

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ROGÉRIO MAGALHAES COELHO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE
VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM
UM ESCOAMENTO RASO**

POÇOS DE CALDAS - MG

2024

ROGÉRIO MAGALHAES COELHO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE
VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM
UM ESCOAMENTO RASO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas. Linha de pesquisa: Recursos Hídricos.

Orientador: Alexandre Silveira

Coorientador: Laos Alexandre Hirano

POÇOS DE CALDAS - MG

2024

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Coelho, Rogério Magalhães .

Desenvolvimento de metodologia para estimativa de velocidade do escoamento e do transporte de sedimentos em um escoamento raso / Rogério Magalhães Coelho. - Poços de Caldas, MG, 2024.

91 f. : il. -

Orientador(a): Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.

Bibliografia.

1. Escoamento superficial. 2. Shallow flow. 3. Carreamento de sedimentos. 4. Transporte de poluentes. 5. Termografia por infravermelho. I. Silveira, Alexandre , orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

ROGÉRIO MAGALHAES COELHO

Desenvolvimento de metodologia para estimativa de velocidade do escoamento e do transporte de sedimentos em um escoamento raso

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 31 de janeiro de 2024

Prof. Dr. Alexandre Silveira

Presidente da Banca Examinadora

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi Instituição:

Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves Instituição:

Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 04/03/2024, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1176420** e o código CRC **0E2D725**

Dedico esta dissertação aos meus amados pais, Juscelino Micheleto Coelho e Letícia Magalhães Coelho. Seu apoio inabalável, dedicação incansável e sacrifícios incontáveis foram os alicerces que tornaram possível a minha jornada educacional ao longo da vida. Suas orientações sábias, amor incondicional e exemplo inspirador moldaram não apenas meu percurso acadêmico, mas também meu caráter e valores. Que esta dissertação seja uma pequena expressão da minha gratidão eterna por tudo que vocês fizeram por mim. Este trabalho é dedicado a vocês, com todo o meu amor e admiração.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de Financiamento 001.

Agradeço profundamente aos meus orientadores, Prof. Dr. Alexandre Silveira e Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano, pela orientação, paciência, incentivo e expertise que compartilharam comigo ao longo deste projeto. Seus conselhos foram essenciais para o sucesso desta dissertação.

À minha família, meus pais Juscelino Micheleto Coelho e Letícia Magalhães Coelho, e meu irmão Marcelo Magalhães Coelho, dedico toda minha gratidão por seu amor incondicional, apoio constante e por terem proporcionado as condições necessárias para que eu pudesse me dedicar integralmente aos estudos durante este período.

Agradeço também à minha namorada e parceira Mara Aline Oliveira pela ajuda com a elaboração do texto e pelo apoio emocional e parceria ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença foi fundamental para superar os desafios e alcançar os objetivos deste trabalho.

Também gostaria de agradecer sinceramente a todas as pessoas que contribuíram diretamente para a realização dos experimentos laboratoriais deste trabalho. Agradeço especialmente aos técnicos de laboratório pela assistência e suporte prestados ao longo desta jornada.

Por fim, expresso meu reconhecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica.

"Anyone who can solve the problems of water will be worthy of two Nobel prizes - one for peace and one for science."

(Kennedy, J. F. (1962). Speech at the University of California, Berkeley. Retrieved from The American Presidency Project.)

RESUMO

O escoamento superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relativo ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. Quando o escoamento ocorre em áreas urbanas impermeabilizadas, geralmente ocorre em baixa lâmina d'água, denominado escoamento em baixa lâmina (*Shallow flow*). Sua caracterização é dificultada por conta da inviabilidade de se utilizarem técnicas convencionais, pois alteram substancialmente as próprias condições do escoamento. Durante esta fase a poluição da água que entra na rede de coleta pluvial é tipicamente mais concentrada em comparação com o restante da chuva. Estudos sobre comportamento da precipitação-escoamento e transporte de material em simuladores de chuva e escoamento aumentaram por conta da dificuldade de coleta de dados em ambientes urbanizados e também à sua maior facilidade e redução de custo, agilizando e otimizando a coleta de dados. Uma alternativa às técnicas tradicionais de medição da velocidade do carregamento de sedimentos pelo escoamento superficial no simulador é a termografia por infravermelho, que se baseia no fenômeno físico de que todo objeto, com temperatura acima de zero absoluto (-273,15 °C), emite radiação eletromagnética oriunda da excitação das moléculas que o constituem. A metodologia desenvolvida neste trabalho utilizou uma câmera termográfica para analisar a velocidade do transporte de sedimentos por meio da aquisição e tratamento de imagens termográficas, observando o deslocamento, conhecendo o intervalo de tempo e fazendo uso do *software* de tratamento de imagens denominado Tracker, pode-se determinar essa velocidade de carregamento em condições e parâmetros variados. Foram realizados experimentos variando a vazão e a granulometria dos sedimentos, coletando dados óticos e térmicos, além da utilização de técnicas diferentes de determinação da velocidade do escoamento e do transporte de sedimentos. Todas as técnicas utilizadas foram comparadas entre si para a conclusão de qual técnica foi a mais representativa. A técnica de medição ótica se mostrou menos precisa em relação às variações da técnica termográfica.

Palavras-chave: escoamento superficial; *shallow flow*; carregamento de sedimentos; transporte de poluentes; termografia por infravermelho.

ABSTRACT

Surface runoff corresponds to the segment of the hydrological cycle related to the movement of water over the soil surface. When runoff occurs in impermeable urban areas, it usually happens in shallow water depth, referred to as shallow flow. Characterizing shallow flow is challenging due to the impracticality of using conventional techniques, as they substantially alter the flow conditions themselves. During this phase, water pollution entering the stormwater collection system is typically more concentrated compared to the rest of the rainfall. Studies on rainfall-runoff behavior and material transport in rainfall and runoff simulators have increased due to the difficulty of data collection in urban environments and their greater ease, cost reduction, speeding up, and optimizing data collection. An alternative to traditional techniques for measuring sediment transport velocity by surface runoff in the simulator is infrared thermography, which is based on the physical phenomenon that every object, with a temperature above absolute zero (-273.15°C), emits electromagnetic radiation originating from the excitation of its constituent molecules. The methodology developed in this study used a thermal camera to analyze sediment transport velocity through the acquisition and processing of thermographic images, observing displacement, knowing the time interval, and using image processing software called Tracker, the sediment transport velocity could be determined under varied conditions and parameters. Experiments were conducted varying the flow rate and sediment granulometry, collecting optical and thermal data, in addition to using different techniques for determining velocity and flow and sediment transport. All techniques used were compared to each other to conclude which technique was the most representative. The optical measurement technique was less accurate regarding variations than the thermographic technique.

Keywords: runoff; urban drainage; shallow flow; first flush; sediment carry-over; pollutant transport; infrared thermography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Espectro eletromagnético (Micha e Penello; 2011; p.2)	28
Figura 2 -	Croqui da vista lateral do simulador de escoamento superficial. (Do autor)	34
Figura 3 -	Vista superior do simulador de escoamento superficial. (Do autor)	35
Figura 4 -	Pontos 1 a 4 e exemplo das posições de coletade dados óticos	40
Figura 5 -	Exemplo das posições de coleta de dados térmicos da frente	41
Figura 6 -	Exemplo das posições de coleta de dados térmicos do centroide ..	42
Figura 7 -	Representação visual das velocidades óticas para água colorida para Q1	46
Figura 8 -	Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de água aquecida para Q1	48
Figura 9 -	Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de água aquecida para Q1	49
Figura 10 -	Representação visual das velocidades óticas para água colorida para Q2	51
Figura 11 -	Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de água aquecida para Q2	53
Figura 12 -	Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de água aquecida para Q2	54
Figura 13 -	Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q1	56
Figura 14 -	Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q1	58
Figura 15 -	Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q1	59
Figura 16 -	Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q1	61
Figura 17 -	Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q	62
Figura 18 -	Representação visual das velocidades térmicas para o centroide	

	da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q2	64
Figura 19 -	Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q2	65
Figura 20 -	Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q2	67
Figura 21 -	Comparações de V6 com V6 média para água	70
Figura 22 -	Comparações de V6 térmicas com V6 óticas	71
Figura 23 -	Comparações de V6 térmicas pela frente com pelo centroide	72
Figura 24 -	Comparações de V6 com V6 média para o sedimento fino	73
Figura 25 -	Comparações de V6 com V6 média para o sedimento grosso	74
Figura 26 -	Comparações de V6 térmicas pela frente com pelo centroide para o sedimento fino	75
Figura 27 -	Comparações de V6 térmicas pela frente com pelo centroide para o sedimento grosso	76
Figura 28 -	Comparação de Vtff com velocidades da água	77
Figura 29 -	Comparação de Vtgf com velocidades da água	78
Figura 30 -	Comparação de Vtfc com velocidades da água	79
Figura 31 -	Comparação de Vtgc com velocidades da água	80
Figura 32 -	Comparação de Vtff com Vtfc	81
Figura 33 -	Comparação de Vtgf com Vtgc	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT NBR 15572:2008	29
Tabela 2 -	Nomenclaturas e siglas adotadas para as velocidades analisadas..	39
Tabela 3 -	Velocidades obtidas para cada experimento e seus respectivos pontos e intervalos	44
Tabela 4 -	Dados óticos para Q1	45
Tabela 5 -	Dados térmicos para a frente da mancha para Q1	47
Tabela 6 -	Dados térmicos para o centroide da mancha para Q1	48
Tabela 7 -	Dados óticos para Q2	50
Tabela 8 -	Dados térmicos para a frente da mancha para Q2	52
Tabela 9 -	Dados térmicos para o centroide da mancha para Q2	53
Tabela 10 -	Dados da frente da mancha de sedimento fino para Q1.....	55
Tabela 11 -	Dados do centroide da mancha de sedimento fino para Q1	56
Tabela 12 -	Dados da frente da mancha de sedimento grosso para Q1	58
Tabela 13 -	Dados do centroide da mancha de sedimento grosso para Q1	60
Tabela 14 -	Dados da frente da mancha de sedimento fino para Q2	61
Tabela 15 -	Dados do centroide da mancha de sedimento fino para Q2	63
Tabela 16 -	Dados da frente da mancha de sedimento grosso para Q2	64
Tabela 17 -	Dados do centroide da mancha de sedimento grosso para Q2	66
Tabela 18 -	Velocidades por condutividade para Q1 e Q2	67
Tabela 19 -	Valores de V6 e V6 médias	68
Tabela 20 -	Desvios para V6 do escoamento de água	69
Tabela 21 -	Desvios para V6	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ESCOAMENTO DE BAIXA LÂMINA (SHALLOW FLOW)	19
2.1.1	Primeira Descarga (First Flush).....	20
2.2	IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	22
2.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E POLUENTES	23
2.3.1	Transporte de Sedimentos pelo Shallow Flow	23
2.4	TÉCNICAS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	24
2.5	TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO	27
2.5.1	Aspectos Fundamentais	27
2.5.2	Espectro Eletromagnético	28
2.5.3	Termografia por Infravermelho como Alternativa às Técnicas Tradicionais de Análises Hidrológicas	29
2.6	SOFTWARES UTILIZADOS PARA O TRATAMENTO DAS IMAGENS TÉRMICAS	31
2.6.1	Softwares para Aquisição e Tratamento Preliminar das Imagens Térmicas.....	31
2.6.2	Software para o Tratamento Físico das Imagens (Tracker)	32
3	METODOLOGIA	33
3.1	MATERIAIS	33
3.1.1	Descrição da Superfície de Testes	33
3.1.2	Câmeras Termográfica e Óptica (FLIR A50)	35
3.1.3	Características do Sedimento	35
3.1.4	Sensor de Condutividade Elétrica	36
3.2	MÉTODOS	36
3.2.1	Descrição dos Experimentos Preliminares	36
3.2.2	Descrição dos Experimentos Principais	37
3.3	VARIAÇÕES DOS EXPERIMENTOS	38
3.3.1	Dados Óticos	39

3.3.2	Dados Térmicos	40
3.3.3	Dados de Condutividade Elétrica	42
3.4	CÁLCULOS DAS INCERTEZAS RELACIONADAS	42
4	RESULTADOS	44
4.1	RESULTADOS ÓTICOS PARA Q1	45
4.2	RESULTADOS TÉRMICOS PARA Q1	47
4.2.1	Resultados para a Frente da Mancha Térmica	47
4.2.2	Resultados para o Centroide da Mancha Térmica	48
4.3	RESULTADOS ÓTICOS PARA Q2	50
4.4	RESULTADOS TÉRMICOS PARA Q2	51
4.4.1	Resultados para a Frente da Mancha Térmica	51
4.4.2	Resultados para o Centroide da Mancha Térmica	53
4.5	RESULTADOS PARA OS SEDIMENTOS PARA Q1	55
4.5.1	Resultados para a Frente da Mancha Térmica de Sedimento Fino.....	55
4.5.2	Resultados para a Centroide da Mancha Térmica de Sedimento Fino.....	56
4.5.3	Resultados para a Frente da Mancha Térmica de Sedimento Grosso.....	58
4.5.4	Resultados para o Centroide da Mancha Térmica de Sedimento Grosso	60
4.6	RESULTADOS PARA OS SEDIMENTOS PARA Q2	61
4.6.1	Resultados para a Frente da Mancha Térmica de Sedimento Fino	61
4.6.2	Resultados para o Centroide da Mancha Térmica de Sedimento Fino	63
4.6.3	Resultados para a Frente da Mancha Térmica de Sedimento Grosso	64
4.6.4	Resultados para o Centroide da Mancha Térmica de Sedimento Grosso	66
4.7	RESULTADOS PARA A CONDUTIVIDADE	67
4.8	COMPARAÇÕES DE RESULTADOS	68
4.8.1	Comparações de Resultados para o Escoamento de Água	69
4.8.2	Comparações de Resultados para o Transporte de Sedimentos.....	72

4.8.3	Comparações de Resultados entre o Escoamento e o Transporte de Sedimentos	76
5	CONCLUSÕES	83
6	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual está diretamente ligada ao uso da água, seja para abastecimento público, irrigação agrícola, geração de energia, uso industrial, entre outros. Problemas relacionados à qualidade e quantidade de água podem estar ligados à falta de um planejamento adequado da gestão de recursos hídricos.

Em meios urbanos, a impermeabilização do solo acarreta um aumento da parte da precipitação que escoar sobre a superfície, o escoamento superficial. Esse aumento, além de problemas de sobrecarga no sistema de drenagem urbana, acarretando alagamentos, também é uma fonte significativa de poluição para os corpos hídricos, já que carrega poluentes gerados pelo meio urbano para os corpos receptores.

