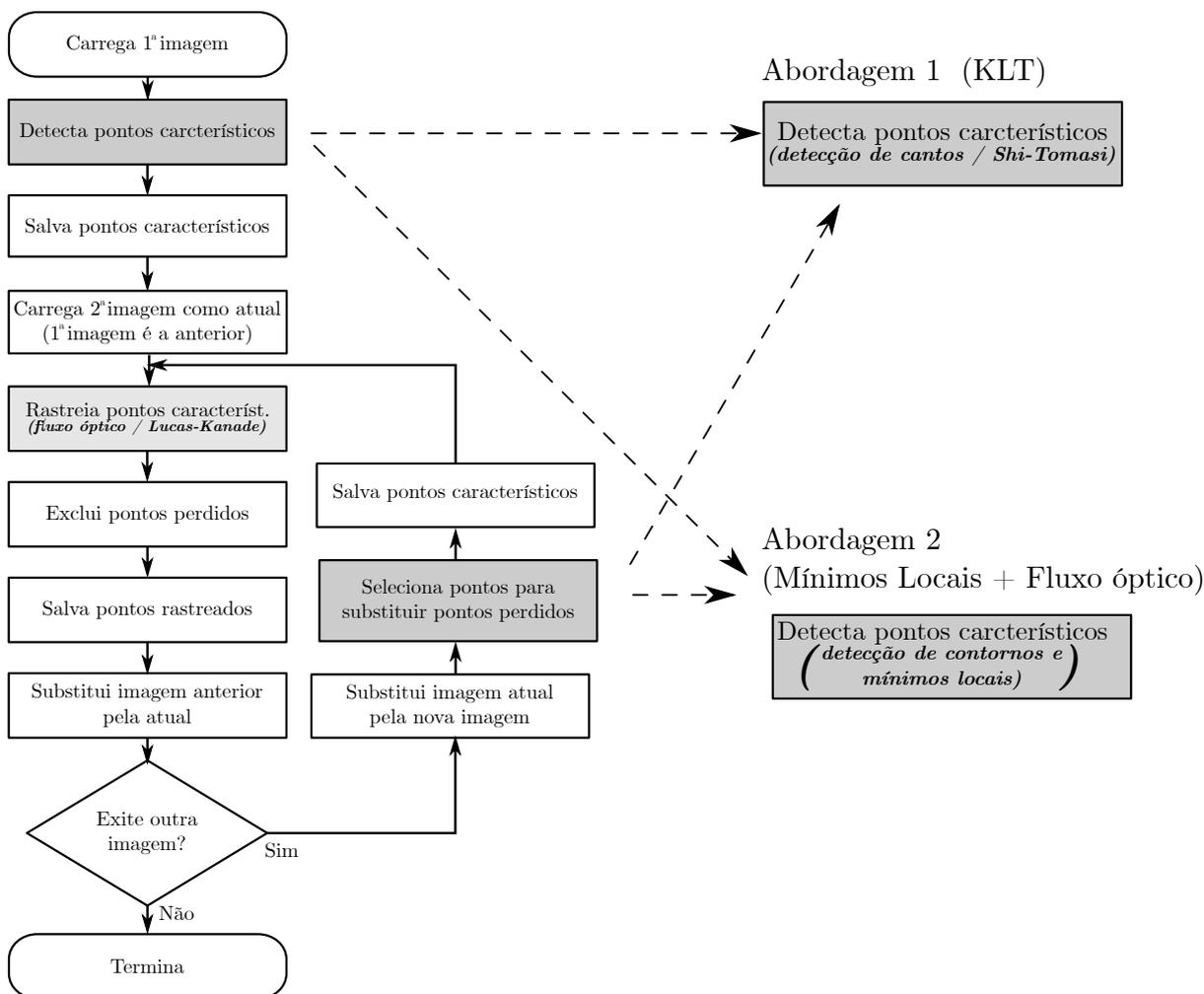


Figura 4.6 – Fluxograma do rastreador de características implementado para rastrear fendas indicando onde o método de detecção de pontos característicos é alterado para cada uma das abordagens. Fonte: Adaptado de Suhr (2009).

medida da largura dos lobos, e também gera uma imagem com o traçado do rastro destas fendas ao longo da evolução da frente no escoamento.

Com o intuito de verificar a acurácia dos métodos propostos, foi definido um padrão com o qual os valores medidos utilizando estes métodos pudessem ser comparados. Foi definido como padrão a utilização de uma função matemática que relacionasse a grandeza medida, neste caso o comprimento característico dos lobos, em função do número de Reynolds da frente da corrente de densidade. A lei de escala definida empiricamente por Simpson (1972) e expressa na Eq. 3.6 relaciona estas grandezas e, a título de comparação, o comprimento característico dos lobos e o valor do número de Reynolds da frente da corrente de gravidade para cada passo de tempo foram medidos diretamente nos conjuntos de dados resultantes da simulação. Desta forma, segundo Balbinot e Brusamarello (2010) a acurácia da medida é o grau de concordância com o valor verdadeiro, convenicionado neste trabalho como o valor definido pela Eq. 3.6. Desta forma, a acurácia será medida pelo percentual de medidas obtidas dentro dos limites de incerteza de medição

do experimento de [Simpson \(1972\)](#).

Como as simulações descritas na seção [4.2.1](#), compreendem apenas a configuração de *lock-release* canalizado, estas medidas quantitativas de acurácia foram realizadas apenas para a configuração de canal. Uma análise qualitativa porém, pôde ser realizada nos conjuntos de imagens obtidas a partir de resultados de outras simulações previamente publicados que usem outras configurações como canal bacia ([FRANTZ et al., 2017](#)) e axi-simétrica ([CANTERO et al., 2007a](#)), já descritos na seção [3.1.4](#).

#### 4.3.1 Biblioteca de visão computacional OpenCV

Segundo [Bradski e Kaehler \(2008\)](#), OpenCV ([BRADSKI; KAEHLER, 2000](#)) é uma biblioteca software de código aberto ([PERENS et al., 1999](#)) de visão computacional disponível em <https://github.com/opencv/opencv>. A biblioteca é escrita na linguagem C e C++ e é compatível com sistemas Linux, Windows e MacOS X. Há um desenvolvimento ativo de interfaces para as linguagens de programação Python, Ruby, Matlab, entre outras. Esta biblioteca foi projetada para eficiência computacional e com foco em aplicações de tempo real.

Esta biblioteca de visão computacional possui implementações de diferentes métodos de visão computacional, dentre eles os métodos de detecção de cantos de [Harris e Stephens \(1988\)](#) e [Shi e Tomasi \(1994\)](#), uma implementação do algoritmo de detecção de contornos de [Suzuki et al. \(1985\)](#) assim como o método de fluxo óptico de [Lucas e Kanade \(1981\)](#). Desta forma foi possível implementar o algoritmo iterativo de detecção e rastreamento de características KLT ([SUHR, 2009](#)).

É importante destacar que as rotinas que dependem do cálculo de autovalores são implementadas utilizando a biblioteca OpenCV. A implementação da função de computa os autovalores desta biblioteca utiliza o método de *Jacobi* ([BRONSHTEIN et al., 2004](#)) que é eficiente para matrizes pequenas. O método de *Jacobi* necessita de um parâmetro de parada que é tamanho máximo dos elementos fora da diagonal da matriz final.

Questões relacionadas ao desempenho e tempo de execução do código protótipo desenvolvido para testar o método não foram consideradas. Embora, para os conjuntos de dados compostos de arquivos de animações com no máximo 256 quadros de imagens de 256 cores com resolução máxima de  $1500 \times 250$  pixels, quando executado em um computador do tipo *desktop* com microprocessador i7 de 7<sup>a</sup> geração, com 32Gbytes de memória RAM, demorou 1 minuto e 31 segundos do início ao fim.

## 5 Resultados e Discussões

### 5.1 Simulações Numéricas

A Figura 5.1 mostra a representação volumétrica do campo de concentração para cada um dos casos simulados em dois instantes diferentes onde o número de Reynolds aumenta de cima para baixo e o tempo aumenta da esquerda para a direita. Em todos os casos são observadas as estruturas de lobos e fendas na região frontal enquanto os vórtices de Kelvin-Helmholtz aparecem apenas nos casos LR3450 e LR8950 nos instantes selecionados. A ausência dos vórtices de Kelvin-Helmholtz no caso LR895 pode ser atribuída ao baixo número de Reynolds.

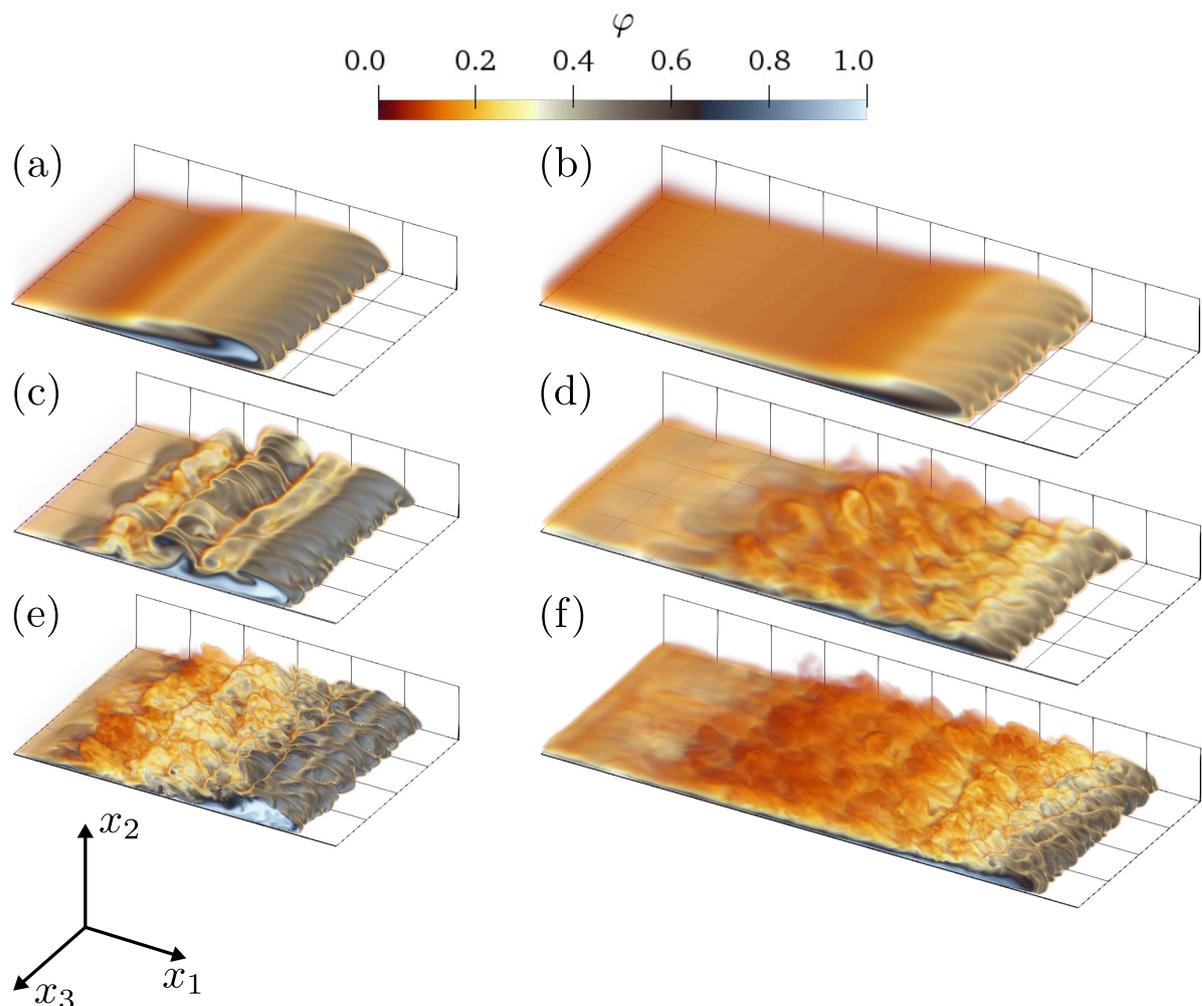


Figura 5.1 – Representação volumétrica do campo de concentração para os casos LR895 (a) e (b), LR3450 (c) e (d) LR8950 (e) e (f) no instante de tempo  $t = 10$  (a), (c) e (e) e  $t = 20$  (b), (d) e (f), onde cada intervalo espacial da grade corresponde a uma unidade de comprimento.