O escoamento superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relativo ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. É de fundamental importância para o projeto de obras de engenharia, dimensionadas de modo a suportar as vazões máximas decorrentes do escoamento superficial.

A velocidade do fluxo é uma propriedade hidráulica básica de fluxos rasos (por exemplo, fluxo superficial, fluxo de um riacho) e a maior parte da pesquisa hidroambiental depende de sua medição precisa (Giménez *et al.*, 2004; Govers, 1992; Takken; Govers 2000). Os fluxos rasos podem ocorrer em bacias naturais e urbanizadas (por exemplo, encostas de colinas, sistemas de drenagem) e a sua caracterização é crucial para a modelação do escoamento, da erosão e da qualidade da água (Kreibich *et al.*, 2009; Mügler *et al.*, 2011).

As técnicas de medição da velocidade do fluxo variam de acordo com a dimensão do corpo d'água, sua acessibilidade e características. Recentemente não foram feitos grandes desenvolvimentos na tecnologia de detecção, resultando em um amplo espectro de opções poderosas e versáteis para dados de velocidade de fluxo de alta precisão. Contudo, os dispositivos de medição podem ter algumas limitações quando operam fora das suas condições ideais de medição. Particularmente para fluxos rasos, a caracterização dos campos de velocidade é complicada, principalmente devido à sua falta de profundidade (algo de vários milímetros a alguns centímetros) e outros problemas, como a variabilidade do leito do canal devido à erosão, presença de sedimentos e outros detritos no fluxo ou mesmo presença de vegetação ocultando a área de medição. Isto restringe o uso de muitos dispositivos de medição de vazão.

O transporte de poluentes em áreas urbanas tornou-se um tema de estudo muito importante, pois com a aceleração da urbanização e a ausência de um planejamento eficiente, o ciclo hidrológico urbano é modificado substancialmente, ocasionando grandes impactos como o aumento do escoamento superficial e diminuição do tempo de concentração, o que leva a impactos econômicos, sociais e ambientais. Não somente os aspectos físicos da água são afetados pela urbanização, mas também a qualidade desta. O aumento de resíduos produzidos nas cidades, que se depositam nas áreas onde ocorre o escoamento superficial, como ruas e sarjetas, compromete a qualidade das águas que chegarão aos corpos hídricos. Por isso, o estudo do transporte de poluentes através do escoamento superficial possui grande importância visto que impactos ambientais, econômicos e sociais podem ser reduzidos, além de auxiliar o poder público a realizar um planejamento urbano adequado.

Escoamentos em meios urbanos, ocorrentes principalmente em superfícies impermeáveis, são caracterizados por baixas lâminas líquidas (*Shallow flow*) com transporte generalizado de sedimentos de pequena granulometria, por essa razão métodos tradicionais de medição direta, como por exemplo a imersão de um sensor de turbidez, são inviáveis pois alteram substancialmente as próprias condições do escoamento. Uma alternativa é a coleta de amostras para posterior análises em laboratório (Abrantes *et al.*, 2019).

Os fluxos rasos podem ocorrer em bacias naturais e urbanizadas (por exemplo, encostas de colinas, sistemas de drenagem) e a sua caracterização é crucial para a modelação do escoamento, da erosão e da qualidade da água, (Kreibich *et al.*, 2009; Mügler *et al.*, 2011).

First flush, ou primeira descarga, é dito como o escoamento superficial inicial gerado por uma precipitação. Durante esta fase, a poluição da água que entra na rede de coleta pluvial, em áreas com altas proporções de superfícies impermeáveis, é tipicamente mais concentrada em comparação com o restante da chuva. Consequentemente, essas altas concentrações de escoamento urbano resultam em altos níveis de poluentes descarregados de esgotos pluviais para águas superficiais (Stenstrom; Kayhanian, 2005).

Segundo Deletic (1998), o tratamento do escoamento superficial urbano está se tornando uma prática comum. Uma boa gestão de obras de tratamento requer uma compreensão do fenômeno de primeira descarga do fluxo (*First flush*) de escoamento superficial em sistemas de drenagem urbana.

As dificuldades para a realização de trabalhos em campo são fatores importantes a serem considerados. Segundo Quiles (2019), a falta de dados causa dificuldades no desenvolvimento de pesquisas nas áreas do conhecimento envolvidas, como a hidrologia por exemplo. De acordo com Lima (2017), em bacias urbanas, a dificuldade operacional, a

imprevisibilidade da ocorrência ou não de precipitação e magnitude de área de controle, entre outros, são fatores que dificultam o monitoramento em escala real e algumas das alternativas podem ser o uso de modelos físicos reduzidos, os simuladores de chuva e escoamento em escala laboratorial.

Os projetos realizados em campo comumente são projetos trabalhosos, requerem muito esforço e recursos financeiros, sendo que o alto custo para realização de experimentos em campo muitas vezes acaba inviabilizando determinados projetos.

De acordo com Pessoti (2018), a popularidade dos simuladores de chuva e escoamento para estudos sobre comportamento da precipitação-escoamento e transporte de material aumentou por conta da dificuldade de coleta de dados em ambientes urbanizados e também à sua maior facilidade, redução de custo, agilizando e otimizando a coleta de dados. Felice (2017) diz que em escalas de laboratório, há algum tempo que os modelos físicos e simuladores de chuva obtêm êxito no estudo do comportamento do processo de chuva-escoamento e, ultimamente, também têm obtido sucesso em trabalhos sobre a dinâmica do transporte de sedimentos e poluentes no escoamento superficial.

A termografia por infravermelho é uma área do conhecimento bastante utilizada em estudos hidrológicos, porém seu uso na identificação de características do escoamento superficial é recente. Consiste em uma técnica onde é possível obter imagens e medir a energia infravermelha emitida ou refletida por uma superfície.

Lima (2017) afirma que a utilização de câmeras termográficas portáteis tem ganho enorme popularidade, devido à facilidade de manuseio e ajuste do campo de visão da câmera em relação à área de estudo.

Silva Junior (2014) avaliou como satisfatório o uso da termografia por infravermelho na determinação do diâmetro de gotas de chuva em uma superfície. O mesmo autor utilizou a técnica termográfica para estimativas de condutividade hidráulica no solo.

De acordo com Abrantes e Lima (2014c), resultados laboratoriais mostraram que traçadores térmicos são eficientes na medição das características do escoamento superficial, sendo os dados obtidos similares aos de técnicas convencionais, como os traçadores colorimétricos por exemplo. Foi verificada também que a termografia utilizada para medição do micro relevo da superfície apresenta interesse prático.

Deste modo, este projeto visa aplicar o uso de técnicas termográficas para a determinação da velocidade de escoamentos de baixa lâmina e também de transporte de sedimentos em escoamentos desse tipo. Foi desenvolvida uma metodologia para a aquisição e tratamento de imagens óticas e térmicas, possibilitando a caracterização da distribuição e

velocidade do escoamento e do transporte dos sedimentos em regimes de baixa lâmina d'água, para os quais os métodos tradicionais de medição não são aplicáveis (coleta de amostras, filtração a vácuo, inserção de turbidímetros).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ESCOAMENTO DE BAIXA LÂMINA (*SHALLOW FLOW*)

O escoamento superficial pode ser descrito como a parcela de água precipitada que não é absorvida pelo solo ou fica retida em depressões no terreno, escoando sob a superfície.

Em países tropicais como o Brasil, o escoamento superficial se dá somente pela ação da pluviosidade, podendo ocorrer em outros locais do mundo devido ao derretimento de gelo. A chuva oriunda de precipitações é um fator relevante nos estudos da hidrologia, pois tem a capacidade de produzir o escoamento superficial (Quiles, 2019).

Em áreas impermeabilizadas pela urbanização, segundo Castro (2011), tipos diferentes de superfícies impermeáveis, como ruas e estradas, áreas industriais, residenciais e comerciais, ocasionam o escoamento superficial das águas oriundas de pluviosidade. Sendo assim, superfícies com pouca capacidade de permeabilidade do solo acarretam um excesso de escoamento durante eventos de chuva.

Escoamentos rasos são definidos como escoamentos turbulentos em camadas delimitados por uma superfície de fundo e por outra superfície em contato com a atmosfera (superfície livre), caracterizados por dimensões hidráulicas horizontais significativamente maiores que as verticais (Jirka; Uijttewaal, 2004).

Ainda segundo Jirka e Uijttewaal (2004), muitos fluxos em situações ambientais e industriais podem ser caracterizados como "rasos", com as escalas horizontais sendo essencialmente maiores que o tamanho vertical do domínio do fluxo. São exemplos os caudais em rios, estuários, zona costeira, portos, reservatórios de água doce, mas também em câmaras de decantação para tratamento de águas. A superficialidade implica em uma dinâmica de fluxo bastante específica.

Segundo Abrantes *et al.* (2019), escoamentos com baixa amplitude vertical são caracterizados como *Shallow flow*, ou seja, escoamentos rasos. Esse tipo de escoamento apresenta uma dificuldade maior em ser caracterizado, devido à sua estreita camada de escoamento, o que dificulta medir sua velocidade ou vazão com técnicas intrusivas sem que haja interferência no escoamento. Para tal, existem algumas técnicas, que serão apresentadas adiante, que permitem essas medições sem alterar as características fundamentais do fluxo.

2.1.1 Primeira descarga (*first flush*)

De acordo com Stenstrom e Kayhanian (2005), o fenômeno de “primeira descarga” (*First flush*) é geralmente adotado para eventos de chuva e pode ser descrito como uma primeira descarga de concentração de poluentes ou uma primeira descarga de massa. Um primeiro fluxo de concentração ocorre quando o primeiro escoamento tem alta concentração em relação ao escoamento posterior no evento. A concentração de poluentes alta é dependente do fluxo e ocorrerá quando as concentrações do escoamento inicial forem maiores em relação à taxa de emissão de massa no escoamento posterior.

Concentrações altas em primeiras descargas foram frequentemente relatadas, mas as primeiras descargas em massa raramente foram quantificadas. Por exemplo, a maioria dos parâmetros monitorados para todos os eventos no estudo do autor apresentaram maiores concentrações no início do escoamento. As primeiras descargas em massa foram observadas com menor frequência e com magnitudes menores. Isto se dá devido à natureza do escoamento, que geralmente tem menor vazão no início da chuva do que no meio da mesma. Portanto, a taxa de emissão de massa no meio do evento pode ser maior do que no início, apesar das concentrações mais baixas no escoamento ocorrente no meio do evento de precipitação. O conceito pode ser aplicado a qualquer constituinte particular ou parâmetro de qualidade da água.

Deletic (1998) define a primeira descarga como a porcentagem da carga total de poluição do evento transportada pelos primeiros 20% do volume de escoamento pluvial. Permitindo a construção de curvas acumulativas de transporte de material para todas as características de escoamento e qualidade da água medidas.

Segundo Maestre e Pitt (2005), o termo "efeito de primeira descarga" refere-se a mudanças rápidas na qualidade da água (concentração ou carga de poluentes) que ocorrem após as chuvas do início da estação. Partículas de solo e vegetação são arrastadas para os corpos d'água, os sedimentos e outras partículas orgânicas acumuladas no leito do rio são ressuspensos, e as substâncias dissolvidas do solo e das águas subterrâneas rasas podem ser despejadas nos riachos. Pesquisas mostraram que esse efeito não foi observado em áreas relativamente permeáveis.

O termo também é frequentemente usado para se referir à primeira enchente após um período seco, que supostamente contém concentrações mais altas do que uma subsequente. Isso é conhecido como "inundação do primeiro fluxo". Existem várias definições do fenômeno da primeira descarga (Gupta; Saul, 1996).

Lee *et al.* (2002) analisou o escoamento de águas pluviais em 13 bacias hidrográficas urbanas separadas, que foram escolhidas para representar tipos distintos de uso e ocupação do solo, residencial e industrial, juntamente com várias características de bacias hidrográficas. Um total de 38 eventos de chuva foram monitorados para investigar o fenômeno da primeira descarga. Este pode ser definido como o período inicial de escoamento de águas pluviais durante o qual a concentração de poluentes é substancialmente maior do que nas fases posteriores. A magnitude do fenômeno da primeira descarga foi calculada usando um método de análise de dados que resulta na determinação da 'concentração média do evento' (EMC). Essa magnitude foi maior para alguns poluentes (por exemplo, sólidos suspensos de áreas residenciais) e menor para outros (por exemplo, demanda química de oxigênio de áreas industriais). Não foi observada correlação entre o fenômeno da primeira descarga e o período antecedente de clima seco, porém, o fenômeno da primeira descarga foi maior para áreas menores da bacia hidrográfica.

Segundo Mamun, Shams e Nuruzzaman (2020), várias definições e critérios do *first flush* estão sendo usados para avaliar e controlar a poluição difusa. O consenso comum é que o *first flush* é geralmente notado nas pequenas bacias hidrográficas (por exemplo, menores que 10 ha) de formas regulares. Considera-se também que 80% da carga poluente pode ser capturada por 30% do volume de escoamento, que se supõe ser devido ao primeiro fluxo do evento de chuva. Porém, tal fenômeno é incerto nas bacias consideravelmente grandes, principalmente devido à diluição e demora no transporte do poluente.

Mamun, Shams e Nuruzzaman (2020) examinaram criticamente o fenômeno do *first-flush* no controle da poluição difusa com base em vários estudos conduzidos pelos pesquisadores envolvidos. Com isso, pode-se inferir que o *first-flush* aparenta ser um critério eficaz para dimensionar instalações de tratamento no local para pequenas bacias (com dimensões semelhantes de comprimento e largura), de onde se espera que o escoamento chegue à estação de tratamento (aproximadamente) ao mesmo tempo. No entanto, para as bacias hidrográficas grandes e alongadas com uma área que cobre mais de 10 ha, um grande volume de escoamento pluvial precisa ser capturado, o que tornaria o sistema de tratamento grande ou menos eficaz. Como tal, para as instalações comunitárias e regionais, a presença do *first-flush* precisa ser confirmada com base na amostragem e análise de dados coletados de vários eventos de chuva de diferentes durações e intensidades. Portanto, o uso do fenômeno de primeira descarga não deve ser aplicado para o projeto de instalação de tratamento de escoamento pluvial em grandes sistemas de drenagem (maiores que 10 ha) sem monitoramento no local sendo realizado.

Bach, McCarthy e Deletic (2010) afirma que a primeira descarga no escoamento urbano tem sido um fenômeno importante, mas contestado por muitos pesquisadores. As grandes diferenças nas evidências podem ser devidas apenas às limitações existentes para definir do que exatamente consiste no efeito de primeira descarga e à abordagem usada para sua avaliação. Há necessidade de revisitar a teoria da primeira descarga à luz de suas aplicações voltadas às práticas de gerenciamento de drenagem urbana.

Foi proposto pelos autores que o comportamento da primeira descarga de uma bacia seja quantificado pelo volume de escoamento necessário para reduzir as concentrações de poluentes de águas pluviais de uma bacia. O método proposto para avaliação deste volume de escoamento começa por encontrar as concentrações médias de poluentes da bacia para um dado incremento do volume de descarga. Estatísticas não paramétricas são então usadas para estabelecer o polutógrafo característico reunindo incrementos de escoamento estatisticamente indiferentes (conhecidos como fatias). Isso permite a identificação das concentrações de poluentes iniciais e de fundo da bacia e a quantificação do volume da primeira descarga e sua intensidade. A nova técnica foi usada em sete bacias ao redor de Melbourne, na Austrália, com resultados promissores.

2.2 IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A urbanização, de acordo com Collodel (2009), se dá pelo crescimento da população residente em áreas urbanas, em detrimento da população que vive em áreas rurais. Quando há esse fluxo de pessoas em direção às cidades se cria uma tendência de um intensificado crescimento urbano, que acarreta em diversos problemas relacionados à qualidade de vida nas cidades e ao meio ambiente.

Segundo Lima (2017), o crescimento urbano é o maior responsável por alterações que ocorram em uma determinada bacia hidrográfica, devido ao aumento de áreas impermeáveis e também pela quantidade de resíduos sólidos, poluentes e sedimentos produzidos e posteriormente lançados nos corpos hídricos após passarem pela rede de drenagem.

As alterações causadas pela urbanização nas condições naturais de infiltração, topografia, cobertura vegetal e redes de drenagem naturais, modificam os processos de distribuição da água entre a superfície terrestre, subsolo e atmosfera em bacias hidrográficas urbanas (Canholi, 2013).

Portanto, se mostra necessário um completo planejamento do crescimento urbano para que as condições de escoamento superficial prejudicadas pela urbanização possam ser

mitigadas. As influências das áreas impermeáveis no escoamento se dão não somente no aumento do volume do mesmo, mas também em um acréscimo significativo de velocidade, que acarreta na saturação da rede urbana de drenagem, gerando não só inundações, mas também comprometimento da qualidade da água, através do aumento da quantidade de sedimentos que são transportados pelo escoamento superficial até os corpos d'água pelo aumento da velocidade do fluxo, um escoamento mais energético apresenta maior capacidade de carrear sedimentos maiores e mais pesados.

2.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E POLUENTES

Segundo Pessoti (2018), as fontes de poluição dos corpos d'água não são oriundas somente dos esgotos industriais e domésticos, mas também são providas pelo escoamento superficial de grandes centros urbanos que carregam sedimentos.

De acordo com Felice (2017), a ocupação e expansão urbana acarretam em processos erosivos desordenados que causam enormes prejuízos às condições naturais do ecossistema, além da intensidade e forma como esses processos ocorrem podem variar de acordo com as características do solo, assim podem ser reconhecidos como acelerados ou antrópicos, deixando de ser um processo que ocorreria naturalmente.

Lima (2017), avalia que há muita complexidade e pouco entendimento sobre o transporte de sedimentos urbanos e o caminho que este tipo de poluente percorre, desde sua fonte, até os corpos d'água receptores.

Sendo assim, estudos sobre como ocorrem os carregamentos de sedimentos em áreas urbanas ainda necessitam de um aprimoramento e aprofundamento para uma melhor compreensão de quais fatores e características influenciam o processo.

2.3.1 Transporte de sedimentos pelo *shallow flow*

Processos de erosão e transporte de sedimentos em águas rasas iniciam-se quando as gotas de água atingem a superfície do solo. O mecanismo de transporte causado pelo consequente processo chuva-vazão determina a quantidade de sedimento gerado que pode ser transferido encosta abaixo. Muitos estudos e modelos significativos são realizados para investigar esses processos, que diferem em termos de seus fatores de efeito, abordagens, entradas e saídas e estrutura do modelo. Adota-se uma classificação baseada nos processos

representacionais dos modelos de erosão do solo e transporte de sedimentos (empíricos, conceituais, físicos e híbridos), listando-se os modelos comumente utilizados e suas características (Hajigholizadeh; Melesse; Fuentes, 2018).

Farenhorst e Bryan (1995) utilizou uma pequena calha de laboratório em uma inclinação de 0,035 m/m para examinar a seleção de partículas em fluxos rasos. Experimentos iniciais foram realizados em superfícies lisas para medir as taxas de deslocamento de diferentes tamanhos de sedimentos. Frações de tamanho de grão foram introduzidas manualmente em fluxos de $1,37 \times 10^{-4}$ a $3,96 \times 10^{-4}$ m³/s, e clara mobilidade seletiva ocorreu com transporte mais lento na faixa de 63–90 µm. Após esses experimentos, uma mistura de sedimentos foi introduzida seletivamente em fluxos de $1,39 \times 10^{-4}$ a $8,16 \times 10^{-4}$ m³/s em superfícies rugosas. A descarga mais alta teve energia suficiente para transportar todos os tamanhos de partícula, mas os sedimentos da faixa de 355-595 µm foram preferencialmente transportados. Nenhuma das descargas mais baixas foi competente para transportar toda a gama de partículas injetadas e grãos de 45–125 µm sempre foram preferencialmente transportados. Sedimentos mais finos do que os diâmetros médios foram aprisionados em micro bolsas do leito. O progressivo engrossamento do material transportado ao longo do tempo, observado para todas as condições de escoamento, pode estar relacionado ao preenchimento progressivo das bolsas do microleito por sedimentos finos. Tanto a seletividade de transporte quanto a de aprisionamento estão fortemente relacionadas à capacidade do fluxo de transportar toda a gama de grãos presentes, bem como à relação da rugosidade do leito com as partículas transportadas.

2.4 TÉCNICAS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

As técnicas de medição da velocidade do fluxo variam de acordo com a dimensão do corpo d'água, sua acessibilidade e características. Recentemente, não foram feitos desenvolvimentos significativos na tecnologia de detecção. Existe um amplo espectro de opções poderosas e versáteis para dados de velocidade de fluxo de alta precisão. Contudo, os dispositivos de medição podem ter algumas limitações quando operam fora das suas condições ideais de medição. Particularmente para fluxos rasos, a caracterização dos campos de velocidade é complicada, principalmente devido à sua falta de profundidade (algo de vários milímetros a alguns centímetros) e outros problemas, como a variabilidade do leito do canal devido à erosão, presença de sedimentos e outros detritos no fluxo ou mesmo presença de

vegetação ocultando a área de medição. Isto restringe o uso de muitos dispositivos de medição de vazão.

Para corpos d'água mais profundos (por exemplo, grandes rios), a velocidade do fluxo pode ser medida com medidores de corrente ou técnicas de Doppler acústico, como (em português) Dopplervelocimetria acústica (ADV) ou perfilador de corrente Doppler acústico (ADCP), em determinadas seções de monitoramento (Muste; Pratt; Apasojevic, 2004a, 2004b; Kimiaghali; Clark; Ahmari, 2016). Embora intrusivas, essas técnicas fornecem uma caracterização confiável do perfil vertical da velocidade do fluxo; no entanto, estes instrumentos nem sempre podem ser usados em águas muito rasas. Outras técnicas, como satélites, radares e sensores de micro-ondas, portáteis ou acoplados em um drone, podem ser usadas para estimar com precisão a velocidade do fluxo superficial e de forma não intrusiva (Bjerklie *et al.*, 2003; Bjerklie, 2007; Fulton; Ostrowski, 2008); no entanto, esses métodos são geralmente muito dispendiosos e os de satélite são normalmente aplicados a grandes massas de água.

Durante muito tempo, técnicas menos precisas e menos dispendiosas utilizadas para medições de velocidade de fluxo raso foram baseadas na determinação do tempo de viagem de um rastreador através de uma seção predefinida. Na verdade, muitos pesquisadores consideram os métodos rastreadores como métodos brutos que produzem uma velocidade máxima do fluxo que deve ser corrigida para fornecer uma velocidade média. Entretanto, em fluxos rasos e lamacentos, com profundidades de alguns milímetros a alguns centímetros, nem sempre é possível utilizar os métodos mais sofisticados para medir a verdadeira velocidade média do fluxo, como ADV, ADCP.

Ao usar rastreadores, a precisão da medição depende, em grande parte, do traçador adicionado ao fluxo e na qualidade de sua detecção no fluxo. De acordo com Flury e Wai (2003) um traçador ideal para deverá: i) ter movimento semelhante ao da água; ii) ser conservativo, ou seja, sem degradação durante o tempo de medição; iii) não apresentar sorção para outros componentes do ambiente (ex. solo, sedimentos, rochas); iv) ser claramente distinguível do fundo do sistema; v) ser detectável por análise química ou por visualização; vi) ter baixo impacto toxicológico no ambiente de estudo. Entre os diferentes materiais que foram testados como rastreadores em experimentos de velocidade de fluxo estão os materiais naturais e radioativos, isótopos (Niazi; Bentley; Hayashi, 2017), objetos flutuantes (Tauro *et al.*, 2012a), partículas fluorescentes (Tauro *et al.*, 2012b, c), bactérias (Maurice *et al.*, 2010), sais (Calkins; Dunne, 1970; Day, 1977; Lei; Zhang; Peng, 2005; Shi *et al.*, 2012) e corantes, por exemplo, (Abrahams; Parsons; Luk, 1986; Dunkerley, 2003; Flury; Flühler, 1993; Holden *et al.*, 2008;

Tazioli, 2011). Dependendo do traçador utilizado, câmeras ópticas (por exemplo, para corantes e objetos flutuantes), fluorômetros (por exemplo, para partículas ou corantes fluorescentes) ou sensores de condutividade elétrica (por exemplo para marcadores de sal), podem ser utilizados.

Tradicionalmente, a estimativa da velocidade média do fluxo usando rastreadores consistiria em medir o tempo desde a injeção do traçador até sua chegada a um ponto de amostragem e depois dividir esse valor por a distância percorrida. Com traçadores de corante, a velocidade da frente é geralmente medida, uma vez que é frequentemente considerado como a superfície de velocidade do fluxo. Com traçadores de sal, a frente, pico ou centroide da concentração do traçador no ponto de amostragem são medidos. A borda de ataque é considerada como a velocidade superficial do fluxo, o pico e o centroide podem ser rotulados como velocidades teóricas médias, se a retenção do sal no fluxo de água for assumida.

Contudo, especialmente em processos de erosão do solo, podem haver trocas constantes de sal entre a superfície do solo e a água, à medida que o solo absorve os sais, ou os sais são dissolvidos e os materiais do solo diluídos no fluxo de água. Além disso, os processos de infiltração levam a uma diminuição da quantidade total de sal no ponto de amostragem. Portanto, nenhuma das velocidades medidas é considerada a velocidade real. Um fator de correção deve ser aplicado para obter a velocidade média do fluxo (Horton; Leach; Vilet, 1934). Este fator de correção varia com as características do fluxo, como velocidade, profundidade, número de Reynolds e número de Froude, com a concentração de sedimentos no escoamento e com as características da superfície do leito como declividade e rugosidade (Emmett, 1970; Dunkerley, 2001).

Métodos ópticos para caracterização de fluxo, como velocimetria de imagem de partículas (PIV) e velocimetria de rastreamento de partículas (PTV), tiveram um grande desenvolvimento e foram ajustados para que pudessem ser usados em ambientes naturais (Tauro; Porfiri; Grimaldi, 2014, 2016). Esses métodos combinam câmeras digitais e lasers para rastrear o movimento de partículas dispersas na água (por exemplo, partículas fluorescentes, bolhas de ar, objetos flutuantes) e, assim, estimar a velocidade do fluxo superficial.

Por muito tempo, técnicas de traçadores baseadas em corantes e sais têm sido utilizadas para estimar velocidades de fluxo do escoamento superficial (Abrantes *et al.*, 2019).

A técnica de traçadores colorimétricos consiste em adicionar corante ao escoamento, em uma posição e condições determinadas, e posteriormente rastrear o movimento da mancha colorida com o auxílio da aquisição e tratamento de imagens coletadas por uma câmera óptica localizada acima da bancada onde ocorre o escoamento. A forma de análise dos dados é semelhante ao método termográfico que está sendo proposto, analisando as imagens em relação

a uma escala de distância conhecida e a um intervalo de tempo conhecido (Abrantes *et al.*, 2019).

A técnica dos traçadores utilizando sal consiste em adicionar uma solução de água e cloreto de sódio, com concentração e volume preestabelecidos baseados em testes preliminares, na parte superior do escoamento, no exultório é colocado um condutivímetro que aferirá o momento em que a condutividade da água aumentar devido á solução adicionada, conhecendo o intervalo de tempo pode-se calcular a velocidade do escoamento superficial (Abrantes *et al.*, 2019).

2.5 TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO

2.5.1 Aspectos fundamentais

A termografia por infravermelho baseia-se no fenômeno físico de que todo objeto, com temperatura acima de zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), emite radiação eletromagnética oriunda da excitação das moléculas que o constituem. Sabe-se que o zero absoluto não é conhecido em condições naturais no universo, portanto todo corpo existente emitirá alguma radiação eletromagnética.

Essa radiação pode ser descrita por duas características; comprimento de onda e intensidade. Ambos os parâmetros estão relacionados por leis da física relativamente simples, relacionadas à temperatura da superfície do objeto. Portanto, é possível usar a intensidade e o comprimento de onda da radiação emitida por um objeto para medir sua temperatura superficial sem a necessidade de contato físico. Isso permite o estudo da transferência de calor entre superfícies ou fluidos (Speakman; Ward, 1998).

Segundo Santos *et al.* (2014), a maior excitação molecular se dá com maior temperatura, ocasionando uma maior intensidade na radiação emitida. Assim, pode-se determinar a temperatura de um corpo de acordo com essa intensidade da radiação oriunda da superfície do mesmo, fato utilizado pela termografia para realizar medidas de temperatura e visualizar a distribuição térmica de uma determinada superfície, sem a necessidade de contato físico.