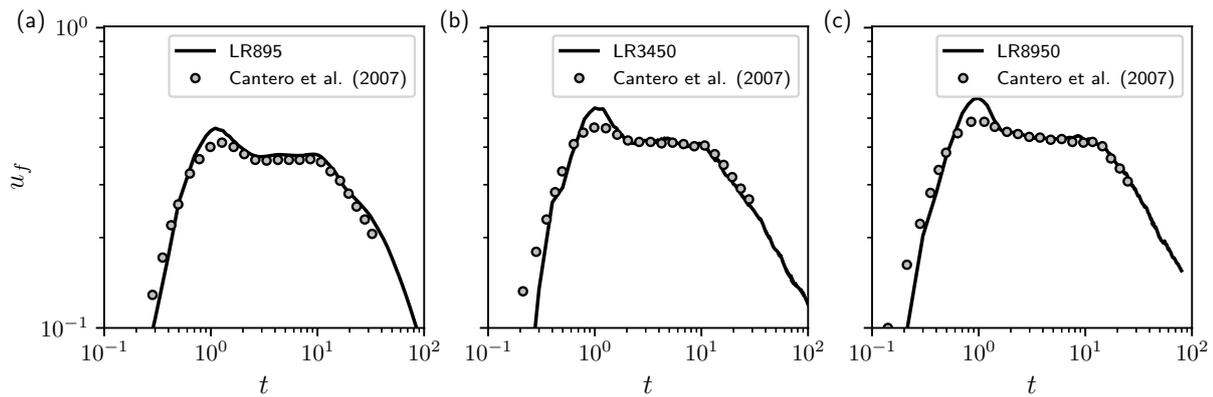


Figura 5.2 – Velocidade da frente em função do tempo da simulação realizada e os dados disponíveis em Cantero et al. (2007b) para  $Re = 895$  (a),  $Re = 3450$  (b) e  $Re = 8950$  (c).

A Figura 5.2 mostra a velocidade da frente como função do tempo, determinada usando o método previamente descrito, para cada caso simulado e a comparação com os resultados de Cantero et al. (2007b). Como descrito pelos autores, quanto maior o número de Reynolds, mais rápida é a propagação da corrente de gravidade resultante na direção do fluxo. Primeiramente, o escoamento tem uma rápida aceleração e, em seguida, se propaga com uma velocidade praticamente constante, e finalmente a velocidade da frente decai de modo proporcional em aproximadamente  $t^{-1/3}$ . Tais comportamentos com o tempo após fase de rápida aceleração são chamados, respectivamente, de fase de *slumping* e fase inercial (HUPPERT; SIMPSON, 1980).

Avaliando a Eq. (4.6) para cada passo de tempo e adotando o isovalor de referência, que no presente estudo é  $10^{-2}$ , são geradas figuras similares à Fig. 1.3 e à Fig. 3.15 como mostrado na Figura 5.3.

Para desenhar cada isolinha é adotado um incremento quase constante da posição da frente, em virtude do seu comportamento. Inicialmente ( $x_1 - L_{1,b} < 5$ ), todos os casos simulados desenvolvem estruturas de lobos e fendas com o menor comprimento de onda possível para cada número de Reynolds. Conforme a corrente de gravidade se propaga, estas estruturas pequenas começam a se unir e a formar estruturas maiores e depois de um tempo, quando o lobo atinge um comprimento crítico, ele se divide em duas novas estruturas como é descrito em Simpson (1972) e por outros autores (CANTERO et al., 2007b; ESPATH et al., 2015; FRANCISCO, 2018). Especialmente no caso LR895 depois dos lobos atingirem um comprimento crítico, os mesmos saturam e não se dividem mais para formar novas estruturas.

Tomando as isolinhas apresentadas na Figura 5.3, o comprimento médio dos lobos para cada passo de tempo é determinado. Nesta seção, o comprimento do lobo é definido como a distância entre dois pontos de mínimo locais da isolinha de concentração ( $\varphi_p$ ) usando ferramentas de análise de sinais para obter resultados base para a ava-

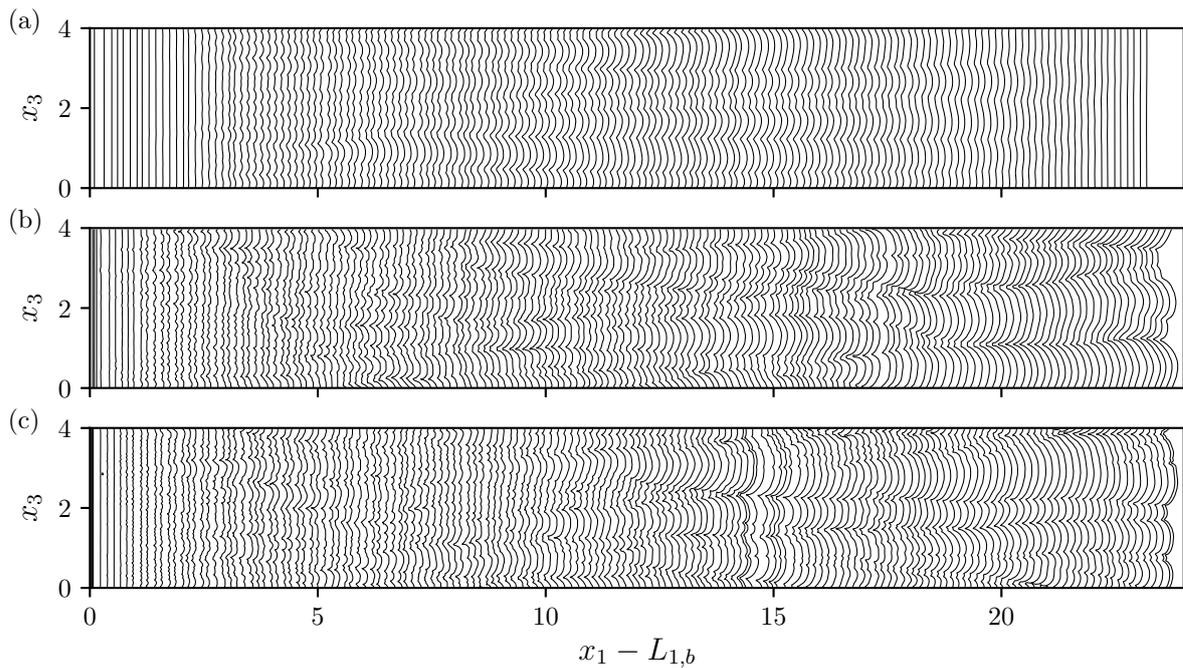


Figura 5.3 – Evolução temporal das isolinhas da projeção para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c). É adotado um isovalor de  $\varphi_p = 10^{-2}$  para desenhar cada isolinha com um passo de tempo variável que corresponde a uma variação constante da posição da frente de aproximadamente 0,15.

liação da exatidão do método de visão computacional. Os resultados desta análise são apresentados na Figure 5.4, onde é mostrado o tamanho médio dos lobos em função do número de Reynolds da frente para os casos LR3450 e LR8950 e a Eq. (4.7).

Se observa que estes casos simulados estão de acordo com os resultados inicialmente previstos por Simpson (1972), estando em sua maioria dentro do intervalo de incerteza da Eq. 4.7. Esta quantidade não é mostrada para o caso LR895 porque o número de Reynolds da frente neste caso está fora do intervalo da Eq. (4.7).

## 5.2 Métodos de Visão Computacional

Como foi explicado na seção 3.4.2, a fim de se obter conjuntos de dados de escoamentos com estruturas de lobos e fendas, conjuntos de imagens foram inicialmente extraídos manualmente de figuras publicadas nos trabalhos de Simpson (1972) e Neufeld (2002). O conjunto de imagens de cada trabalho é composto por uma imagem por passo de tempo, mostrando apenas o contorno da frente da corrente de gravidade em cada respectivo passo de tempo. Ao se exibir o conjunto de imagens de modo sequencial, se obtém uma animação da evolução da frente da corrente de gravidade. Por isso cada imagem é tratada como “quadro”, como os quadros de uma animação. A Figura 3.19 mostra os três primeiros quadros da animação extraída da Figura 1.3 de Simpson (1972) que gera uma animação de 20 quadros. O mesmo processo foi aplicado em um

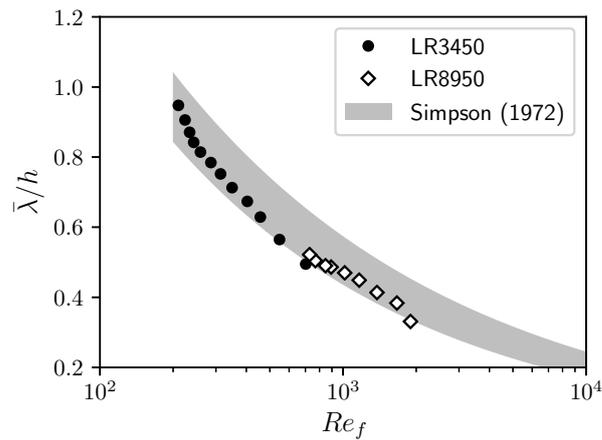


Figura 5.4 – Comparação entre o tamanho médio dos lobos em função do número de Reynolds da frente dos casos de simulação LR3450 e LR8950 com a Eq. (4.7). Resultados obtidos com ferramentas de análise de sinais.

conjunto de imagens vetoriais extraído do trabalho de Neufeld (2002) representando o experimento “may26b”, resultando em uma animação de 76 quadros.

Para avaliar os métodos propostos, duas abordagens foram adotadas, uma quantitativa e outra qualitativa. As duas partes da técnica podem ser avaliadas separadamente e como ambos os algoritmos se acoplam.

### 5.3 Avaliando a Abordagem de Detecção de Cantos e Fluxo Óptico

O algoritmo proposto tem como resultado uma imagem, apresentada na Figura 5.5. Esta imagem pode ser utilizada para avaliar qualitativamente os resultados obtidos com o detector de cantos para encontrar as fendas e rastreá-las com o fluxo óptico ao longo da evolução dos passos de tempo. Assim que novas características são detectadas (novos cantos), o movimento rastreado destas características (Figura 5.5) é consistente com o padrão observado na figura 5.6 onde as pistas são desenhadas junto com isolinhas da frente.

Também observando a Figura 5.5, podemos verificar que quando é usado o algoritmo KLT (figura 3.23, Suhr (2009)) é possível rastrear as características assim que elas aparecem. As novas características encontradas também foram rastreadas corretamente não interferindo com o caminho das que haviam sido detectadas previamente. A técnica também mostrou melhores resultados em escoamentos com números de Reynolds mais altos (figura 5.3, b e c).

De forma qualitativa, podem ser observadas nas trilhas indicadas na Figura 5.5 as estruturas do tipo espinha de peixe mencionadas por Espath et al. (2015). Na Figura 5.7 algumas destas estruturas estão assinaladas manualmente. Assim pode ser observada a ocorrência das mesmas em todos os três casos simulados.

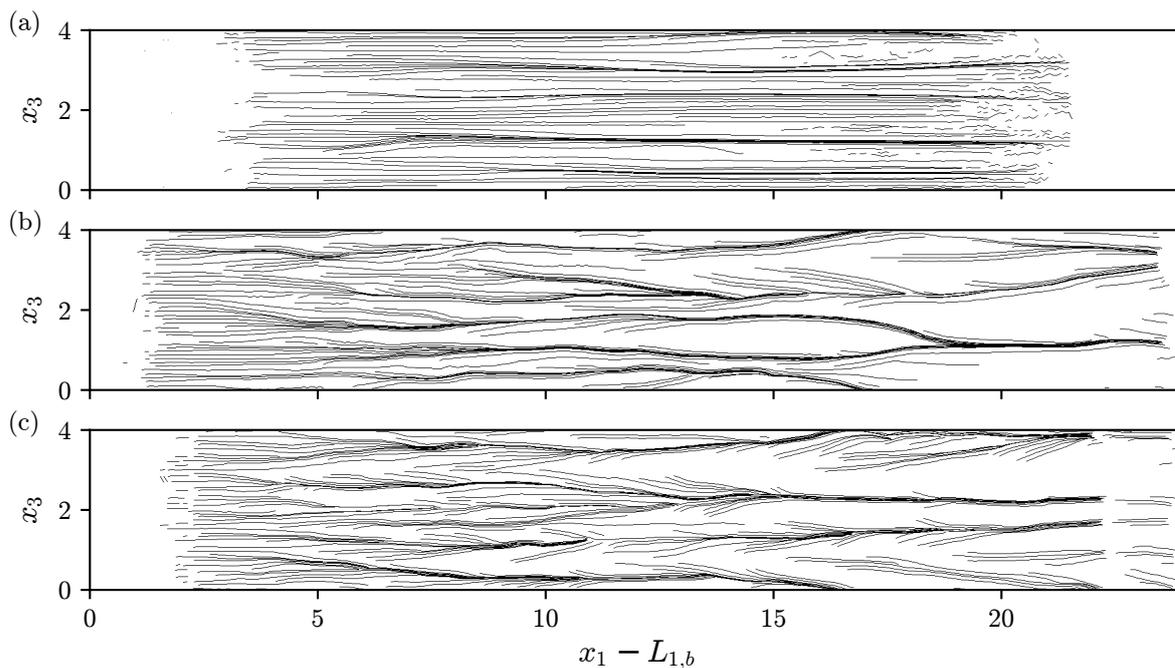


Figura 5.5 – Rastros das fendas para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).

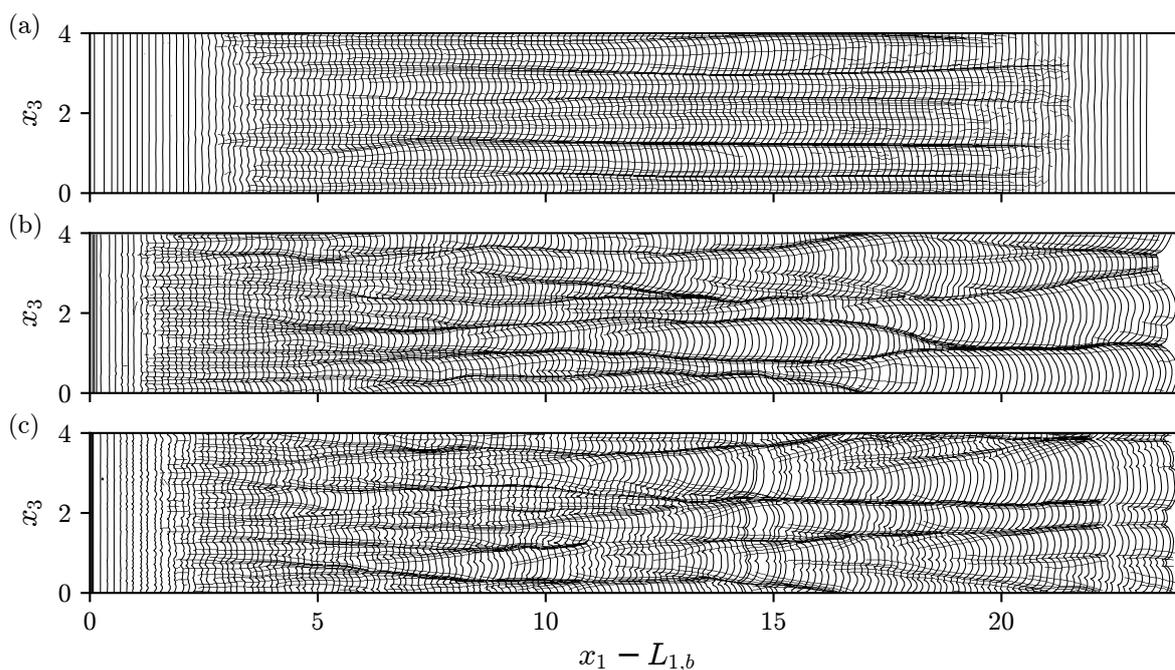


Figura 5.6 – Rastros das fendas sobrepostos no registro da evolução temporal da projeção das isolinhas de concentração para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).

A técnica de detecção de cantos utilizada para encontrar as fendas pode ser avaliada quantitativamente comparando seus resultados com os obtidos com os mínimos locais obtidos com as ferramentas de análise de sinais. Em relação à avaliação dos algoritmos de detecção de cantos para detectar as fendas na frente da corrente, a escolha pelo escoamento na configuração *lock-release* torna possível tratar as isolinhas da

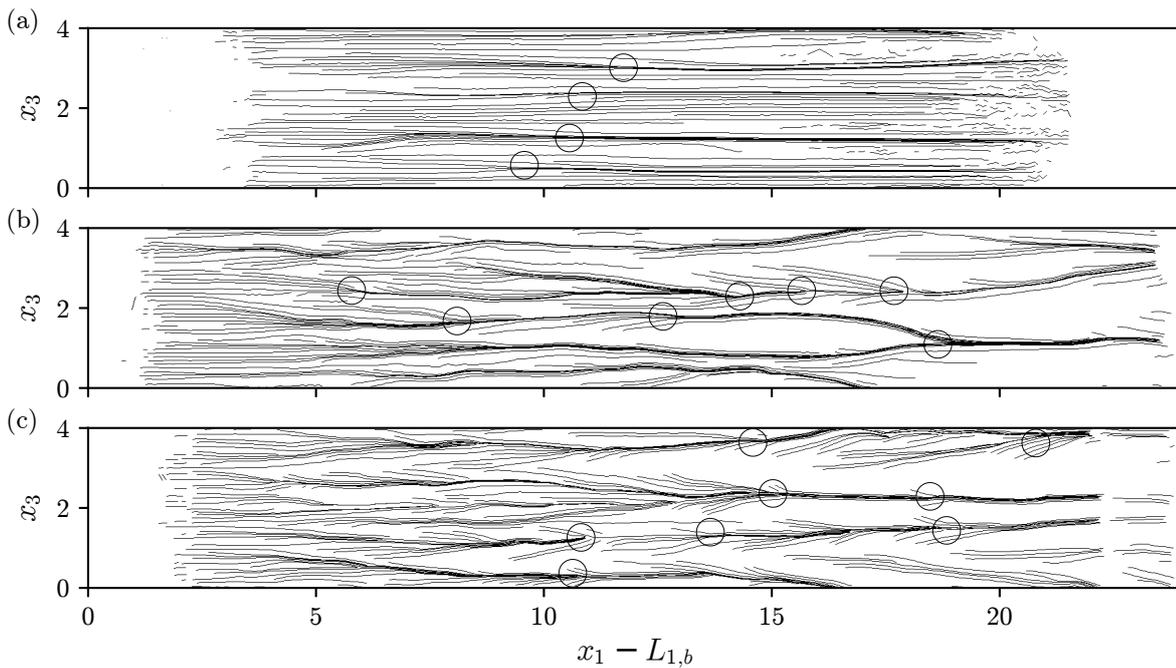


Figura 5.7 – Estruturas do tipo espinha de peixe observadas na imagem resultante do algoritmo proposto para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).

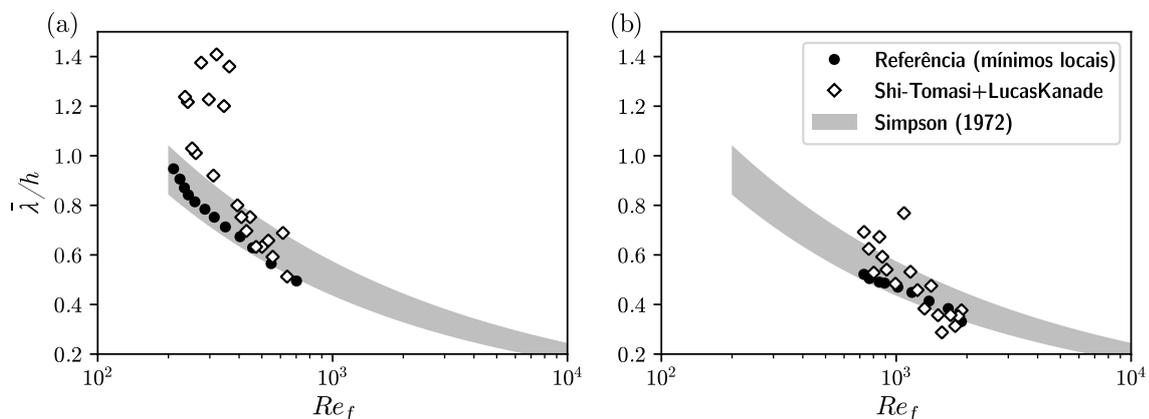


Figura 5.8 – Tamanho médio dos lobos como função do número de Reynolds da frente para os casos simulados LR3450 (a) e LR8950 (b), comparando com os resultados obtidos das ferramentas de processamento de sinais com os métodos de visão computacional e a Eq. (4.7).

projeção da frente da corrente de gravidade como uma função cartesiana. A Figura 5.8 apresenta uma comparação do tamanho médio dos lobos obtido usando ferramentas de análise de sinais com o valor médio ao se medir a distância entre as fendas obtidas por detecção de cantos.

Analisando a Figura 5.8a, para caso LR3450 se pode estimar que 50% das medidas de tamanho dos lobos está fora do intervalo de incerteza. Além disso, esses tamanhos médios fora do intervalo de incerteza foram medidos para números de Reynolds da frente inferiores a 400. Ao analisar os 50% restantes, dentro do intervalo de incerteza

para esse caso, todas medidas de tamanho de lobo, correspondendo aos números de Reynolds mais altos, ficam dentro do intervalo de incerteza. Finalmente, na Figura 5.8b para o caso LR8950 se pode observar que apenas 28% das medidas estão fora do intervalo.

Embora a abordagem do fluxo óptico de Lucas-Kanade tenha possibilitado uma maneira aceitável de rastrear as fendas automaticamente, o detector de cantos de Shi-Tomasi, apresentou erros na detecção das fendas. Apesar desta técnica ter permitido a detecção de fendas nos dados obtidos dos trabalhos referenciados, quando aplicado em um conjunto de dados mais complexo, ocorreram detecções incorretas (Figura 5.9). A quantidade destas detecções incorretas, i. e., cantos detectados que não eram fendas e (falso positivos) e/ou fendas não detectadas como cantos (falso negativos), foi significativamente grande para que algumas medições de tamanho de lobos ficassem fora do intervalo de incerteza no gráfico do tamanho médio do lobo em função do número de Reynolds da frente (5.8a).

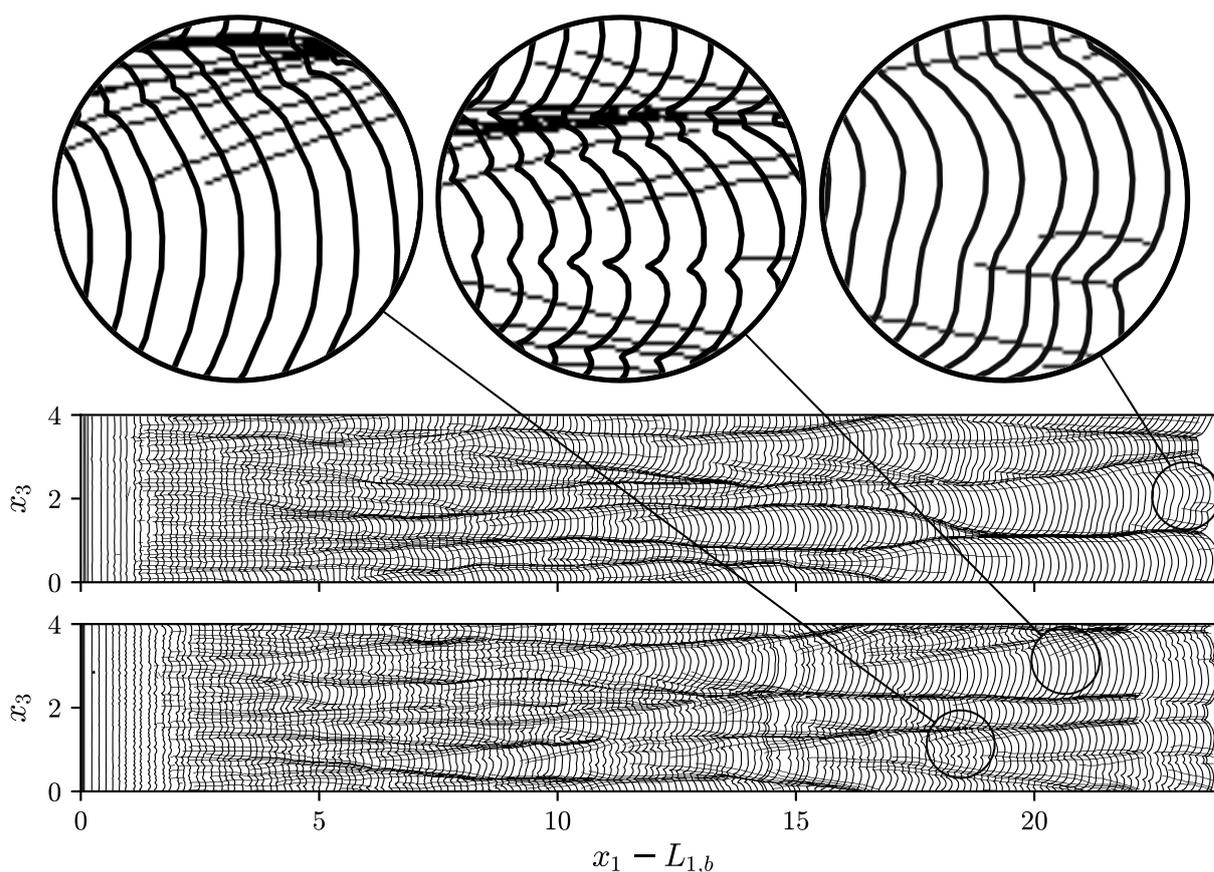


Figura 5.9 – Detalhes indicando classificações incorretas para a detecção e rastreamento de alguns pontos característicos.

Para o conjunto de dados das simulações em configuração axi-simétrica de Cantero et al. (2007a) é possível uma avaliação qualitativa da aplicação no método KLT para o traçado dos caminhos das fendas como mostrado na Figura 5.10. Em virtude do método de detecção de cantos não necessitar de informações relacionadas à configuração

do escoamento como no caso dos mínimos locais, é possível traçar o caminho das fendas mesmo para as isolinhas no perímetro completo de  $360^\circ$ .