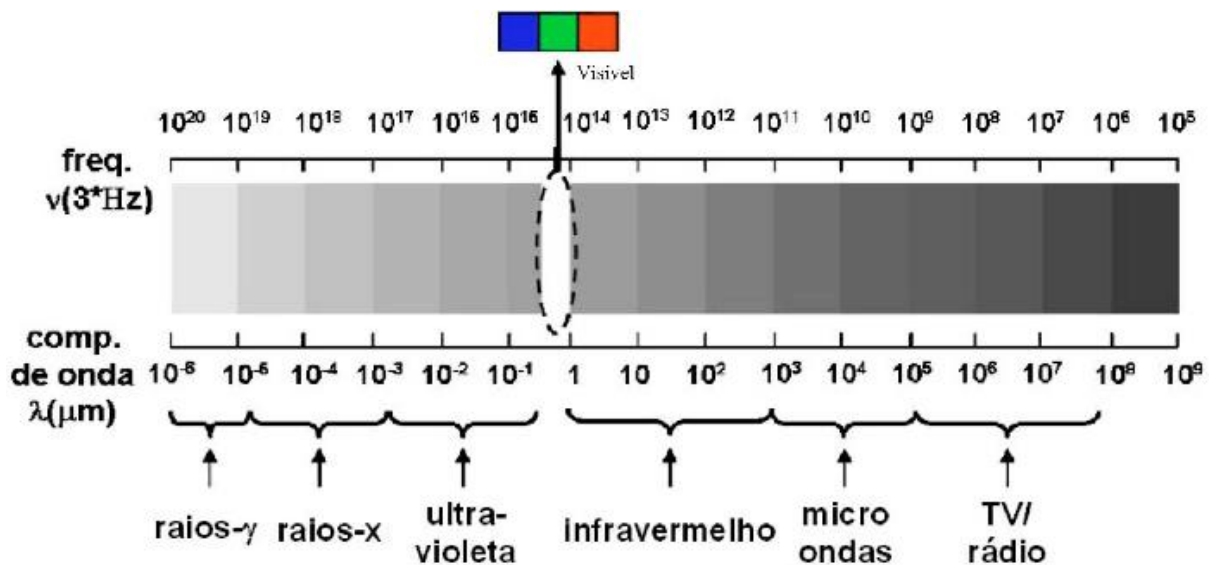
Speakman e Ward (1998) descreveu os princípios físicos que permitem o cálculo das temperaturas de superfície de objetos, do comprimento de onda e intensidade da radiação eletromagnética emitida na região infravermelha do espectro. A transferência de calor por convecção também pode ser calculada a partir do detalhamento de informações sobre a temperatura da superfície.

2.5.2 Espectro eletromagnético

A radiação térmica, um tipo de radiação eletromagnética, pode ser emitida nas faixas de visível, ultravioleta, infravermelho e possivelmente na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético da luz.

A radiação infravermelha se localiza, dentro do espectro eletromagnético, entre a região da luz visível e da radiação de micro-ondas. A faixa ocupada pode ser vista na Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Espectro eletromagnético



Fonte: Micha e Penello (2011, p. 2).

O espectro infravermelho pode ainda ser subdividido em regiões e a proposta da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2008), é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT NBR 15572:2008

Região	Faixa de Comprimento de Onda
Infravermelho muito próximo	0,78 μm – 1,1 μm
Infravermelho Próximo	1,1 μm – 3 μm
Infravermelho médio	3 μm – 6 μm
Infravermelho distante	6 μm – 15 μm
Infravermelho muito distante	15 μm – 1000 μm

Fonte: Do autor (2023).

2.5.3 Termografia por infravermelho como alternativa às técnicas tradicionais de análises hidrológicas

Com base nesses métodos ópticos descritos anteriormente, Tauro e Grimaldi (2017) utilizaram uma câmera infravermelha para rastrear partículas térmicas (cubos de gelo) para monitorar velocidade superficial do fluxo.

Uma abordagem mais recente utiliza traçadores térmicos (por exemplo, água mais quente ou mais fria do que o fluxo) que pode ser detectada por equipamento sensor infravermelho (por exemplo, câmera de vídeo infravermelha). Traçadores térmicos foram testados como instrumentos para medir velocidades de fluxo (Schuetz *et al.*, 2012), bem como para caracterização e microrelevo (Abrantes *et al.*, 2014a), permeabilidade macroporosidade (Abrantes *et a.*, 2014a, 2014c) e repelência da superfície do solo.

De acordo com Montenegro *et al.* (2013), a velocidade do fluxo é uma propriedade hidráulica básica dos fluxos de superfície e seu cálculo preciso é necessário para modelos hidrológicos baseados em processos, como erosão do solo e modelos de desenvolvimento de sulcos, bem como para modelagem de transporte de sedimentos e solutos por escoamento. O autor apresentou uma técnica baseada em termografia infravermelha para visualizar fluxos muito rasos e permitir uma medição quantitativa do fluxo terrestre e das velocidades do fluxo em sulcos.

Experimentos de laboratório foram conduzidos para comparar a técnica tradicional de traçador de corante com esta nova técnica de traçador térmico, injetando um traçador combinado (corante aquecido) em águas superficiais de fluxo raso. As velocidades do traçador de ponta estimadas por meio de vídeo infravermelho e pelo vídeo de imagem real usual foram comparadas. Os resultados mostram que os traçadores térmicos podem ser usados para estimar as velocidades de escoamento em terra e em sulcos, uma vez que as medições são semelhantes

àquelas resultantes do uso de traçadores de corantes. A principal vantagem do uso da termografia foi a maior visibilidade da borda de ataque do traçador injetado em comparação com os vídeos de imagens reais.

Abrantes *et al.* (2014b) apresenta uma nova técnica para estimar o microrrelevo da superfície do solo e a morfologia dos sulcos presentes usando termografia por infravermelho. Esta técnica pode ser especificamente útil para caracterizar o microrrelevo da superfície do solo para identificar caminhos de fluxo preferenciais para estimar a elevação da superfície do solo onde outras técnicas de medição de microrrelevo não podem ser aplicadas com sucesso. Os testes de laboratório foram realizados usando duas calhas de solo onde foram testadas diferentes condições: com sulcos artificiais criados na superfície do solo e com uma superfície erodida pela água corrente.

A técnica foi testada tanto em condições de solo descoberto quanto na presença de diferentes densidades de cobertura morta. Água aquecida foi usada para criar um gradiente de temperatura na superfície do solo e imagens térmicas de alta resolução da superfície do solo foram obtidas usando uma câmera de vídeo infravermelho portátil.

Pfister *et al.* (2012) concluiu que um grande desafio para a hidrologia no futuro próximo será aplicar com mais frequência abordagens multidisciplinares, de modo a encontrar soluções criativas que nos permitam eventualmente afastar-nos do 'imagens monocromáticas da realidade', e 'ver as captações em cores'. Uma alternativa coerente seria a aquisição e tratamento de imagens hidráulicas e hidrológicas por meio da termografia por infravermelho.

De acordo com Meola e Carlomagno (2004), a termografia infravermelha transforma a energia térmica, emitida por objetos na faixa infravermelha do espectro eletromagnético, em uma imagem visível. Esta característica representa uma grande potencialidade a ser explorada em diversas áreas, que à primeira vista, parece muito caro e difícil de usar. O autor realizou uma breve visão geral dos trabalhos já existentes e descreveu as experiências mais relevantes dedicadas ao uso da termografia infravermelha em três campos principais, dinâmico termo fluida, tecnologia e patrimônio cultural. Os resultados podem ser vistos sob dois pontos de vista, ou como validação da termografia infravermelha como um instrumento de medição completo, ou como apresentação da termografia infravermelha como uma nova técnica capaz de lidar com vários requisitos, que são difíceis de executar com outras técnicas. O estudo também apresentou indicações para uma utilização sinérgica dos diferentes métodos termográficos.

Castanedo e Maldague (2013) diz que a termografia infravermelha, também conhecida como imagem térmica, ou simplesmente termografia, é uma técnica de teste não destrutivo (NDT) que tem recebido grande e crescente atenção para diagnóstico e monitoramento nas

últimas décadas. Isso se deve principalmente ao fato de que as câmeras infravermelhas ou térmicas comerciais, o principal instrumento para realizar a termografia infravermelha, estão melhorando continuamente tanto em sensibilidade quanto em resolução espacial, e estão ficando mais rápidas e relativamente mais baratas. A cada ano ou mais, é possível adquirir uma câmera melhor pelo mesmo custo do modelo anterior do ano anterior.

2.6 SOFTWARES UTILIZADOS PARA O TRATAMENTO DAS IMAGENS TÉRMICAS

2.6.1 *Softwares* para aquisição e tratamento preliminar das imagens térmicas

O Flir Research Studio, segundo o fabricante, foi projetado para fornecer recursos robustos de gravação e análise, para uma variedade de aplicativos de pesquisa e desenvolvimento. Este software avançado de análise térmica oferece um fluxo de trabalho simplificado para exibição, gravação e avaliação de dados câmeras FLIR - permitindo que se interprete e entenda informações críticas rapidamente. O FLIR Research Studio também oferece suporte multilíngue e multiplataforma (Windows, MacOS, Linux) para aumentar a eficiência e ajudar a reduzir o potencial de má interpretação devido a traduções ruins. A edição profissional oferece um conjunto expandido de ferramentas e recursos de análise para ajudar a simplificar os processos de gravação, análise e exportação. O software Research Studio se conecta diretamente às câmeras de Pesquisa e Ciência da FLIR via cabo Ethernet.

Este software foi utilizado para manuseio do equipamento e administração das condições de captura das imagens ou vídeos térmicos dos experimentos em questão.

O Flir ResearchIR, de acordo com o fabricante, é um *software* de análise térmica poderoso para câmeras de Pesquisa e Desenvolvimento/Ciência da FLIR. Ele fornece controle da câmera, gravação de dados de alta velocidade, análise de imagens e compartilhamento de dados. O *software* ResearchIR permite adquirir os arquivos de filmes radiométricos ou imagens térmicas e o tratamento inicial aplicado aos dados obtidos. Este *software* foi utilizado para tratar preliminarmente as imagens térmicas, melhorando visualizações e contrastes e adaptando a paleta de cores com o intuito de facilitar as próximas etapas do tratamento, que consistem na obtenção de dados sobre posição e tempo da mancha térmica obtida no experimento, com intuito de calcular, por exemplo, a velocidade do escoamento ou do carreamento de sedimentos.

2.6.2 *Software* para o tratamento físico das imagens (Tracker)

O Tracker é um *software* livre de análise de vídeo e modelagem desenvolvido para o ensino de Física. O *software* é ligado ao projeto Open Source Physics que consiste em um projeto patrocinado pela National Science Foundation e Davidson College (EUA), cuja missão é disseminar o uso de bibliotecas de código-fonte aberto que cuidam de grande parte do trabalho pesado da física: desenho e plotagem, solucionadores de equações diferenciais, exportação para GIFs animados e filmes, além de ferramentas e simulações compiladas para física e outras simulações numéricas.

Os recursos disponíveis são o rastreamento da posição de um objeto, gráficos e dados de velocidade e aceleração de corpos em movimento, divisão do vídeo por quadros por segundo, calibração de medidas, entre outros (Corrallo; Junqueira; Lima, 2017).

O uso mais básico do *software* se dá a partir da captura e acesso a um vídeo digital. É possível calibrar dimensões e analisar o movimento do objeto em questão, incluindo os respectivos vetores. O aplicativo faz a identificação automática da quantidade de quadros por segundo utilizada na gravação do vídeo original (Bezerra Jr.; Oliveira; Lenz, 2012). A partir desta análise, o programa gera gráficos de diferentes grandezas físicas a partir do ajuste de curvas (como posição, velocidade, aceleração, energia, entre outros), com a possibilidade das respectivas tabelas com os dados gerados. É possível a visualização simultânea do vídeo original com o rastreamento do objeto/corpo físico realizado com o *software* (Corrallo; Junqueira; Lima, 2017). A análise de vídeo em salas de aula para ensino de física tem sido estudada (Struck; Yerrick, 2010).

Uma limitação do Tracker está relacionada à sua resolução temporal. Como esta depende da resolução da câmera no qual o vídeo foi gravado, em casos de filmes com poucos quadros por segundo em que a velocidade do objeto em movimento é alta, as imagens podem aparecer borradas, dificultando a obtenção de valores de posição em função do tempo (Bezerra Jr.; Oliveira; Lenz, 2012).

O uso do *software* para tratamento de imagens térmicas ainda está no estágio inicial de desenvolvimento, não existindo trabalhos acadêmicos na área. Neste estudo apresentamos uma metodologia de tratamento de imagens termográficas para análises de velocidades do escoamento e do carreamento de sedimentos.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Descrição da superfície de testes

Para a realização dos testes laboratoriais, foi utilizado um sistema montado para simular as condições de um escoamento superficial de fluxo raso (*shallow flow*).

Essa estrutura consiste em uma base metálica, com altura a jusante e a montante, respectivamente, de 1,10 e 1,50 metro, com declividade ajustável, sob uma base de acrílico. A plataforma de acrílico, que será a superfície onde ocorrerá o escoamento, apresenta as dimensões de 3,50 metros de comprimento, 30 cm de largura e uma espessura do acrílico de 0,9 cm. As laterais da estrutura, também de acrílico, apresentam 30 cm de altura. Na parte superior da estrutura se encontra um tanque que receberá o fluxo oriundo da bomba, esse tanque, quando cheio, verte uniformemente para o canal, possibilitando a simulação de um escoamento de baixa lâmina e, ao início do mesmo, uma descarga inicial.

Uma estrutura de calhas instalada no final da plataforma de acrílico permite recolher a água escoada para realização de testes de vazão via método direto. Foi montado um sistema que permite tanto a recirculação da água quanto seu descarte.

Na lateral do protótipo foi colocada uma escala para servir de referência de distância às imagens coletadas durante o experimento. Com essa escala e com as medições de tempo poderão ser aferidas as velocidades dos escoamentos e carreamento de sedimentos.