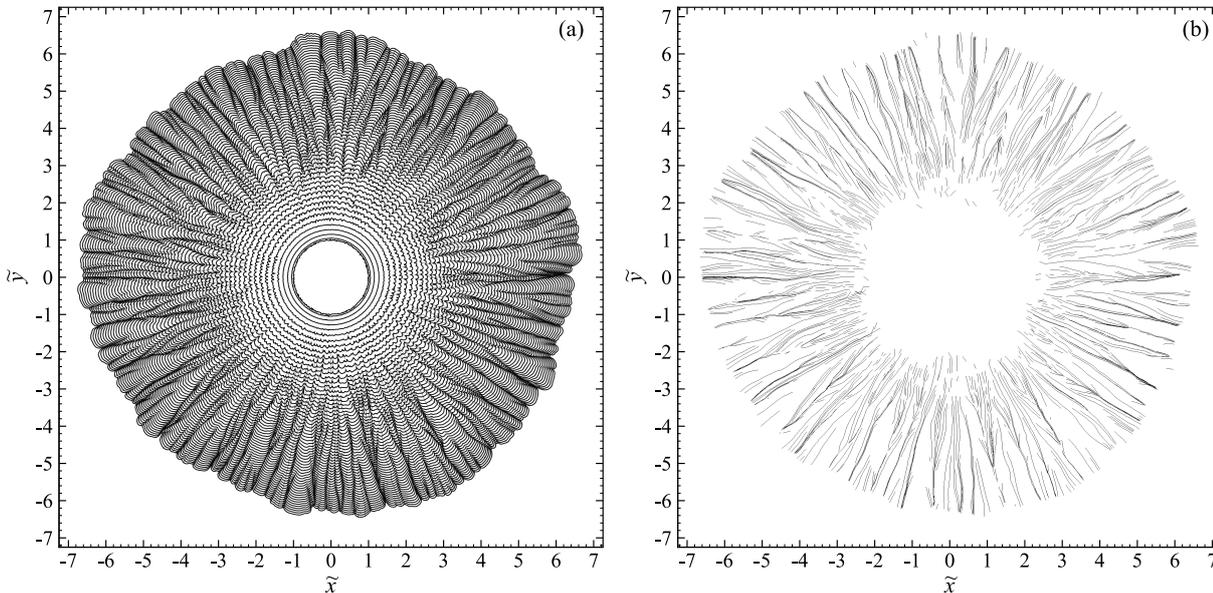


Figura 5.10 – Resultados obtidos utilizando a detecção de cantos como mecanismo de identificação dos pontos característicos para o caso axi-simétrica com número de Reynolds  $Re = 8500$ . (a) Traçado da caminho das fendas sobreposto as isolinhas de concentração da figura de [Cantero et al. \(2007a\)](#). (b) Apenas o traçado das fendas.

A título de avaliação qualitativa do método KLT, a Figura 5.11 mostra o traçado das fendas obtido com a aplicação do método KLT em dados obtidos das imagens disponíveis no trabalho de [Frantz et al. \(2017\)](#). Na Figura 5.11a, o traçado está sobreposto as isolinhas de concentração para verificação das coincidências e para evidenciar possíveis falsos positivos. Na Figura 5.11b, são apresentados apenas o traçado das fendas para evidenciar a assinatura do depósito.

## 5.4 Avaliando a Abordagem de Mínimos locais e Fluxo Óptico

A Figura 5.12 pode ser utilizada para avaliar qualitativamente os resultados obtidos ao se utilizar os mínimos locais do contorno detectado na frente da corrente de gravidade para encontrar as fendas e rastreá-las com o fluxo óptico. Assim como no método anterior, novas características são detectadas (novas fendas), o movimento rastreado destas características (Figura 5.12) é consistente com o padrão observado na figura 5.13 onde as pistas são desenhadas junto com isolinhas da frente.

Ainda de forma qualitativa, ao se observar a Figura 5.12 as estruturas do tipo espinha de peixe mencionadas por [Espath et al. \(2015\)](#) podem ser observadas de forma mais clara. Na Figura 5.14 algumas destas estruturas estão assinaladas manualmente. Observa-se desta forma a ocorrência das mesmas em todos os três casos simulados.

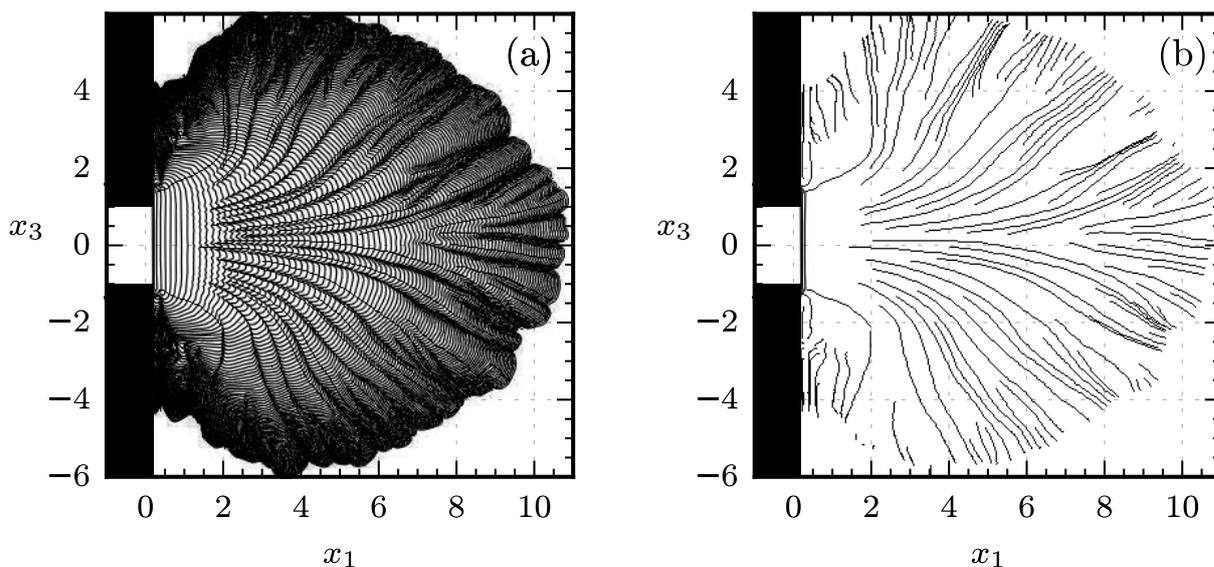


Figura 5.11 – Resultados obtidos utilizando a detecção de cantos como mecanismo de identificação dos pontos característicos para o caso canal-bacia com número de Reynolds  $Re = 5000$ . (a) Traçado da caminho das fendas sobreposto as isolinhas de concentração da figura de [Frantz et al. \(2017\)](#). (b) Apenas o traçado das fendas.

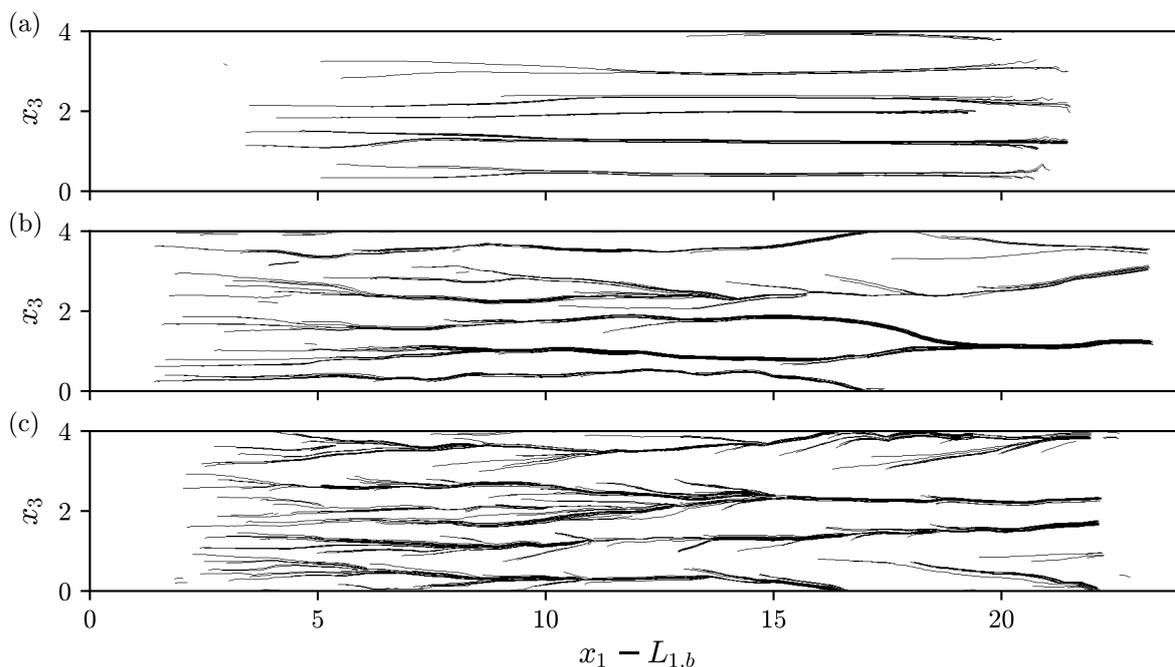


Figura 5.12 – Rastros das fendas para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).

Além disso, observando a Figura 5.12, pode-se verificar que ao se utilizar os mínimos locais ao invés da detecção de cantos na detecção de pontos característicos do método KLT (figura 3.23, [Suhr \(2009\)](#)) o resultado apresenta menos linhas traçadas sobre lobos (falsos positivos) assim como um aspecto mais limpo. E mesmo na figura 5.13a as linhas de traçado das fendas estão mais consistentes com as fendas visualmente per-

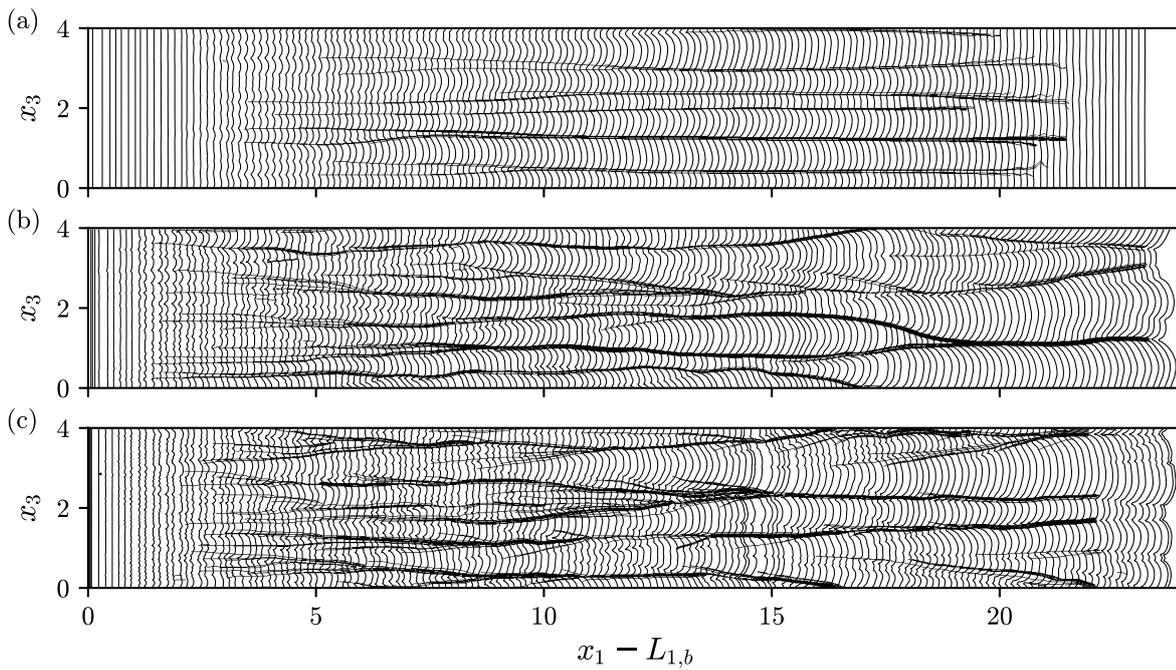


Figura 5.13 – Rastros das fendas sobrepostos no registro da evolução temporal da projeção das isolinhas de concentração para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).