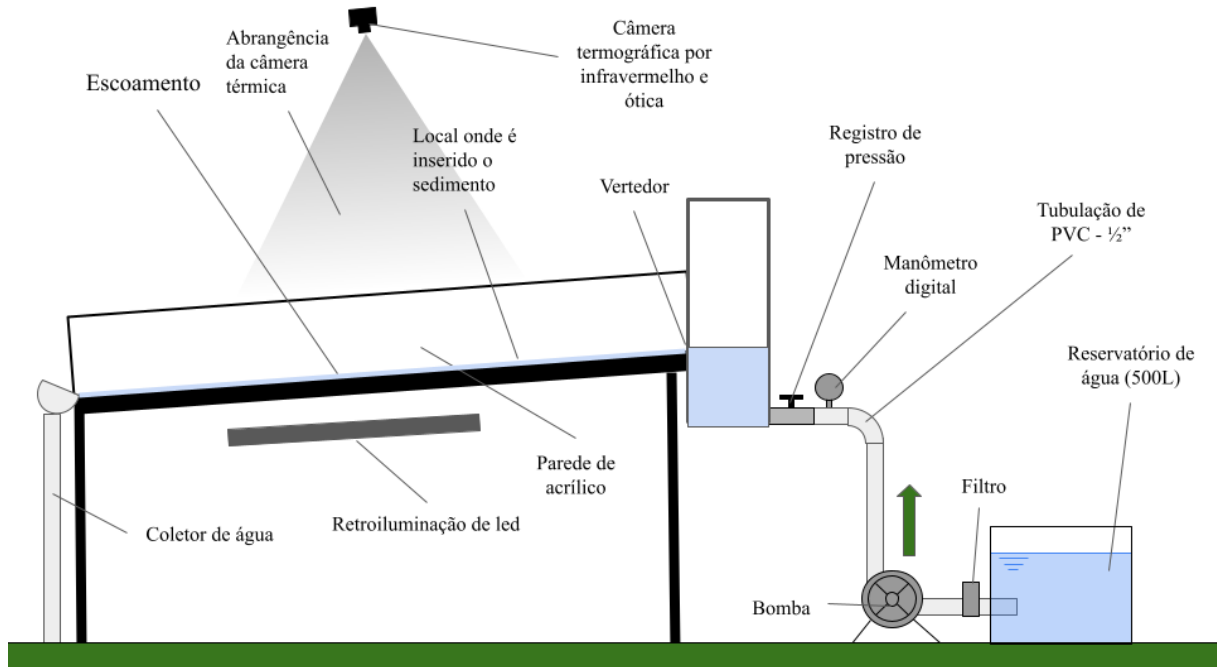
O sistema hidráulico que alimenta o protótipo, consiste em um reservatório de 500 litros, abastecida pela rede de distribuição e água municipal. Uma bomba hidráulica acoplada a um filtro, com a finalidade de proteger a bomba e garantir que não haja outros tipos de sedimentos nos testes. O sistema é alimentado por meio de tubos de PVC com $\frac{1}{2}$ " de diâmetro.

Na saída da bomba foi inserido um manômetro digital do modelo, que afere a pressão interna no sistema, possibilitando a construção de uma curva que relacione essa pressão com a vazão medida no final, garantindo que os testes ocorram de maneira uniforme.

Após o manômetro, foi fixado um registro de pressão que permite variar e controlar a vazão e a pressão do sistema, sendo assim possível encontrar quais as condições ideais para a realização dos experimentos finais. As Figuras 2 e 3 a seguir apresentam as vistas lateral e superior da bancada de testes.

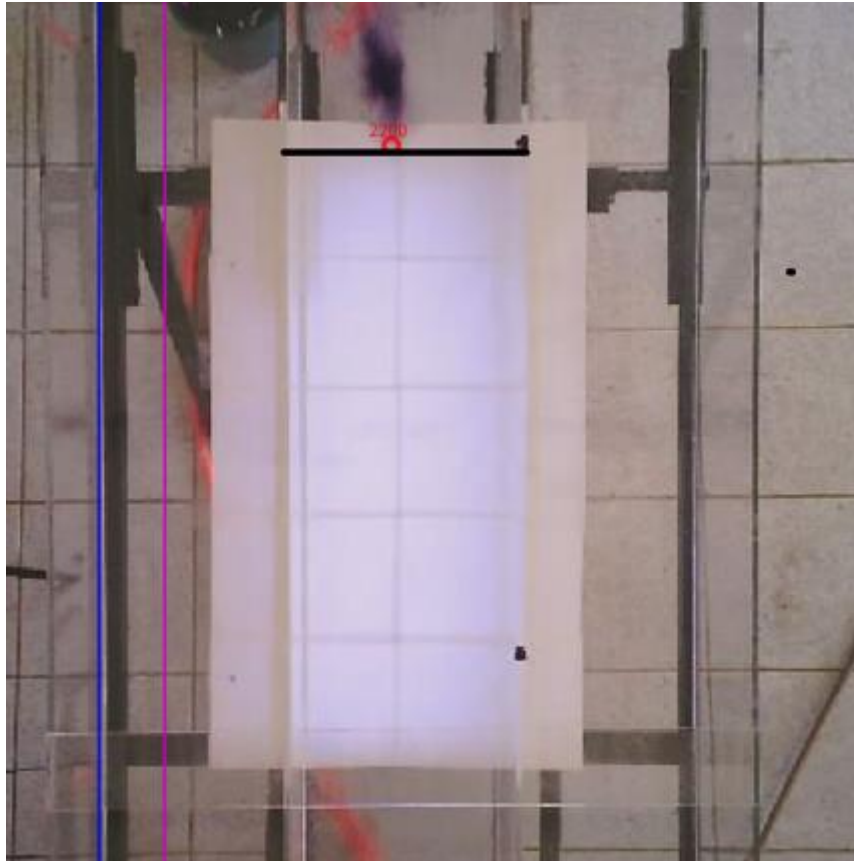
Com intuito de otimizar a visualização ótica, foi instalado abaixo do leito de acrílico um fundo branco retro iluminado por lâmpadas de led.

Figura 2 – Croqui da vista lateral do simulador de escoamento superficial



Fonte: Do autor (2023).

Figura 3 – Vista superior do simulador de escoamento superficial



Fonte: Do autor (2023).

3.1.2 Câmeras termográfica e óptica (Flir A50)

A câmera termográfica utilizada foi uma FLIR A50, que é uma câmera de sensor inteligente, apresentando recursos integrados de análise. Com opções de conexão via Wi-Fi ou cabo Ethernet, apresentando uma câmera óptica visual integrada, o que permite que imagens ópticas e térmicas sejam adquiridas simultaneamente de um mesmo experimento, possibilitado uma comparação instantânea entre ambas.

3.1.3 Características do sedimento

O sedimento utilizado nos testes foi areia de construção comum, peneirada em laboratório, separando diversas faixas de granulometria. Para os ensaios foram utilizadas as faixas granulométricas de $< 0,6$ mm (sedimento - areia fina) e de $0,6$ mm a $1,18$ mm (sedimento - areia grossa).

3.1.4 Sensor de condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi monitorada com um sensor de condutividade CON-BTA© (Vernier Software & Technology LLC, EUA) usando a respectiva interface portátil LabQuest© (Vernier Software & Technology LLC, EUA). O sensor foi colocado em um vertedouro instalado próximo à saída do canal. Dados de condutividade elétrica foram coletados, com resolução temporal de 0,2 s e faixa de medição de condutividade de 0–2000 mS/cm, com precisão de $\pm 3\%$. O sensor possui mecanismo automático de compensação de temperatura entre 5 e 35 C, suficiente para compensar a temperatura do traçador observada na saída do canal.

3.2 MÉTODOS

Inicialmente, foram realizados uma série de ensaios prévios para definir e ajustar as variáveis envolvidas no experimento. Com isso foi possível realizar os experimentos nas melhores condições e circunstâncias dos parâmetros para uma melhor qualidade dos resultados.

3.2.1 Descrição dos experimentos preliminares

Para a realização dos testes, primeiramente foi feito o aquecimento de uma massa pré-determinada de sedimentos em um forno, localizados próximos à estrutura de testes, para que não houvesse grandes diferenças de temperatura entre a retirada do material quente e o posterior uso do mesmo. A massa e a temperatura utilizadas para o sedimento foram variadas nos testes de aquisição de imagens iniciais, os quais indicaram as condições que melhor se encaixam na dinâmica do experimento, apresentam melhores imagens e os resultados mais satisfatórios.

Para dispor os sedimentos na superfície e garantir a padronização dos testes, foi utilizado um cadinho manualmente graduado com base na massa de sedimento a ser deposta. Posteriormente, esse cadinho foi vertido na posição em que se deseja despejar a massa de sedimento

O sedimento aquecido foi disposto na posição desejada, ao centro da superfície de testes (foi utilizado apenas o canal central da estrutura), com uma declividade determinada de 5 % e a uma distância estabelecida da parte superior da bancada onde se encontra o tanque que distribui a água. Após isso, o sistema que simula o escoamento frio foi ligado com uma determinada vazão. Com o auxílio da câmera termográfica, que foi fixada acima do protótipo,

abrangendo uma distância máxima focal da câmera de 79 cm, foi feito um acompanhamento via vídeos gravados do carreamento dos sedimentos e a posterior extração de imagens a cada intervalo de tempo determinado. Após o tratamento destas, foi feita a aferição da velocidade do deslocamento da mancha térmica de partículas, com base no tempo observado e na distância percorrida na escala fixada na lateral do protótipo. O tratamento cinético foi realizado por meio do *software* Tracker.

Além da câmera termográfica, o modelo FLIR A50 apresenta também uma câmera óptica, que auxilia na obtenção e tratamento das imagens.

As variações dos experimentos iniciais com sedimentos aquecidos proporcionam o direcionamento correto para a realização dos experimentos principais, definindo os parâmetros a serem utilizados.

3.2.2 Descrição dos experimentos principais

Para poder comparar velocidades de fluxo rasos medidas com corante, sal e traçadores térmicos, as três técnicas foram testadas simultaneamente em um traçador triplo combinando água colorida-salgada-aquecida. Isso foi feito adicionando corante alimentício roxo escuro e sal de cozinha comum a água obtida do sistema de abastecimento local. Esta solução foi aquecida por meio de um forno elétrico a 100 graus Celsius, temperatura esta que é consideravelmente superior à temperatura média da água do fluxo, que ficou em torno de 24 graus Celsius. Foram utilizadas soluções comuns de corantes alimentares, com proporção de 5 gramas de corante por litro de água, e sal de cozinha comum, com concentração de 30 g de sal para cada litro de água. Estas concentrações foram estabelecidas nos testes preliminares e demonstraram ser detectáveis no fluxo por visualização ótica (traçador de corante), visualização térmica, ou pelo sensor de condutividade elétrica (rastreador de sal).

Quaisquer diferenças entre a densidade e viscosidade do traçador devido a diferenças na temperatura, concentrações de sal e corante devem ser mínimas e não demonstraram ter influência significativa no transporte do traçador triplo no fluxo.

Foram utilizados 20g do traçador triplo a cada repetição dos ensaios foi, um cadinho com a respectiva massa foi adicionado manualmente ao fluxo em uma vazão previamente estabelecida (foram utilizadas duas vazões Q1 e Q2, de magnitude 0,50 l/s e 0,73 l/s, determinadas por meio do método direto de medição de vazões), com uma inclinação do canal de 5 % e a uma posição 0,03 m abaixo do vertedor do canal, com uma distância de 2,86 m até

a posição do condutivímetro, 0,40 m acima do início da zona de captação de imagens óticas e térmicas.

Nas mesmas condições de escoamento e posição em que foi adicionado o traçador triplo, foram vertidos manualmente 5 g de sedimentos aquecidos a 200 graus Celsius, variando entre as duas granulometrias, a primeira (G1) com granulometria menor a 0,6 mm e a segunda (G2) com granulometria entre 0,6 e 1,8 mm. Essas condições foram obtidas dos ensaios preliminares.

A posição inicial de adição do traçador triplo e dos sedimentos foi fixada visando eliminar das análises os dados iniciais de movimentos onde a aceleração é consideravelmente maior do que na região de aquisição das imagens.

A câmera foi instalada a uma altura de 3 m da superfície do canal, com ângulo de filmagem perpendicular ao mesmo, o que resultou em uma amplitude padronizada de 0,79m para as imagens térmicas e óticas, dimensões estas na direção em que ocorre o escoamento. Para padronização dos testes, os pontos de coleta de dados foram adquiridos usando a região ótica correspondente à região térmica.

Todas as variações dos experimentos foram realizadas em triplicata, com intuito de atribuir robustez e validade estatística aos resultados.

3.3 VARIAÇÕES DOS EXPERIMENTOS

Dadas as variações entre as características dos parâmetros envolvidos nos experimentos, foram nomeadas as grandezas de interesse, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Nomenclaturas e siglas adotadas para as velocidades analisadas

Grandeza analisada	Nomenclatura adotada	Nomenclatura para Q1	Nomenclatura para Q2
Velocidade ótica da água com traçador triplo pela frente.	V_o	V_oQ1	V_oQ2
Velocidade térmica da água com traçador triplo pela frente.	V_{taf}	V_{tafQ1}	V_{tafQ2}
Velocidade térmica da água com traçador triplo pelo centroide.	V_{tac}	V_{tacQ1}	V_{tacQ2}
Velocidade da água com traçador triplo pela frente por condutividade.	V_{aCo}	V_{aCoQ1}	V_{aCoQ2}
Velocidade térmica do sedimento fino pela frente	V_{tff}	V_{tffQ1}	V_{tffQ2}
Velocidade térmica do sedimento fino pelo centroide	V_{tfc}	V_{tfcQ1}	V_{tfcQ2}
Velocidade térmica do sedimento grosso pela frente	V_{tgf}	V_{tgfQ1}	V_{tgfQ2}
Velocidade térmica do sedimento grosso pelo centroide	V_{tgc}	V_{tgcQ1}	V_{tgcQ2}

Fonte: Do autor (2023).

Cada velocidade descrita na tabela 2 para as duas vazões diferentes envolvidas foi obtida em triplicata.

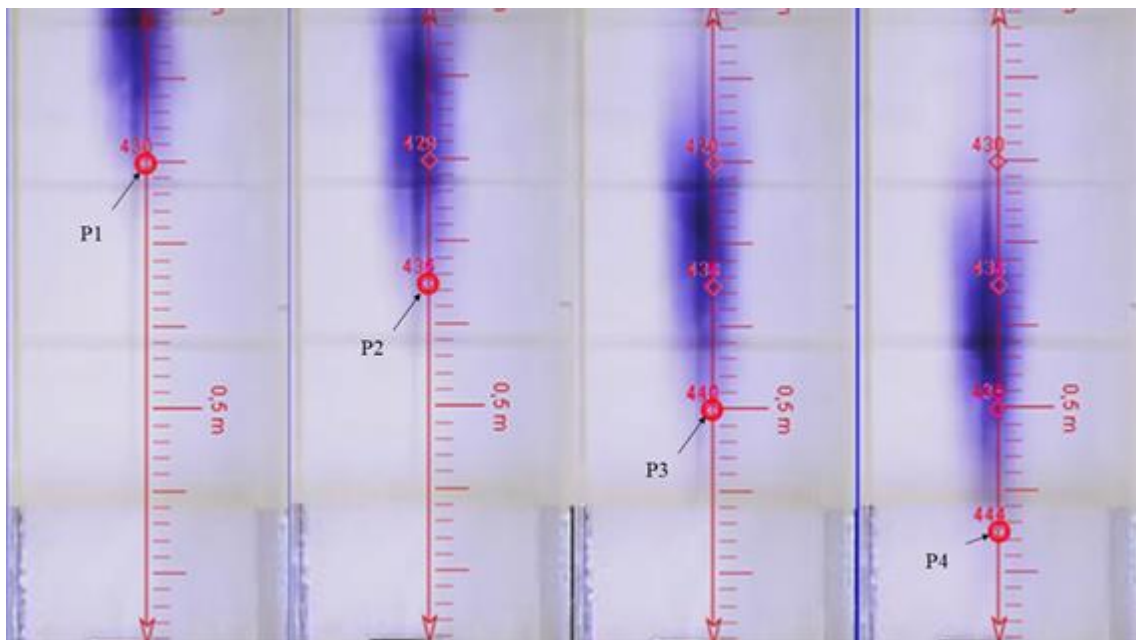
3.3.1 Dados óticos

Para o traçador de corante, apenas as velocidades da frente (V_o) foram determinadas, seguindo o procedimento comumente utilizado, medindo o tempo de viagem da frente durante

sua passagem por quatro valores de distância (Pontos 1 a 4), totalizando três seções de medição, conforme ilustrado na Figura 4. As três seções apresentavam 0,15 m de comprimento foram nas seguintes distâncias do ponto zero localizado no início da região de análise: Ponto 1: 0,20 m; Ponto 2: - 0,35 m; Ponto 3: - 0,50 m e Ponto 4 – 0,65 m.

A fixação do ponto correspondente à frente (Figura 4) foi feita visualmente, aplicando o máximo zoom à imagem e identificando o primeiro pixel distinguível do fundo branco da superfície de testes. Os dados de tempo foram determinados a partir da visualização dos vídeos das imagens óticas por meio do *software* Tracker, coletados no instante em que a frente atinge cada um dos pontos pré-determinados.

Figura 4 - Pontos 1 a 4 e exemplo das posições de coleta de dados óticos



Fonte: Do autor (2023).

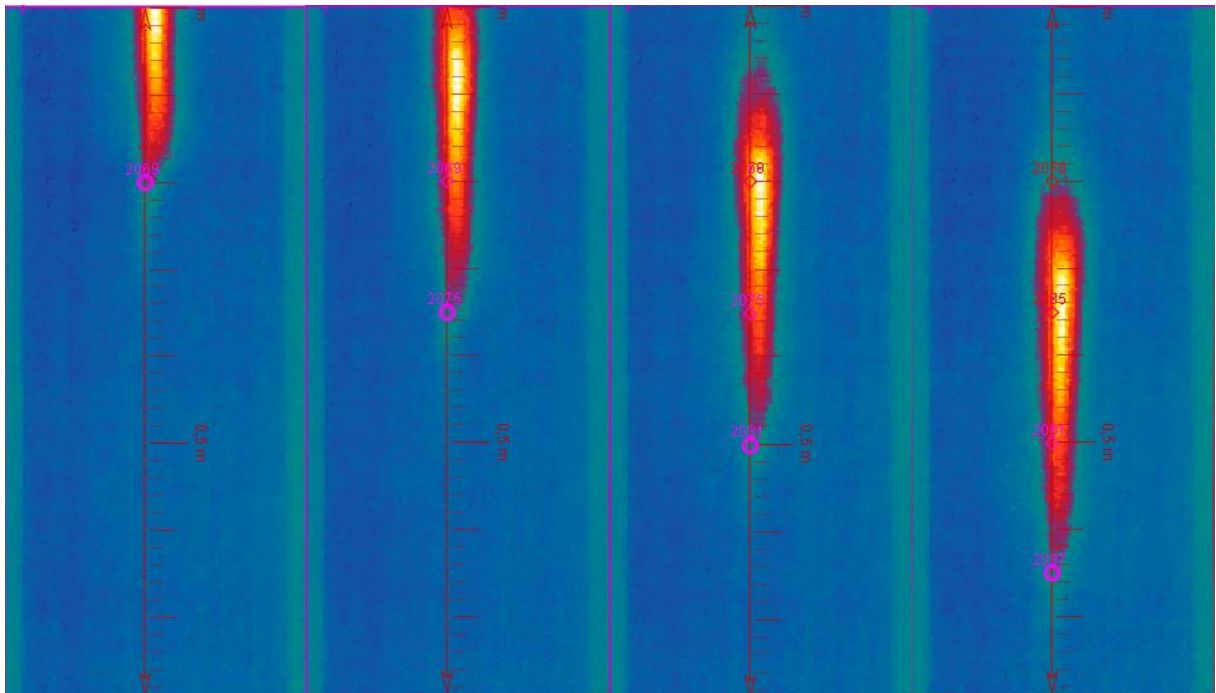
3.3.2 Dados térmicos

Para os dados térmicos, tanto para o traçador quanto para os sedimentos aquecidos, foram levados em consideração as velocidades da frente e do centroide da mancha térmica (Tabela 2). As análises também foram feitas medindo o tempo necessário para que o ponto fixado viajasse ao longo de três sessões (Figuras 5 e 6), com as mesmas dimensões e posições utilizados para as imagens óticas. Essas dimensões foram padronizadas para as análises tanto da frente quanto do centroide.

Os pontos correspondentes à frente e centroide foram fixados levando em conta uma temperatura limite estabelecida para cada série de termogramas, sendo esta a temperatura máxima do fluxo observada no instante inicial do experimento (t_0), antes da adição do traçador e dos sedimentos. A temperatura limite permite identificar as temperaturas associadas ao traçador (ou seja, pixels com valores de temperatura acima da temperatura limite), distinguindo-as assim das outras temperaturas de fluxo (ou seja, pixels com valores de temperatura abaixo do limite de temperatura).

Foi então possível especificar a posição da frente em cada instante analisado, como o primeiro pixel acima da temperatura limite na frente do traçador térmico (ou seja, na direção do escoamento).

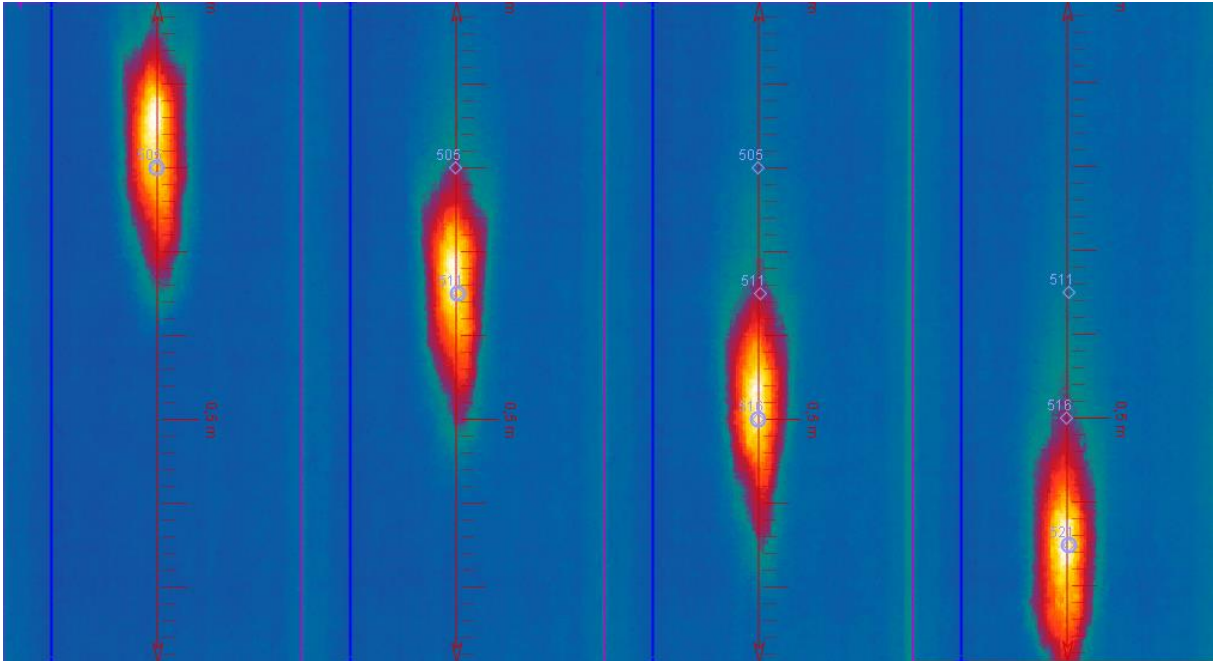
Figura 5 - Exemplo das posições de coleta de dados térmicos da frente



Fonte: Do autor (2023).

Para a determinação dos pontos correspondentes ao centroide das manchas térmicas, foi estabelecido, além do ponto correspondente à frente, um outro ponto na parte posterior da mancha (cauda), utilizando o mesmo critério de se identificar o primeiro pixel acima da temperatura limite. Os pontos equivalentes ao centroide foram encontrados dividindo a distância entre os pontos obtidos na frente e na cauda da mancha por 2.

Figura 6 - Exemplo das posições de coleta de dados térmicos do centroide



Fonte: Do autor (2023).

Todos os dados de tempo e espaço foram obtidos também por meio do *software* Tracker.

3.3.3 Dados de condutividade elétrica

Os dados de condutividade elétrica foram usados para medir a velocidade da frente (VaCo). Tal como acontece com o traçador térmico, um limiar de concentração de sal foi usado para distinguir concentrações. Este limite foi definido no valor máximo de condutividade registrado no fluxo durante os últimos 5 segundos antes da adição do traçador. A velocidade do fluxo determinada pelo traçador salino foi calculada medindo a distância percorrida do ponto de adição do traçador até a seção de detecção, situada a 2,86 m do mesmo. Este valor foi dividido pelo tempo gasto entre a adição do traçador triplo e o primeiro valor de condutividade registrado acima do valor limite (ou seja, chegada da frente).

3.4 CÁLCULOS DAS INCERTEZAS RELACIONADAS

As incertezas associadas a cada velocidade (v) calculada foram propagadas com o uso do método das derivadas parciais, considerando as incertezas instrumentais das grandezas tempo (t) e espaço (x). Para o valor da incerteza relacionada ao tempo, foi utilizado a metade do valor

de tempo entre cada frame do vídeo. Na resolução em que as imagens foram extraídas, esse valor corresponde a 0,015 segundo. Já para as imagens térmicas e óticas, foi utilizado como incerteza das medidas espaciais a metade do valor do intervalo percorrido entre um frame da imagem e seu subsequente, com valor de aproximadamente 0,015 m (valor extraído dos experimentos com a vazão maior Q2).

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial t} \delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \delta x\right)^2} \quad (1)$$

Em que:

- δv é a incerteza em v ,
- δt é a incerteza em t ,
- δx é a incerteza em x ,
- $\partial v / \partial t$ é a derivada parcial de v , em relação a t ,
- $\partial v / \partial x$ é a derivada parcial de v , em relação a x

As incertezas associadas aos valores correspondentes às médias das velocidades foram calculadas pelo método da incerteza padrão da média, seguindo os princípios da propagação de incertezas, utilizando a fórmula que leva em consideração as incertezas individuais dos valores no conjunto.

$$\delta(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum(\delta x_i)^2}{n^2}} \quad (2)$$

Onde:

- δx_i é a incerteza individual de cada dado,
- n é o número total de observações.

4 RESULTADOS

A partir dos quatro pontos de distância fixados (Figura 4) para cada experimento foram obtidos seis valores de velocidade (V1 a V6), além do valor da média entre elas (V média), conforme apresentado na Tabela 3. Estas velocidades são resultado de todas as combinações possíveis entre os pontos, gerados pelos seis intervalos de medição (I1 a I6). A Tabela 3 a seguir descreve para cada velocidade seus respectivos pontos e intervalos. Estes dados passaram por tratamentos estatísticos para obtenção das incertezas associadas e absolutas para cada valor.

Tabela 3 - Velocidades obtidas para cada experimento e seus respectivos pontos e intervalos

Velocidade	Velocidade média entre os pontos:	Intervalo	Comprimento do intervalo (m)
V1	1 e 2	I1	0,15
V2	2 e 3	I2	0,15
V3	3 e 4	I3	0,15
V4	1 e 3	I4	0,30
V5	2 e 4	I5	0,30
V6	1 e 4	I6	0,45

Fonte: Do autor (2023).

Os intervalos que envolvem pontos subsequentes e apresentam comprimento de 0,15 m (I1 a I3) foram nomeados Intervalos Primários, os intervalos que apresentam comprimento de 0,30 m (I4 e I5) foram nomeados Intervalos Secundários e os intervalos com comprimento de 0,45 m (I6) foram nomeados Intervalos Terciários.

Devido à frequência de frames por segundo dos vídeos analisados, foram extraídos dados do frame onde a frente da mancha encontra-se mais próxima do ponto de medição (P1 a P4) em relação aos frames anterior e posterior, isso acarretou algumas velocidades superestimadas e outras subestimadas para determinados Intervalos Primários, pois quando esse intervalo apresentava um frame a mais que a média de frames entre os pontos, o intervalo seguinte tendeu a apresentar um frame a menos, o que acarretou variações sistemáticas nos dados. Por exemplo: se em uma determinada análise os Intervalos Primários variam entre 5 ou 6 frames por intervalo, existirão somente dois valores de velocidade associado a eles, uma respectiva a 5 frames, outra respectiva a 6 frames. Conforme o grau do intervalo aumenta (Intervalos Secundários e Terciários), esse efeito tende a diminuir sua interferência, ou seja,

quando esses intervalos são expandidos e as médias calculadas, os valores tendem a serem mais confiáveis. Quando o número de frames correspondente a um intervalo se manteve constante para todos os intervalos, os dados de velocidade se mantiveram equivalentes.