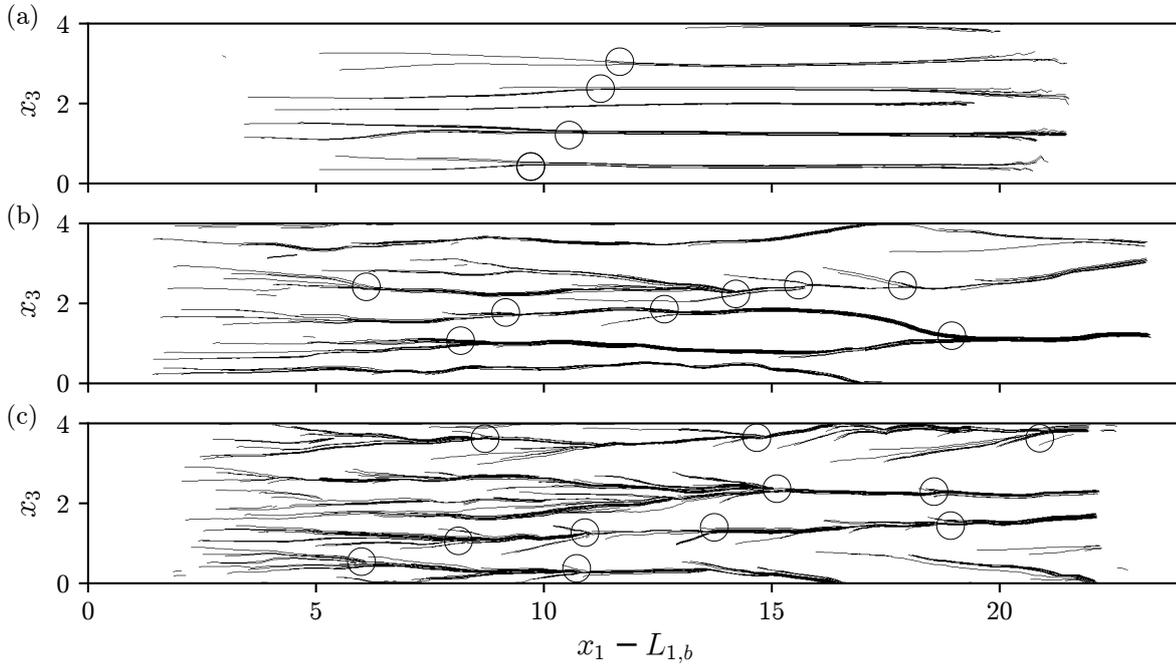


Figura 5.14 – Detalhes indicando a convergência das fendas em estruturas estilo espinha de peixe, para os casos LR895 (a), LR3450 (b) e LR8950 (c).

cebidas. A Figura 5.15 apresenta uma comparação do tamanho médio dos lobos obtido usando ferramentas de análise sinais com o valor médio ao se medir a distância entre as fendas obtidas por detecção de cantos.

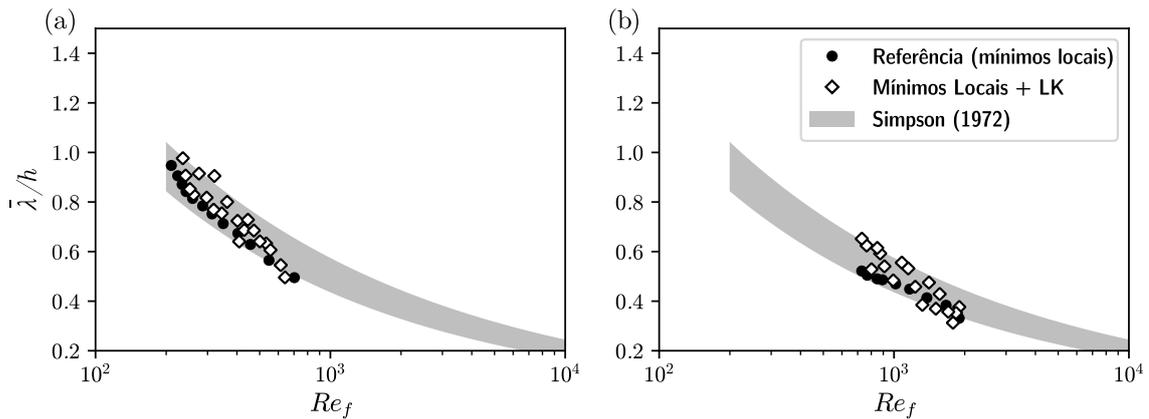


Figura 5.15 – Tamanho médio dos lobos como função do número de Reynolds da frente para os casos simulados LR3450 (a) e LR8950 (b), comparando com os resultados obtidos das ferramentas de processamento de sinais com o método que combina processamento de sinais e fluxo óptico e a Eq. (4.7).

## 5.5 Configuração Axi-simétrica

Ambas as abordagens foram aplicadas em um conjunto de imagens obtidas do trabalho de [Cantero et al. \(2007a\)](#). Para facilitar a comparação, as análises foram feitas utilizando apenas um setor de  $90^\circ$ , de modo que tanto a detecção de pontos característicos utilizando mínimos locais como utilizando detecção de cantos pudessem ser utilizadas no mesmo conjunto de imagens. Foram analisadas imagens referentes a dois casos simulados, um com número de Reynolds  $Re = 3450$  e outro  $Re = 8950$ .

Nas Figuras 5.16 e 5.17 podem ser observados os resultados obtidos utilizando as duas abordagens desenvolvidas, para ambos os casos simulados. Em ambas as figuras, as fendas detectadas utilizando mínimos locais com o respectivo caminho sobreposto as isolinhas de concentração são apresentadas nas Figuras 5.16a e 5.17a. Nas Figuras 5.16b e 5.17b apenas as linhas dos caminhos para a abordagem que utiliza mínimos locais. Nas Figuras 5.16c e 5.17c o caminhos das fendas identificadas por detecção de cantos sobrepostos às isolinhas de concentração. Finalmente, nas Figuras 5.16d e 5.17d apenas as linhas dos caminhos detectados pela abordagem de detecção de cantos.

Nos resultados obtidos por ambas as abordagens pode ser observada a convergência das fendas resultando na formação das estruturas do tipo espinha de peixe observadas por [Espath et al. \(2015\)](#). Na Figura 5.18a três e na 5.18b duas destas estruturas estão assinaladas na imagem resultante da aplicação da abordagem KLT nos dados de [Cantero et al. \(2007a\)](#). Tais estruturas também são observadas nas imagens resultantes da aplicação da abordagem que detecta as fendas por meio dos mínimos locais (Figuras 5.18c e 5.18d). Ao se comparar as estruturas assinaladas nos resultados das Figuras 5.18a e 5.18b com as que foram assinaladas nas Figuras 5.18c e 5.18d, nota-se de forma qualitativa, uma coincidência na localização destas estruturas para ambas as

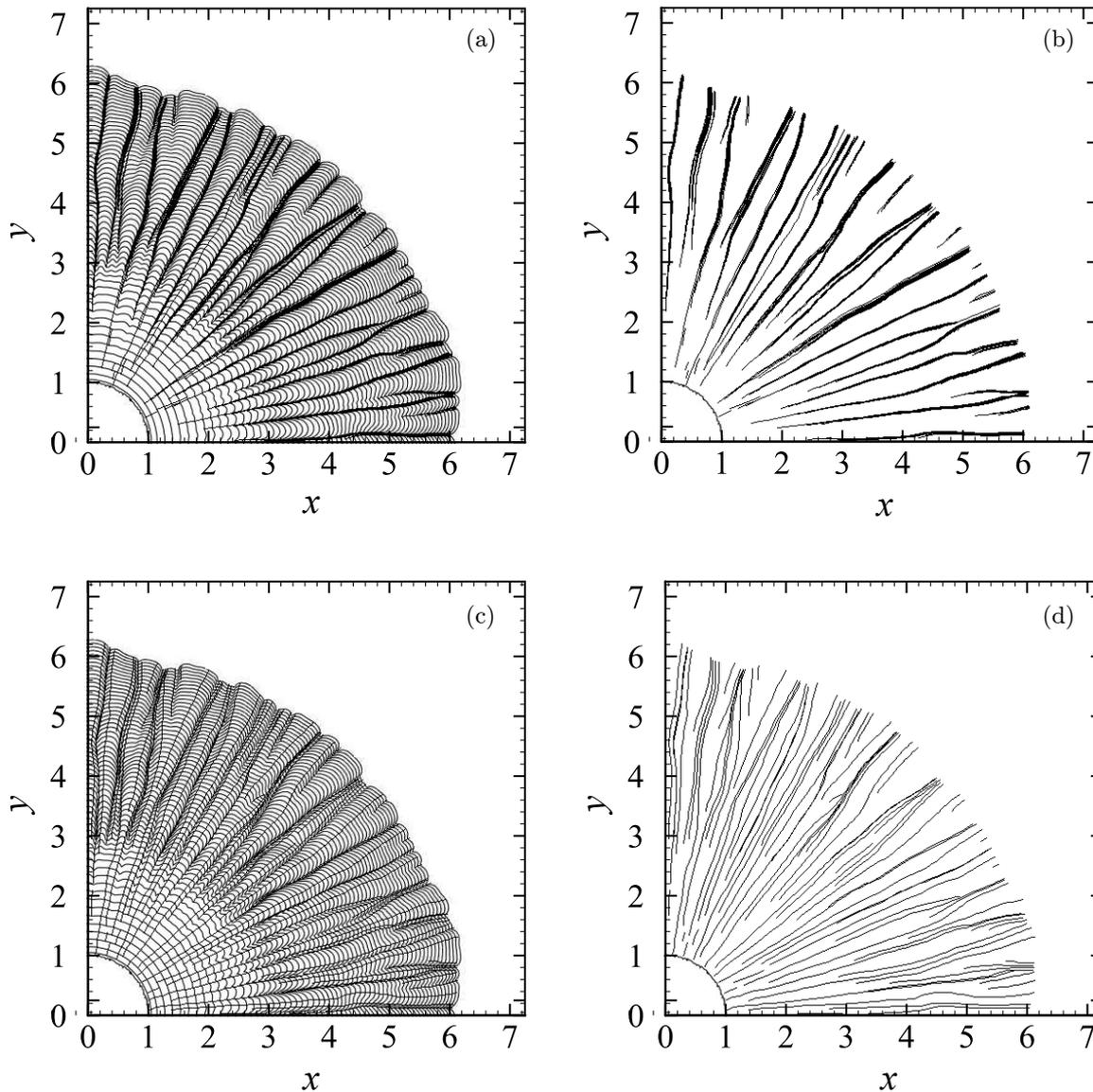


Figura 5.16 – Resultados apresentados pelos métodos desenvolvidos para o caso de  $Re = 3450$ . (a) Fendas detectadas utilizando mínimos locais com o respectivo caminho sobreposto às isolinhas de concentração. (b) Apenas as linhas dos caminhos para a abordagem que utiliza mínimos locais. (c) Caminhos das fendas identificadas por detecção de cantos sobrepostos às isolinhas de concentração. (d) Apenas as linhas dos caminhos detectados pela abordagem de detecção de cantos.

abordagens utilizadas.

Assim como na configuração canalizada, foram observadas classificações incorretas. A Figura 5.19 mostra algumas destas marcações obtidas ao se aplicar a abordagem KLT para os casos LR3450 (Figura 5.19a) e LR8950 (Figura 5.19b). Na Figura 5.20 no entanto, houve uma significativa redução das classificações incorretas. No caso LR3450 (Figura 5.19a) apenas um falso positivo pode ser percebido e no caso LR8950 (Figura 5.19b) apenas três falsos positivos.

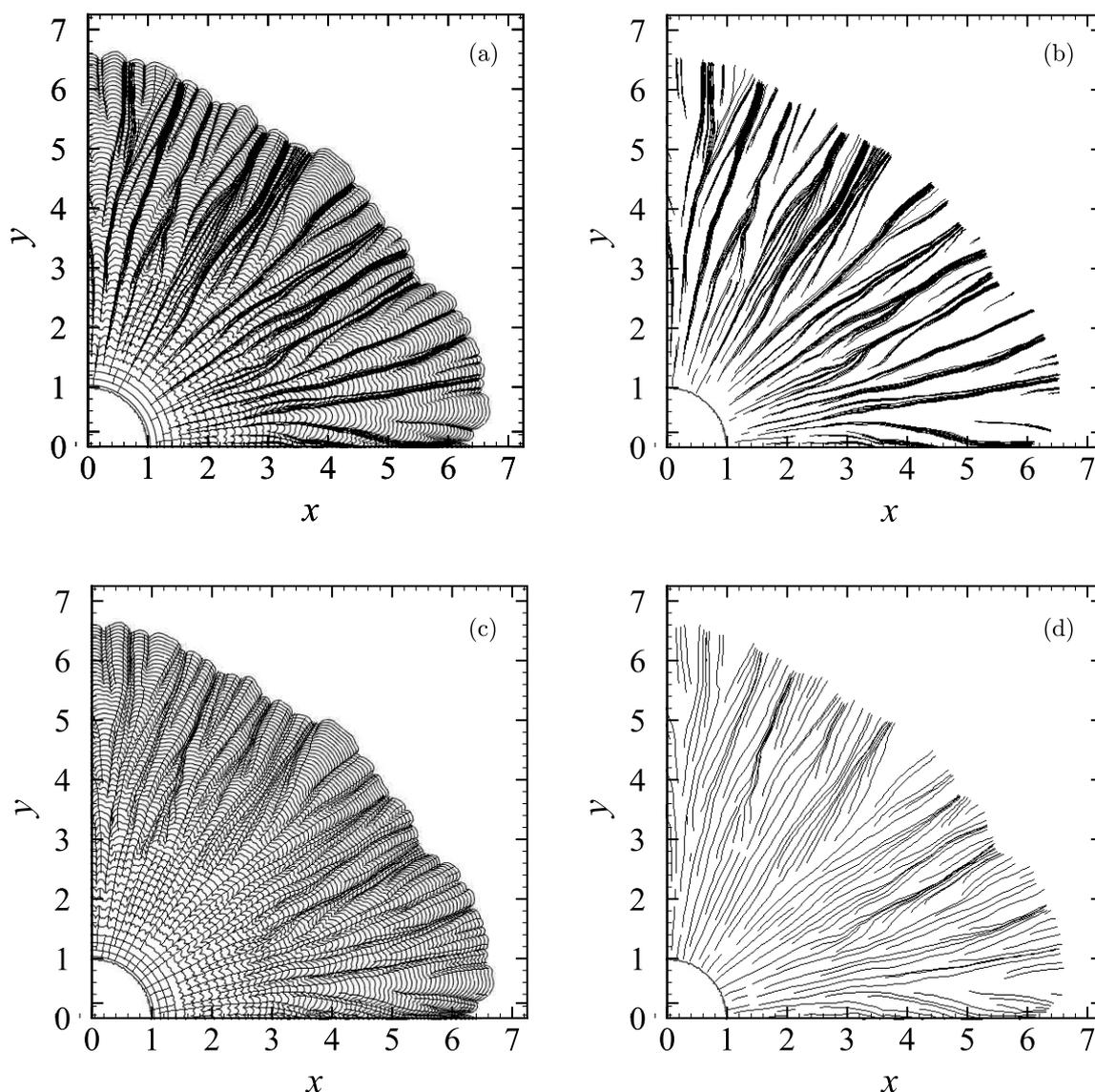


Figura 5.17 – Resultados apresentados pelos métodos desenvolvidos para o caso de  $Re = 8950$ . (a) Fendas detectadas utilizando mínimos locais com o respectivo caminho sobreposto às isolinhas de concentração. (b) Apenas as linhas dos caminhos para a abordagem que utiliza mínimos locais. (c) Caminhos das fendas identificadas por detecção de cantos sobrepostos às isolinhas de concentração. (d) Apenas as linhas dos caminhos detectados pela abordagem de detecção de cantos.