4.1 RESULTADOS ÓTICOS PARA Q1

A Tabela 4 apresenta resultados obtidos de velocidade e suas incertezas para aos dados óticos da mancha de água colorida para a vazão 1.

Tabela 4 - Dados óticos para Q1

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13
V2	0,90	0,12	13	0,75	0,09	13	0,90	0,12	13
V3	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V4	0,90	0,06	7	0,75	0,05	6	0,90	0,06	7
V5	0,90	0,06	7	0,82	0,05	6	0,90	0,06	7
V6	0,90	0,04	4	0,79	0,03	4	0,90	0,04	4
V média	0,90	0,04	4	0,79	0,03	4	0,90	0,04	4

Fonte: Do autor (2023).

Observou-se nas Tréplicas 1 e 3 a quantidade de frames por Intervalo Primário constante, resultando em velocidades semelhantes para todos os intervalos analisados.

Na Tréplica 2, foi notado que os dois primeiros Intervalos Primários (I1 e I2) apresentaram um frame a mais em relação aos mesmos nas Tréplicas 1 e 3, acarretando menores valores de velocidade. Com isso V4, que é diretamente dependente de V1 e V2, também apresentou o mesmo valor, inferior a V3, que apresentou um frame a mais no intervalo. Assim, os valores de V6 e V média se apresentaram inferiores aos observados nas tréplicas 1 e 3.

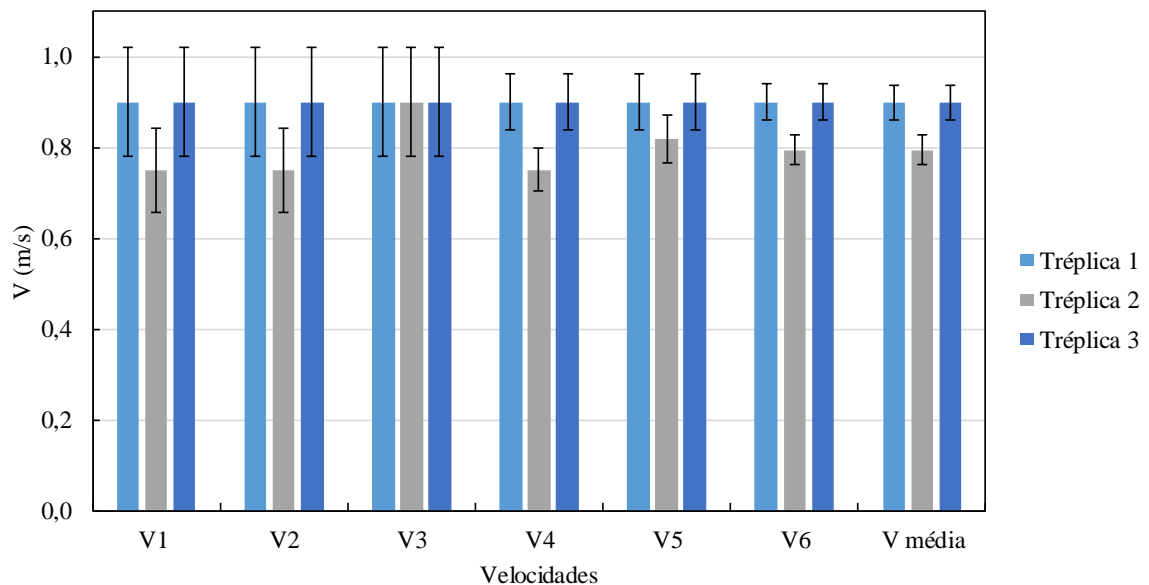
As incertezas associadas a cada velocidade, de acordo as equações (1) e (2), são maiores para as velocidades mais altas e para os menores intervalos envolvidos. Para I1 e I2 da Tréplica 2, os valores de incerteza se apresentaram menores em relação aos mesmos intervalos nas outras duas tréplicas, o mesmo ocorreu para V6 e V média. Os valores que apresentaram as menores incertezas, indicando melhores resultados, foram as velocidades V6 e V média. No caso da Velocidade 6, está abrangido o maior intervalo possível de acordo com as condições

experimentais. A velocidade média leva em conta todas as outras medidas obtidas, minimizando assim as incertezas envolvidas. Os valores de V6 são os que mais se aproximam das V médias para todas as tréplicas, observando que nas Tréplicas 1 e 3, apresentaram valores coincidentes para V6 e V média.

Assim como nas incertezas absolutas, as incertezas relativas também apresentam menores valores para os maiores intervalos. Para as velocidades que envolvem intervalos primários (V1 a V3), as incertezas calculadas apresentaram valores de 13% para as Tréplicas 1 e 3 e variaram de 9 a 12 % para a Tréplica 2. Para as velocidades que envolvem as médias de todos os trechos (V média) e as que abrangem o intervalo terciário (V6), as incertezas relativas foram de 3% para a Tréplica 2 e 4 % para as Tréplicas 1 e 3. Considera-se satisfatório neste trabalho, os resultados com incertezas menores ou iguais do que 5%,

A Figura 7 apresenta uma visualização comparativa entre todas as velocidades com suas respectivas barras de incertezas para as três tréplicas.

Figura 7 - Representação visual das velocidades óticas para água colorida para Q1



Fonte: Do autor (2023).

Foi considerada V6 a velocidade representativa da velocidade real do escoamento. Isso se deu devido ao fato de apresentar o maior intervalo possível de medição (Intervalo Terciário) além de se mostrar muito próxima (Tréplica 2) ou igual (Tréplicas 1 e 3) a V média. Na Tréplica 2 os valores de V6 e V média diferiram 0,05%. Assim, o valor considerado como o mais

próximo do real foi a média de V6 para as três réplicas, com sua incerteza obtida por meio da Equação XX, que resultou no valor de **0,86 ± 0,02 m/s**.

4.2 RESULTADOS TÉRMICOS PARA Q1

4.2.1 Resultados para a frente da mancha térmica

Na Tabela 5, podemos observar os valores de velocidade e suas incertezas para os dados térmicos para a frente da mancha de água aquecida para a vazão 1.

Tabela 5 - Dados térmicos para a frente da mancha para Q1

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	13	0,75	0,09	12	0,75	0,09	13
V2	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12
V3	0,75	0,09	13	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13
V4	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,75	0,05	6
V5	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6
V6	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4
V média	0,81	0,03	4	0,81	0,03	4	0,79	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

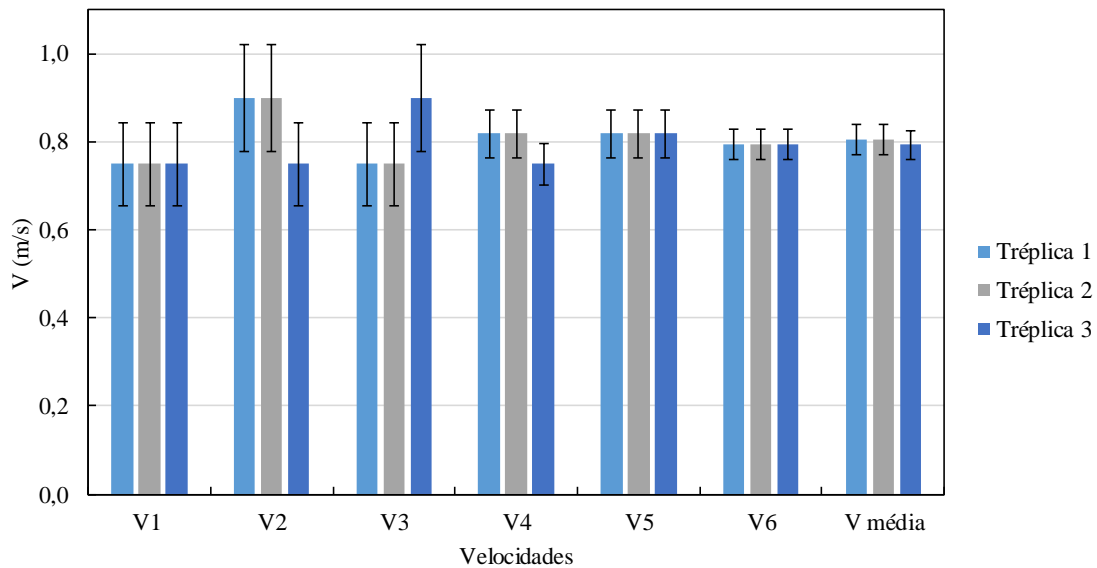
Para os dados referentes à frente da mancha térmica, foi observado nas Tréplicas 1 e 2 que os valores dos Intervalos Primários I1 e I3 apresentaram um frame a mais em relação a I2. Na Tréplica 3 isso ocorreu para os intervalos I1 e I2 com relação a I3. Ao se analisar os Intervalos Terciários (I6), notou-se uma correspondência nos valores de V6 para as três réplicas.

As maiores incertezas estão associadas aos Intervalos Primários, estas foram iguais com valor de 13% para a Tréplica 1 e variando entre 12 e 13% para as demais Tréplicas. As incertezas para V6 e V média foram consideradas satisfatórias, apresentando valores de 4% para as três réplicas.

Ao compararmos os valores de V6 e V média, estes se apresentam equivalentes na Tréplica 3 e diferiram 1,3% nas Tréplicas 1 e 2.

Todas as velocidades e suas barras de incertezas então apresentadas na Figura 8.

Figura 8- Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de água aquecida para Q1



Fonte: Do autor (2023).

O valor médio para V6 para as três tréplicas, considerado como o mais representativo do real foi de **$0,79 \pm 0,02$ m/s**.

4.2.2 Resultados para o centroide da mancha térmica

A Tabela 6 a seguir mostra os valores de velocidade e suas incertezas para aos dados térmicos para o centroide da mancha de água aquecida para a vazão 1

Tabela 6 - Dados térmicos para o centroide da mancha para Q1

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (\pm)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (\pm)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (\pm)	Inc. (%)
V1	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V2	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	1,13	0,17	15
V3	1,13	0,17	15	0,90	0,12	13	1,13	0,17	15
V4	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7	1,00	0,07	7
V5	1,00	0,07	7	0,90	0,06	7	1,13	0,08	8
V6	0,96	0,04	5	0,90	0,04	4	1,04	0,05	5
V média	0,96	0,04	5	0,90	0,04	4	1,05	0,05	5

Fonte: Do autor (2023).

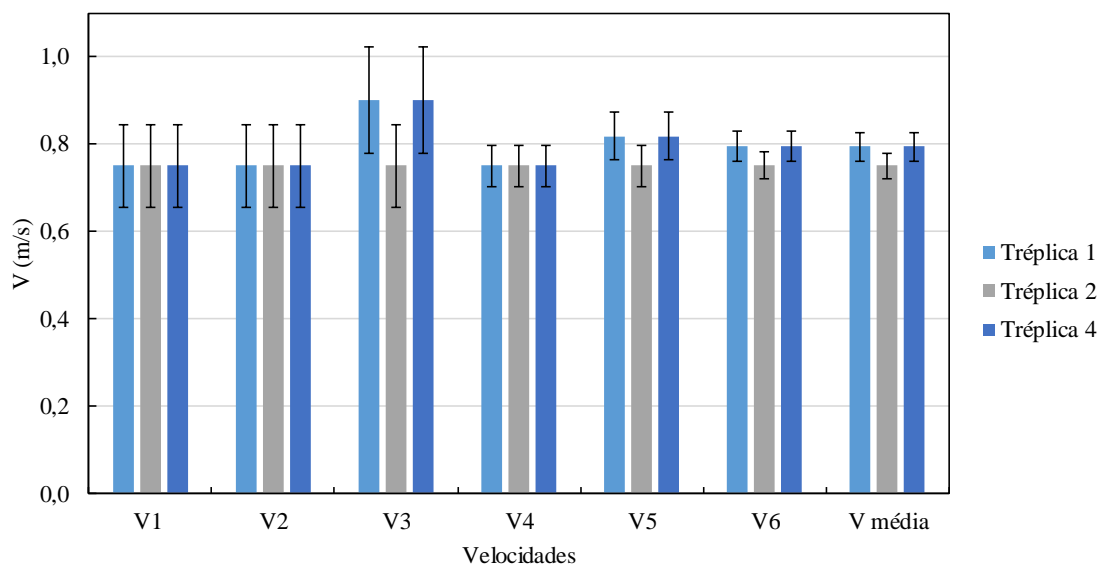
Para os dados relacionados ao centroide da mancha térmica de água aquecida, foi notado a ocorrência da mesma quantidade de frames para os Intervalos Primários (I1 a I3) da Tréplica 2, o que acarretou dados coincidentes para todas as velocidades calculadas (V1 a V6 e V média).

As Tréplicas 1 e 3 se mostraram correspondentes, ambas diferindo da Tréplica dois, sendo que os Intervalos Primários I1 e I2 apresentaram um frame a mais em relação a I3. Ao se analisar as velocidades associadas aos Intervalos Terciários (I6), referentes à maior área de medição possível, notou-se que os valores de V6 coincidem com as velocidades médias (V média) para as três tréplicas, sendo que nas Tréplicas 1 e 3 esses valores são de 0,79 m/s e para a Tréplica 2, 0,75 m/s.

As maiores incertezas novamente estão associadas aos maiores valores de velocidade e menor comprimento dos intervalos (Primários). Estas apresentaram valores de 12% para a Tréplica 2 e variaram entre 12 e 13 % para as Tréplicas 1 e 3. As incertezas para as velocidades 6 e velocidades médias apresentaram valor de 4%, consideradas satisfatórias segundo os padrões estabelecidos neste trabalho.

Na Figura 9 podemos visualizar os valores de velocidade obtidos assim como suas respectivas barras de incerteza.

Figura 9 - Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de água aquecida para Q1



Fonte: Do autor (2023).

Para esta análise, o valor de V6 média para as três réplicas e sua incerteza foi de **0,78 ± 0,02 m/s**, muito próximo ao encontrado no item 4.2.1 ($0,79 \pm 0,02$ m/s), referente à análise da frente da mancha térmica), porém inferior ao observado na análise ótica no item 4.1.

4.3 RESULTADOS ÓTICOS PARA A Q2

A Tabela 7 apresenta resultados obtidos de velocidade e suas incertezas para aos dados óticos da mancha de água aquecida para a vazão 2.

Tabela 7 - Dados óticos para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V2	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	1,13	0,17	15
V3	1,13	0,17	15	0,90	0,12	13	1,13	0,17	15
V4	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7	1,00	0,07	7
V5	1,00	0,07	7	0,90	0,06	7	1,13	0,08	8
V6	0,96	0,04	5	0,90	0,04	4	1,04	0,05	5
V média	0,96	0,04	5	0,90	0,04	4	1,05	0,05	5

Fonte: Do autor (2023).