Finalmente, na nova abordagem proposta que modifica o método KLT utilizando uma extração de mínimos locais foram observados resultados melhores dos que os obtidos com o método KLT original. Para os testes com os conjuntos de dados relativos à configuração *lock-release* canalizada, não foram identificadas classificações incorretas como falsos positivos ou falsos negativos. Por outro lado, para os testes com os dados relativos à configuração axi-simétrica, foram observados alguns falsos positivos, embora com menor número de ocorrências quando comparado ao método KLT original.

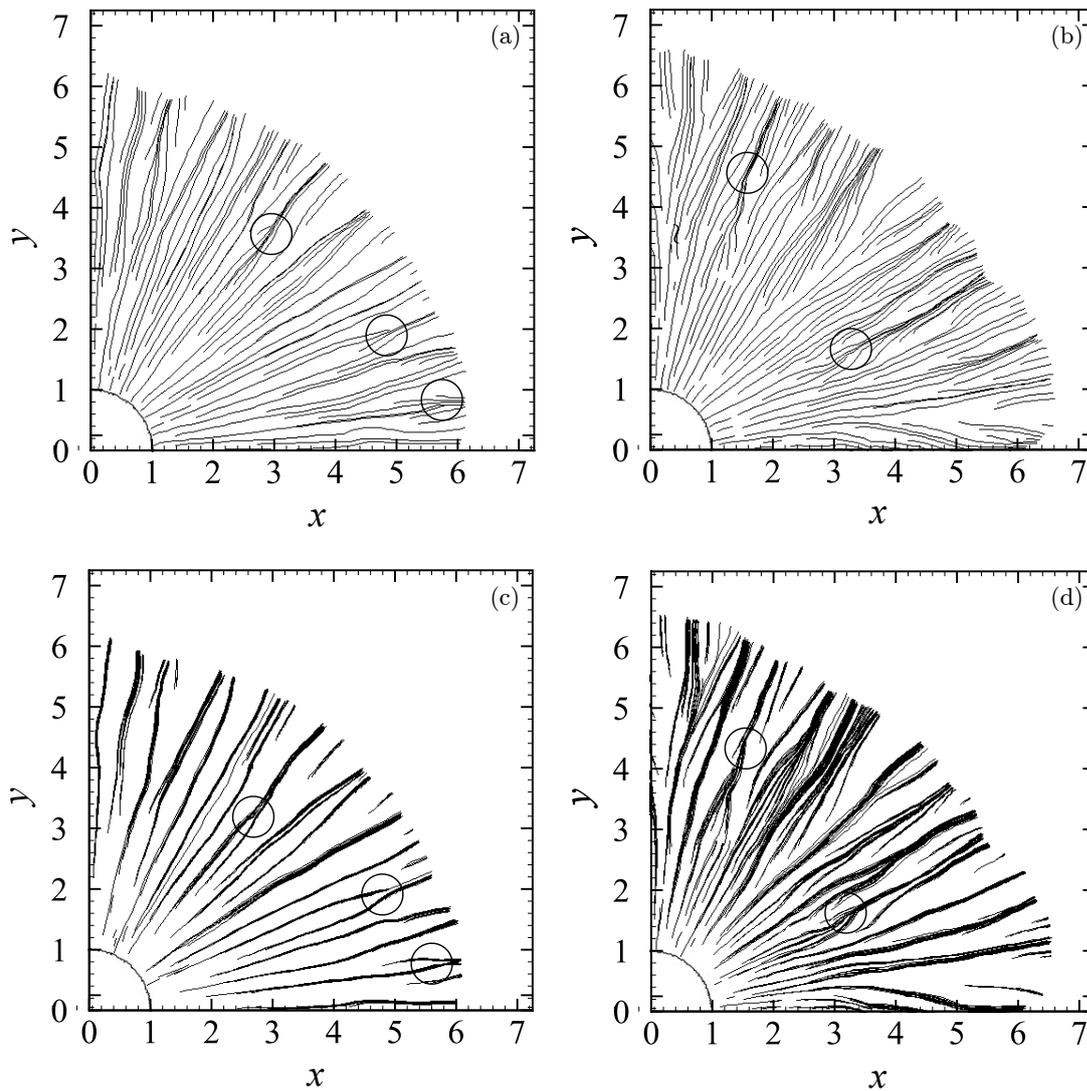


Figura 5.18 – Detalhes indicando a convergência das fendas formando estruturas estilo espinha de peixe utilizando a abordagem KLT para os casos LR3450 (a) e LR8950 (b) com a abordagem que localiza as fendas por meio dos mínimos locais para os casos LR3450 (c) e LR8950 (d).

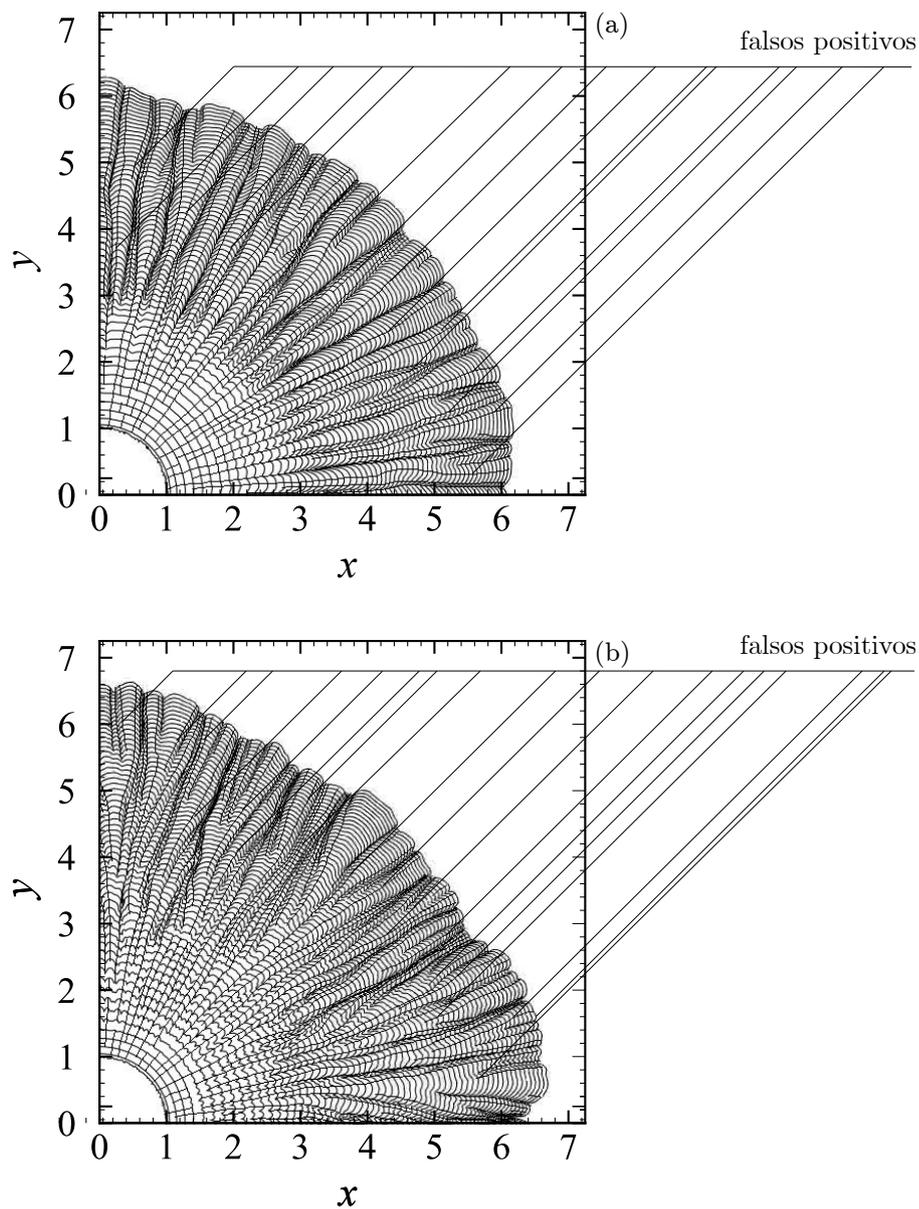


Figura 5.19 – Classificações incorretas (falsos positivos), indicadas manualmente ao se aplicar a abordagem KLT para os casos LR3450 (a) e LR8950 (b).

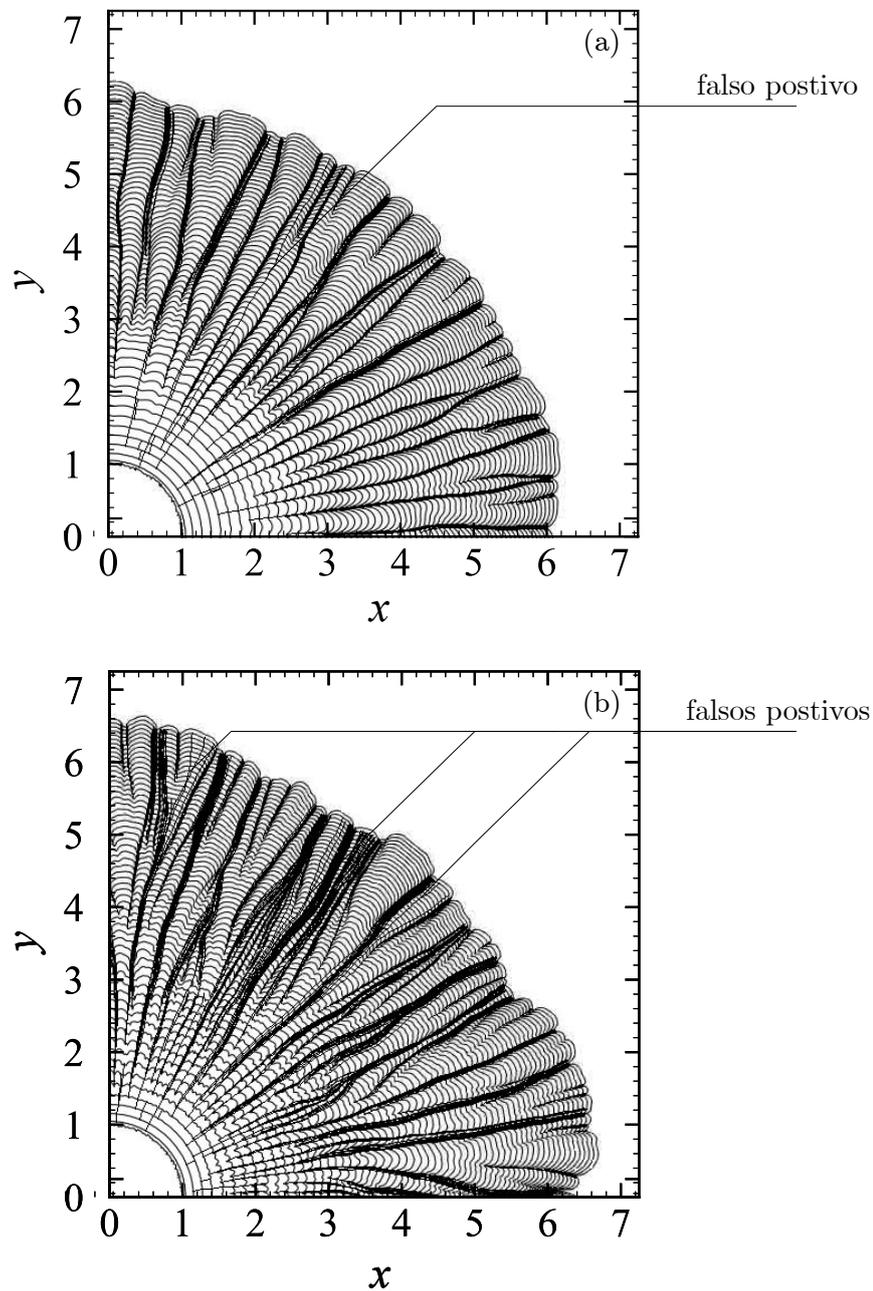


Figura 5.20 – Classificações incorretas (falsos positivos), indicadas manualmente ao se aplicar a nova abordagem utilizando mínimos locais para os casos LR3450 (a) e LR8950 (b).

## 6 Conclusão

Este trabalho avaliou o uso de técnicas de visão computacional para analisar feições espaço-temporais em escoamentos de correntes de gravidade. A técnica utilizada no protótipo desenvolvido neste trabalho, chamada KLT, para Kanade, Lucas, Tomasi (SUHR, 2009) consiste no uso de um algoritmo de detecção de cantos Shi e Tomasi (1994) para detectar as fendas e um algoritmo de fluxo óptico Lucas e Kanade (1981) para rastrear as fendas detectadas, ambos adequadamente acoplados para descartar cantos perdidos ao se comparar dois quadros. Também foi desenvolvida uma nova abordagem em que o algoritmo de detecção de cantos utilizado no KLT foi substituído pela detecção automática do contorno presente na imagem juntamente com a localização dos mínimos locais neste contorno.

Resultados preliminares com conjuntos de dados provenientes de experimentos físicos mostraram potencial no uso da técnica de detecção de cantos. Então, de modo a permitir uma melhor avaliação quantitativa destes métodos, um conjunto de simulações numéricas foi realizado para gerar um conjunto de dados mais rico para as análises de visão computacional. A configuração do escoamento adotada nas simulações foi *lock-release* canalizado e os parâmetros do escoamento adotados replicaram simulações realizadas por Cantero et al. (2007b), com três cenários, cada um com um número de Reynolds diferente, ( $Re = 895$ ,  $Re = 3450$  e  $Re = LR8950$ ). Além dos dados provenientes das simulações numéricas realizadas, os métodos de visão computacional propostos neste trabalho também foram aplicados em conjuntos de dados objetivos de imagens disponíveis na literatura. Desta forma, um conjunto de dados de simulações em configuração *lock-release* cilíndrica (axi-simétrica) com dois cenários com diferentes números de Reynolds ( $Re = 3450$  e  $Re = 8950$ ) pode ser utilizado para testar as abordagens propostas.

Comparados com a técnica padrão adotada para encontrar a posição das fendas, o detector de cantos apresentou um desempenho inadequado para a simulação com o número de Reynolds mais baixo, entretanto mesmo quando avaliadas as detecções para as simulações com números de Reynolds mais altos, alguns resultados ficaram fora do intervalo de incerteza dos experimentos de (SIMPSON, 1972). No entanto, o fluxo óptico apresentou resultados promissores especialmente nos fluxos com números de Reynolds mais elevados onde a acurácia atingiu 72%. De forma complementar, ao se substituir o detector de cantos pela detecção de mínimos locais, o algoritmo apresentou uma acurácia maior. Quando o método de detecção de fendas foi substituído pela identificação dos mínimos locais e esses utilizados como pontos característicos no algoritmo de Lucas-Kanade, todas as medidas dos tamanhos dos lobos ficaram dentro do intervalo de incerteza.

Desta forma, retomando os objetivos enumerados no capítulo , as questões de pesquisa foram respondidas:

**“É possível rastrear automaticamente as feições detectadas e acompanhá-las durante a evolução temporal do escoamento?”**

Conforme apresentado no [Capítulo 5](#), um método baseado no processamento de imagens do escoamento foi desenvolvido e avaliado. O método proposto ainda dispõe de duas abordagens distintas para a localização das feições, as quais são rastreadas utilizando uma técnica de fluxo óptico. O método proposto foi testado, com ambas as abordagens, em imagens de correntes de gravidade para duas configurações do escoamento, estas sendo: canal e axi-simétrica. A configuração canal bacia foi analisada apenas com a abordagem de Detecção de cantos. Os resultados permitem concluir que é possível rastrear automaticamente as feições e acompanhá-las durante a evolução do escoamento.

**“Qual a acurácia do método na localização correta das feições?”**

Como apresentado no [Capítulo 4](#), a acurácia só foi avaliada para a configuração canalizada, uma vez que a lei de escala utilizada é definida apenas para esta configuração. Desta forma, com os dados apresentados no [Capítulo 5](#) mostraram diferentes níveis de acurácia para o método proposto usando a abordagem de detecção de cantos para obter os pontos característicos a serem acompanhados pelo algoritmo de fluxo óptico. Neste caso a acurácia foi de 50% para o caso caso LR3450 e de 72% para o caso LR8950. Ao se adotar a abordagem de detecção de mínimos locais nas linhas de contorno obtidas da imagem, todos os pontos detectados ficaram dentro do intervalo de incerteza adotado como referência para a avaliação de acurácia, indicando uma acurácia percentual de 100% para ambos os casos simulados.

**“O desempenho do método está associado aos parâmetros do escoamento?”**

Em virtude dos diferentes níveis de acurácia obtidos com o método KLT, em particular no caso LR3450 onde a acurácia foi zero para o número de Reynolds da frente inferior a 400 e 100% quando superior a esse limiar. A acurácia também foi maior (72%) para o caso LR8950. Desta forma, podemos dizer que o método que utiliza a detecção de cantos é sensível aos parâmetros do escoamento para as configurações canalizadas. Já o método que combina detecção de mínimos locais com fluxo óptico apresentou o mesmo nível de acurácia para os casos de avaliados. Ao se avaliar visualmente o traçado obtido com essa segunda abordagem para diferentes configurações observa-se também um melhor desempenho, mesmo para o caso LR895 onde o número de Reynolds da frente está abaixo do limiar da função de escala utilizada para avaliar a acurácia.

## 7 Proposta para trabalhos futuros

Particularmente, relacionado ao método de detecção de fendas, o uso exclusivo do detector de cantos provou apresentar limitações. Entretanto quando utilizado associado ao fluxo óptico os resultados melhoraram significativamente. Ao substituir a detecção de cantos pela detecção de mínimos locais como método de detecção de pontos característicos no algoritmo KLT, os resultados apresentaram uma acurácia maior. Entretanto, para que o uso da abordagem de mínimos locais seja utilizada, é necessário que seja identificada como parâmetro de entrada, a configuração de *lock-release* utilizada. Um possível trabalho futuro seria o desenvolvimento de um método que combinasse a detecção de cantos e a abordagem de detecção de mínimos locais para que a configuração do escoamento seja detectada de forma automática.

Uma outra opção de trabalho futuro seria aplicar os métodos propostos em imagens de ocorrências naturais, como o trabalho de [Horner-Devine e Chickadel \(2017\)](#) ou em imagens provenientes de experimentos físicos como os de [Luthi \(1981\)](#). Uma vez que se tenha acesso às imagens destes trabalhos, ou de trabalhos similares, bastaria executar os algoritmos desenvolvidos nos respectivos conjuntos de dados.



## Referências

- AL-HEMOUD, A.; AL-DOUSARI, A.; MISAK, R.; AL-SUDAIRAWI, M.; NASEEB, A.; AL-DASHTI, H.; AL-DOUSARI, N. Economic impact and risk assessment of sand and dust storms (sds) on the oil and gas industry in kuwait. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 1, p. 200, 2019. Citado na página 32.
- ALLEN, J. R. L. Mixing at turbidity current heads, and its geological implications. *Journal of Sedimentary Research*, v. 41, n. 1, p. 97–113, 03 1971. Citado na página 46.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e fundamentos de medidas—vol. 1*. [S.l.]: Livros Técnico E Científicos Editora, 2010. Citado na página 77.
- BALLARD, D. M.; BROWN, C. M. *Computer Vision*. [S.l.]: Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1982. Citado na página 57.
- BARRON, J. L.; FLEET, D. J.; BEAUCHEMIN, S. S. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*, Springer, v. 12, n. 1, p. 43–77, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 64.
- BEAUCHEMIN, S. S.; BARRON, J. L. The computation of optical flow. *ACM computing surveys (CSUR)*, ACM New York, NY, USA, v. 27, n. 3, p. 433–466, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 18, 63 e 65.
- BERGEN, J. R.; ANANDAN, P.; HANNA, K. J.; HINGORANI, R. Hierarchical model-based motion estimation. In: SPRINGER. *European conference on computer vision*. [S.l.], 1992. p. 237–252. Citado na página 64.
- BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *Opencv. Dr. Dobb's journal of software tools*, v. 3, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 15, 36, 76 e 78.
- BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2008. Citado 4 vezes nas páginas 17, 58, 59 e 78.
- BRITTER, R. E.; SIMPSON, J. E. Experiments on the dynamics of a gravity current head. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 88, n. 2, p. 223–240, 1978. Citado na página 47.
- BRONSHTEIN, I. N.; SEMENDYAYEV, K. A.; MUSIOL, G.; H, M. *Handbook of mathematics—passage*. Springer Science & Business Media, 2004. Citado na página 78.
- BROWN, C. M. *Advances in Computer Vision*. [S.l.]: Hillside, N.J. : Lawrence Erlbaum Associates, 1988. v. 1. Citado na página 57.
- CAMATA, J. J.; SILVA, V.; VALDURIEZ, P.; MATTOSO, M.; COUTINHO, A. L. In situ visualization and data analysis for turbidity currents simulation. *Computers & Geosciences*, v. 110, p. 23–31, 2018. Citado na página 57.

- CANTERO, M. I.; BALACHANDAR, S.; GARCIA, M. H. High-resolution simulations of cylindrical density currents. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 590, p. 437–469, 2007. Citado 13 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19, 44, 52, 53, 75, 76, 78, 85, 86 e 89.
- CANTERO, M. I.; LEE, J. R.; BALANCHANDAR, S.; GARCÍA, M. H. On the front velocity of gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 586, p. 1–39, 2007. Citado 11 vezes nas páginas 16, 19, 34, 44, 51, 52, 72, 73, 74, 80 e 95.
- CANUTO, C.; HUSSAINI, M. Y.; QUARTERONI, A.; ZANG, T. A. *Spectral methods in fluid dynamics*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1988. (Springer series in computational physics). Citado na página 51.
- CARR, H.; SNOEYINK, J.; PANNE, M. van de. Progressive topological simplification using contour trees and local spatial measures. In: *15th Western Computer Graphics Symposium, British Columbia*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 86. Citado na página 59.
- DAIRAY, T.; LAMBALLAIS, E.; LAIZET, S.; VASSILICOS, J. C. Numerical dissipation vs. subgrid-scale modelling for large eddy simulation. *Journal of Computational Physics*, Elsevier, v. 337, p. 252–274, 2017. Citado na página 73.
- DANAFAR, S.; GHEISSARI, N. Action recognition for surveillance applications using optic flow and svm. In: SPRINGER. *Asian Conference on Computer Vision*. [S.l.], 2007. p. 457–466. Citado na página 36.
- DANIEL, C. L. B. V. P.; SCHIKORET, R. The contour spectrum. In: CITESEER. *Visualization'97: Proceedings, October 19-24, 1997, Phoenix, Arizona*. [S.l.], 1997. p. 167. Citado na página 58.
- ESPATH, L.; PINTO, L.; LAIZET, S.; SILVESTRINI, J. Two- and three-dimensional direct numerical simulation of particle-laden gravity currents. *Computers & Geosciences*, v. 63, p. 9 – 16, 2014. Citado na página 48.
- ESPATH, L. F. R.; PINTO, L. C.; LAIZET, S.; SILVESTRINI, J. H. High-fidelity simulations of the lobe-and-cleft structures and the deposition map in particle-driven gravity currents. *Physics of Fluids*, v. 27, n. 5, p. 056604, 2015. Citado 11 vezes nas páginas 15, 16, 33, 34, 48, 49, 50, 80, 82, 86 e 89.
- FARENZENA, B. A. *Simulação numérica de correntes de densidade hiperpicnais sob referencial móvel*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 18, 34 e 74.
- FELDMAN, G. C. *Ocean Color Image Gallery*. 2018. Acessado em 02/07/2020. Disponível em: <<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/gallery/573/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 35.
- FLEET, D. J.; JEPSON, A. D. Computation of component image velocity from local phase information. *International Journal of Computer Vision*, Springer, v. 5, n. 1, p. 77–104, 1990. Citado na página 64.
- FRANCISCO, E.; ESPATH, L.; LAIZET, S.; SILVESTRINI, J. Reynolds number and settling velocity influence for finite-release particle-laden gravity currents in a basin. *Computers & Geosciences*, v. 110, p. 1 – 9, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 17, 18, 44, 53, 54 e 76.

- FRANCISCO, E. P. *Modelagem matemática e simulação numérica de correntes de gravidade em uma configuração canal-bacia*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2018. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Tese de doutorado. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 80.
- FRANTZ, R. A. S.; FRANCISCO, E. P.; LAIZET, S.; SILVESTRINI, J. H. Dns/les of particle-driven gravity currents in a basin configuration. In: *16th European Turbulence Conference, 2017, Suécia*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 10 vezes nas páginas 17, 18, 19, 53, 54, 75, 76, 78, 86 e 87.
- FREEPRESSJOURNAL.IN. *WATCH: Controlled demolition of cooling towers at power plant in England is blowing minds on Twitter*. 2021. Acessado em 13/08/2021. Disponível em: <<https://www.freepressjournal.in/viral/watch-controlled-demolition-of-cooling-towers-at-power-plant-in-england-is-blowing-minds-on-twitter>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 42.
- GARCÍA, M. H.; PARSONS, J. D. Mixing at the front of gravity currents. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 24, n. 1, p. 197 – 205, 1996. Citado na página 46.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H.; PRESS, F. *Understanding earth*. [S.l.]: Macmillan, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 47.
- GUO, K.; ISHWAR, P.; KONRAD, J. Action recognition using sparse representation on covariance manifolds of optical flow. In: *IEEE. 2010 7th IEEE international conference on advanced video and signal based surveillance*. [S.l.], 2010. p. 188–195. Citado na página 36.
- HACKER, J.; LINDEN, P.; DALZIEL, S. Mixing in lock-release gravity currents. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 24, n. 1, p. 183 – 195, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 33, 44 e 46.
- HARRIS, C.; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. In: *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 147–151. Citado 3 vezes nas páginas 60, 61 e 78.
- HÄRTEL, C.; CARLSSON, F.; THUNBLOM, M. Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. part 2. the lobe-and-cleft instability. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 418, p. 213–229, 2000. Citado na página 46.
- HÄRTEL, C.; MEIBURG, E.; NECKER, F. Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. part 1. flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries. *J. Fluid Mech.*, p. 189–212, 2000. Citado na página 54.
- HEEGER, D. J. Optical flow using spatiotemporal filters. *International Journal of Computer Vision*, Springer, v. 1, n. 4, p. 279–302, 1988. Citado na página 64.
- HORN, B. K.; SCHUNCK, B. G. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 17, n. 1-3, p. 185–203, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 66.
- HORNER-DEVINE, A. R.; CHICKADEL, C. C. Lobe-cleft instability in the buoyant gravity current generated by estuarine outflow. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 44, n. 10, p. 5001–5007, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 15, 17, 34, 35, 54, 56 e 97.

HOULT, D. P. Oil spreading on the sea. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 4, n. 1, p. 341–368, 1972. Citado 3 vezes nas páginas 16, 51 e 52.

HUPPERT, H. E. The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 121, p. 43–58, 1982. Citado 3 vezes nas páginas 16, 51 e 52.

HUPPERT, H. E. Gravity currents: a personal perspective. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 554, p. 299–322, 2006. Citado na página 47.

HUPPERT, H. E.; SIMPSON, J. E. The slumping of gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 99, n. 4, p. 785–799, 1980. Citado 4 vezes nas páginas 16, 51, 52 e 80.

KÁRMÁN, T. von. The engineer grapples with non-linear problems. *Bulletin of the American Mathematical Society*, v. 46, p. 615–683, 1940. Citado na página 44.

KAYE, G.; COLE, J.; KING, A.; JOHNSTON, D. Comparison of risk from pyroclastic density current hazards to critical infrastructure in mammoth lakes, california, usa, from a new inyo craters rhyolite dike eruption versus a dacitic dome eruption on mammoth mountain. *Natural Hazards*, Springer, v. 49, n. 3, p. 541–563, 2009. Citado na página 32.

KRAVCHENKO, A.; MOIN, P. On the effect of numerical errors in large eddy simulations of turbulent flows. *Journal of Computational Physics*, Elsevier, v. 131, n. 2, p. 310–322, 1997. Citado na página 72.

KREVELD, M. V.; OOSTRUM, R. van; BAJAJ, C.; PASCUCCI, V.; SCHIKORE, D. Con-  
tour trees and small seed sets for isosurface traversal. In: *Proceedings of the thirteenth annual symposium on Computational geometry*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 212–220. Citado na página 58.

Laizet, S.; Lamballais, E. High-order compact schemes for incompressible flows: A simple and efficient method with the quasi-spectral accuracy. *Journal of Computational Physics*, v. 228, p. 5989–6015, 2009. Citado na página 72.

LELE, S. K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. *Journal of computational physics*, Elsevier, v. 103, n. 1, p. 16–42, 1992. Citado na página 72.

LUCAS, B. D.; KANADE, T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981. (IJCAI'81), p. 674–679. Citado 5 vezes nas páginas 64, 65, 75, 78 e 95.

LUTHI, S. an. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. *Marine Geology*, v. 40, n. 3, p. M59–M68, 1981. Citado 4 vezes nas páginas 15, 34, 35 e 97.

MARINO, B. M.; THOMAS, L. P.; LINDEN, P. F. The front condition for gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 536, p. 49–78, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 16, 51 e 52.

- MCELWAINE, J.; PATTERSON, M.; DALZIEL, S. Lobe and cleft formation at the head of a gravity current. In: WARSAW,. *Proceedings of the XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. [S.l.], 2004. p. 15–21. Citado 4 vezes nas páginas 17, 47, 55 e 57.
- MEIBURG, E.; KNELLER, B. Turbidity currents and their deposits. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 42, n. 1, p. 135–156, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 34, 46 e 47.
- MOTA, V. F. *Tensor baseado em fluxo óptico para descrição global de movimento em vídeos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011. Citado na página 36.
- MULDER, T.; ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, v. 48, n. 2, p. 269–299, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 16, 42 e 43.
- NAGEL, H.-H. On the estimation of optical flow: Relations between different approaches and some new results. *Artificial intelligence*, Elsevier, v. 33, n. 3, p. 299–324, 1987. Citado na página 64.
- NAKAJIMA, T.; SATOH, M. The formation of large mudwaves by turbidity currents on the levees of the toyama deep-sea chan nel, japan sea. *Sedimentology*, v. 48, n. 2, p. 435–463, 2001. Citado na página 47.
- NASR-AZADANI, M. M.; MEIBURG, E. Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 745, p. 409–443, 2014. Citado na página 48.
- NEUFELD, J. *Lobe-Cleft Patterns in the Leading Edge of a Gravity Current*. Dissertação (Mestrado) — University of Toronto, Toronto, 2002. Citado 12 vezes nas páginas 17, 18, 33, 34, 46, 53, 54, 55, 69, 70, 81 e 82.
- NISBET, E. G.; PIPER, D. J. W. Giant submarine landslides. *Nature*, v. 392, p. 329–330, 1998. Citado na página 47.
- NOGUEIRA, H. I. S.; ADDUCE, C.; ALVES, E.; FRANCA, M. J. Dynamics of the head of gravity currents. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 14, n. 2, p. 519–540, 2014. Citado na página 46.
- OBSERVATORY, M. V. *Pyroclastic Flows*. 2017. [Online; acessado em 09 de julho de 2019]. Disponível em: <<http://mvoms.org/hazards/volcanic-hazards/pyroclastic-flows/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.
- OOI, S. K.; CONSTANTINESCU, G.; WEBER, L. Numerical simulations of lock-exchange compositional gravity current. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 635, p. 361–388, 2009. Citado na página 48.
- PARRILLA, E.; GINESTAR, D.; HUESO, J. L.; RIERA, J.; TORREGROSA, J. R. Handling occlusion in optical flow algorithms for object tracking. *Computers & Mathematics with Applications*, Elsevier, v. 56, n. 3, p. 733–742, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 15, 36 e 37.
- PERENS, B. et al. The open source definition. *Open sources: voices from the open source revolution*, Sebastopol, CA: O'Reilly, v. 1, p. 171–188, 1999. Citado na página 78.

PIPER, D. J.; AKSU, A. E. The source and origin of the 1929 grand banks turbidity current inferred from sediment budgets. *Geo-Marine Letters*, Springer, v. 7, n. 4, p. 177–182, 1987. Citado na página 47.

PRESS, A. *Powerful sandstorm shuts down highways*. 2018. New York Post. [Online; acessado em 09 de julho de 2019]. Disponível em: <<https://nypost.com/2018/05/01/powerful-sandstorm-shuts-down-highways/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.

PUHL, E. *Morfodinâmica e condição de equilíbrio do leito sob a ação de correntes de turbidez*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Citado na página 47.

REEB, G. Sur les points singuliers d'une forme de pfaff complètement integrable ou d'une fonction numerique [on the singular points of a completely integrable pfaff form or of a numerical function]. *Comptes Rendus Acad. Sciences Paris*, v. 222, p. 847–849, 1946. Citado na página 58.

SCULLAND, K. *High avalanche dangers in Banff, Yoho, and Kootenay National Parks*. 2019. The Golden Star. [Online; acessado em 09 de julho de 2019]. Disponível em: <<https://www.thegoldenstar.net/news/high-avalanche-dangers-in-banff-yoho-and-kootenay-national-parks/1504860/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.

SEVILLA-LARA, L.; LIAO, Y.; GÜNEY, F.; JAMPANI, V.; GEIGER, A.; BLACK, M. J. On the integration of optical flow and action recognition. In: SPRINGER. *German Conference on Pattern Recognition*. [S.l.], 2018. p. 281–297. Citado na página 36.

SHER, D.; WOODS, A. W. Gravity currents: entrainment, stratification and self-similarity. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 784, p. 130–162, 2015. Citado na página 44.

SHI, J.; TOMASI, C. Good features to track. In: *IEEE CVPR*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 593–600. Citado 5 vezes nas páginas 60, 61, 69, 78 e 95.

SIMPSON, J. *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999. (In the Environment and the Lab). Citado 5 vezes nas páginas 31, 41, 46, 47 e 69.

SIMPSON, J. E. Effects of the lower boundary on the head of a gravity current. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 53, n. 4, p. 759–768, 1972. Citado 26 vezes nas páginas 15, 16, 17, 18, 32, 33, 34, 44, 46, 47, 50, 51, 52, 54, 56, 60, 66, 69, 70, 73, 74, 77, 78, 80, 81 e 95.

SIMPSON, J. E.; BRITTER, R. E. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 94, n. 3, p. 477–495, 1979. Citado na página 46.

STEFANSKI, R.; SIVAKUMAR, M. Impacts of sand and dust storms on agriculture and potential agricultural applications of a sdsws. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [S.l.], 2009. v. 7, n. 1, p. 012016. Citado na página 32.

SUHR, J. K. Kanade-lucas-tomasi (klt) feature tracker. *Computer Vision (EEE6503)*, p. 9–18, 2009. Citado 8 vezes nas páginas 18, 66, 67, 77, 78, 82, 87 e 95.

SUZUKI, S. et al. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer vision, graphics, and image processing*, Elsevier, v. 30, n. 1, p. 32–46, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 78.

SYVITSKI, J. P.; ALEXANDER, C. R.; FIELD, M. E.; GARDNER, J. V.; ORANGE, D. L.; YUN, J. W. Continental-slope sedimentation: The view from northern california. *Oceanography*, Oceanography Society, v. 9, n. 3, p. 163–167, 1996. Citado na página 34.

SYVITSKI, J. P.; ALEXANDER, C. R.; FIELD, M. E.; GARDNER, J. V.; ORANGE, D. L.; YUN, J. W. Continental-slope sedimentation: The view from northern california. *Oceanography*, Oceanography Society, v. 9, n. 3, p. 163–167, 1996. Citado na página 47.

TOMASI, C.; KANADE, T. *Detection and tracking of point*. [S.l.], 1991. Citado na página 66.

VAREJÃO, V. *Barreira de 9 km não impede chegada de lama ao mar no ES*. 2015. Acessado em 02/07/2020. Disponível em: <<http://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/2015/11/barreira-de-9-km-nao-impede-chegada-de-mancha-de-lama-ao-mar-no-es.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 35.

WAXMAN, A. M.; WU, J.; BERGHOLM, F. Convected activation profiles and the measurement of visual motion. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *Proceedings CVPR'88: The Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. [S.l.], 1988. p. 717–718. Citado na página 64.

WIRED.COM. *The Origin of Submarine Canyons — Ideas From the 1930s*. 2011. Acessado em 03/01/2016. Disponível em: <<http://www.wired.com/2011/11/ideas-about-the-origin-of-submarine-canyons-from-the-1930s/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.

ZAKERI, A.; HØEG, K.; NADIM, F. Submarine debris flow impact on pipelines — part i: Experimental investigation. *Coastal Engineering*, v. 55, n. 12, p. 1209 – 1218, 2008. Citado na página 47.

ZGHEIB, N.; BONOMETTI, T.; BALACHANDAR, S. Direct numerical simulation of cylindrical particle-laden gravity currents. *Computers & Fluids*, v. 123, p. 23 – 31, 2015. Citado na página 44.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [prograd@pucrs.br](mailto:prograd@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)