Para os dados obtidos a partir da mancha ótica de água colorida na vazão 2, as três réplicas diferiram entre si em algum aspecto. Na Tréplica 2 ocorreu o fato de todos os Intervalos Primários (I1 a I3) apresentarem o mesmo número de frames, resultando em todas as velocidades (V1 a V6 e V média) correspondentes entre si.

Para a Tréplica 1, o intervalo I3 apresentou um frame a menos em relação aos intervalos I1 e I2, resultando um valor de velocidade maior para V3 quando comparado a V1 e V2.

Observou-se para a Tréplica 3 que o intervalo I1 apresentou um frame a mais em relação a I2 e I3, com V1 sendo inferior a V2 e V3.

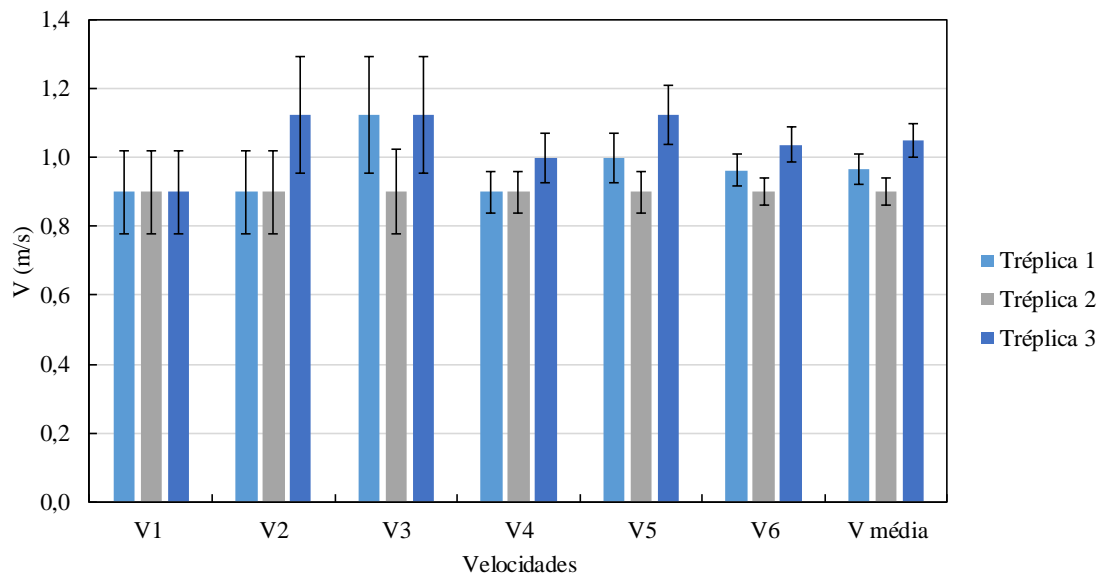
Os valores de V6 mostraram diferentes entre si para as três réplicas, porém coincidentes com suas respectivas velocidades médias para as Tréplicas 1 e 2, na Tréplica 3 os valores de V6 e V média apresentaram uma diferença de 1,3%.

Para as Tréplicas 1 e 3, os maiores valores de incerteza, referentes aos Intervalos Primários (I1 a I3) variaram entre 13 e 15%, conforme variou a medida de velocidade. Para a Tréplica 2, estes valores se mantiveram constantes em 13%. As incertezas de V6 e V média

apresentaram valor de 5% para as Tréplicas 1 e 3, e 4% para a Tréplica 2, todas consideradas satisfatórias.

Na Figura 10, é possível observar os valores de velocidade encontrados, juntamente com as barras de incerteza correspondentes.

Figura 10 - Representação visual das velocidades óticas para água colorida para Q2



Fonte: Do autor (2023).

Neste caso, a média das V6, considerado o valor obtido nesta análise mais representativo da velocidade real do escoamento, juntamente com sua incerteza, foi de **$0,97 \pm 0,03$ m/s**, cerca de 10% maior se comparado a esse valor obtido óticamente no item 4.1 para a vazão 1 ($0,86 \pm 0,02$ m/s).

4.4 RESULTADOS TÉRMICOS PARA Q2

4.4.1 Resultados para a frente da mancha térmica

Na Tabela 8, podemos observar os resultados de velocidade e suas incertezas para os dados térmicos para a frente da mancha de água aquecida para a vazão 2.

Tabela 8 - Dados térmicos para a frente da mancha para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V2	0,75	0,09	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V3	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	1,13	0,17	15
V4	0,82	0,05	6	0,90	0,06	6	0,90	0,06	7
V5	0,82	0,05	6	0,90	0,06	6	1,00	0,07	7
V6	0,84	0,04	4	0,90	0,04	4	0,96	0,04	5
V média	0,84	0,04	4	0,90	0,04	4	0,96	0,04	5

Fonte: Do autor (2023).

Para os valores obtidos a partir da análise dos dados da frente da mancha térmica, para a Tréplica 2, a quantidade de frames por Intervalo Primário (I1 a I3) foi constante, sendo assim, os valores de V1 a V6 e V média coincidiram entre si.

Nenhuma Tréplica se mostrou igual a alguma outra. Para a Tréplica 1, o valor de V2 se apresentou inferior às outras velocidades (V1 e V3) obtidas para os Intervalos Primários (I1 e I3), isso se deu em virtude do intervalo I2 ter apresentado um frame a mais em relação a I1 e I3.

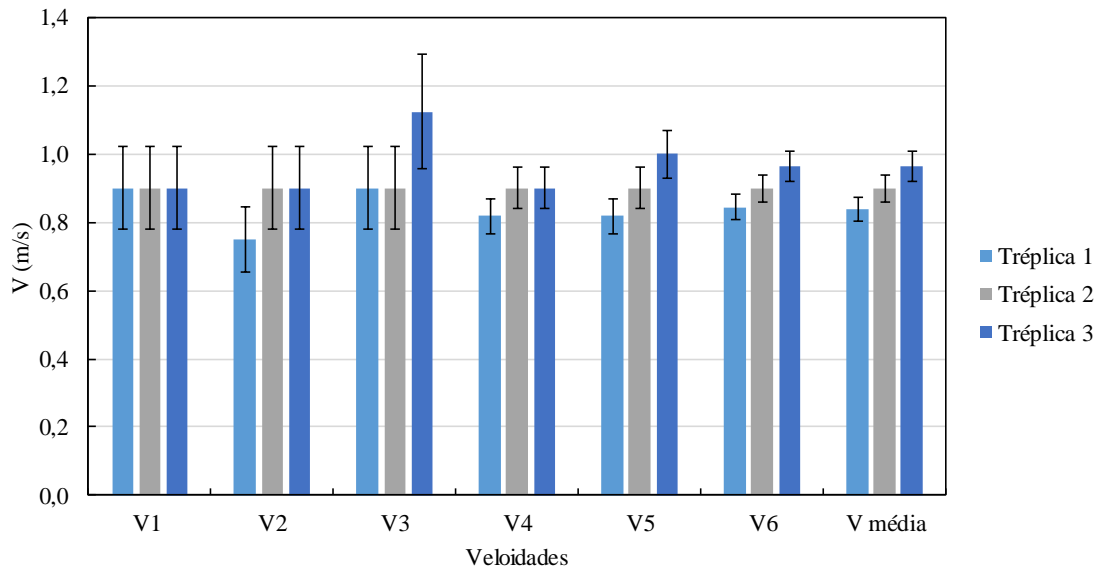
Para a Tréplica 3, notou-se que a velocidade V3 apresentou maior valor em comparação a V1 e V2 (todos Intervalos Primários), fato este ocorrido em decorrência do intervalo I3 ter apresentado um frame a menos em relação a I1 e I2.

Os valores de V6 para as três tréplicas se mostraram diferentes entre si e coincidentes com as velocidades médias associadas a cada valor de V6.

As incertezas para os Intervalos Primários apresentaram valor constante de 13% para as Tréplicas 1 e 2 e variaram entre 13 e 15% para a Tréplica 3. As velocidades V6 e V média, para as Tréplicas 1 e 2 resultaram em 4%, para a Tréplica 3 esse valor foi de 5%, todas avaliadas como satisfatórias.

Na Figura 11, é visível a representação dos valores de velocidade, juntamente com as barras de incerteza correspondentes.

Figura 11 - Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de água aquecida para Q2



Fonte: Do autor (2023).

Neste contexto, a média das velocidades V6, indicando o valor mais representativo da velocidade real do escoamento nesta análise, foi calculada como $0,90 \pm 0,02$ m/s, considerando também a incerteza associada.

4.4.2 Resultados para o centroide da mancha térmica

A Tabela 9 a seguir mostra os valores de velocidade e suas incertezas para aos dados térmicos para o centroide da mancha de água aquecida para a vazão 2

Tabela 9 - Dados térmicos para o centroide da mancha para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (\pm)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (\pm)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (\pm)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V2	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13
V3	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V4	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,90	0,06	7
V5	0,90	0,06	7	0,82	0,05	6	0,90	0,06	7
V6	0,84	0,04	4	0,84	0,04	4	0,90	0,04	4
V média	0,85	0,04	4	0,84	0,04	4	0,90	0,04	4

Fonte: Do autor (2023).

Para os resultados referentes ao centroide da mancha térmica, para a Tréplica 3, o número de frames por Intervalo Primário (I1 a I3) permaneceu constante. Consequentemente, os valores de V1 a V6 e a velocidade média (V média) para esta tréplica coincidiram entre si.

Novamente não houveram tréplicas coincidentes entre si, para a Tréplica 1, o Intervalo Primário I1 relacionado à velocidade (V1) apresentou um frame a mais, sendo assim, V1 apresentou menor valor em relação a V2 e V3, também oriundas de Intervalos Primários (I2 e I3).

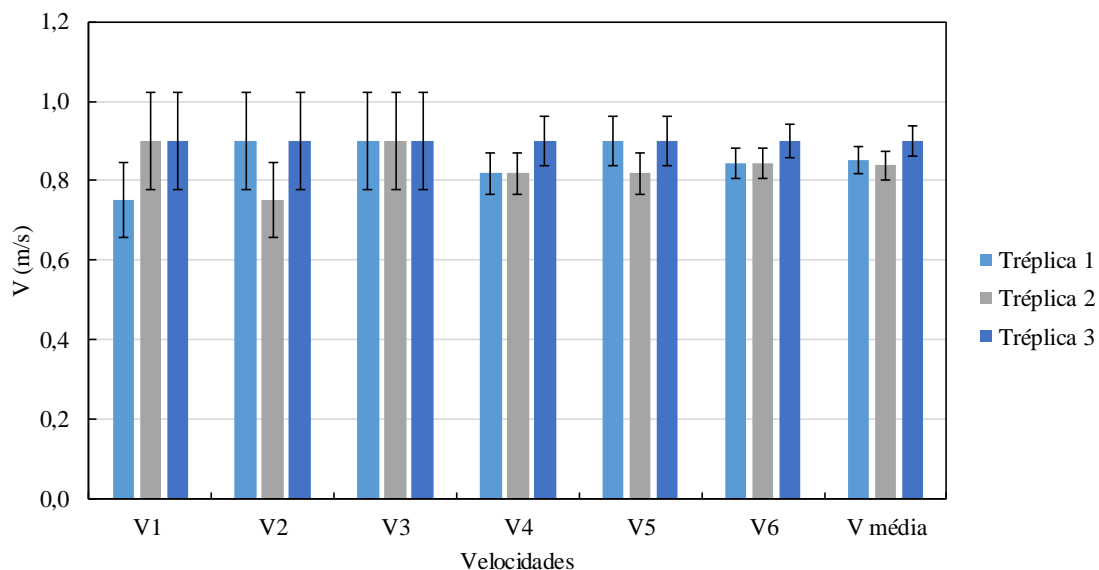
Para a Tréplica 2, o valor de V2, associado a I2 (primário) apresentou um frame a mais em relação as velocidades V1 e V3 relacionadas a I1 e I3 (primários).

A velocidade V6 nas Tréplicas 1 e 2 apresentou valores coincidentes, o que não ocorreu na Tréplica 3, na qual o valor de V6 se mostrou maior em relação às tréplicas anteriores. As velocidades V6 se mostraram equivalentes às velocidades médias nas Tréplicas 2 e 3. Para a Tréplica 1 esses valores diferiram em 1%.

As incertezas relacionadas às velocidades obtidas dos Intervalos Primários (I1 a I3) para as Tréplicas 1 e 3 ficaram fixas no valor de 13%, para a Tréplica 2 variaram entre 12 e 13%. Todas as incertezas relacionadas às velocidades V6 e V média apresentaram o valor satisfatório de 4%.

Na Figura 12, é possível observar a representação dos dados de velocidade para as três tréplicas, acompanhadas das respectivas barras de incerteza.

Figura 12 - Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de água aquecida para Q2



Nesta situação, a média das velocidades V6, representando o valor mais representativo da velocidade real do escoamento, foi determinada como $0,86 \pm 0,02$ m/s, levando em conta a respectiva incerteza. Valor cerca de 3% inferior ao obtido no item 4.4.1 ($0,90 \pm 0,02$ m/s).

4.5 RESULTADOS PARA OS SEDIMENTOS PARA Q1

4.5.1 Resultados para a frente da mancha térmica de sedimento fino

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos de velocidade e suas incertezas para aos dados térmicos da mancha de sedimento fino aquecido para a vazão 1.

Tabela 10 - Dados da frente da mancha de sedimento fino para Q1

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V2	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V3	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V4	0,75	0,05	6	0,69	0,04	6	0,69	0,04	6
V5	0,75	0,05	6	0,75	0,05	6	0,75	0,05	6
V6	0,75	0,03	4	0,71	0,03	4	0,71	0,03	4
V média	0,75	0,03	4	0,72	0,03	4	0,72	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados da velocidade de carregamento do sedimento fino se apresentaram uniformes para a Tréplica 1 em todas as velocidades calculadas, ou seja, o número de frames por Intervalo Primário (I1 a I3) foi o mesmo para todos esses intervalos.

As Tréplicas 2 e 3 se mostraram semelhantes, em ambas o Intervalo Primário I1 apresentou um frame a mais em relação aos Intervalos Primários subsequentes (I2 e I3), com isso as velocidades V1 se mostraram inferiores em relação a V2 e V3.

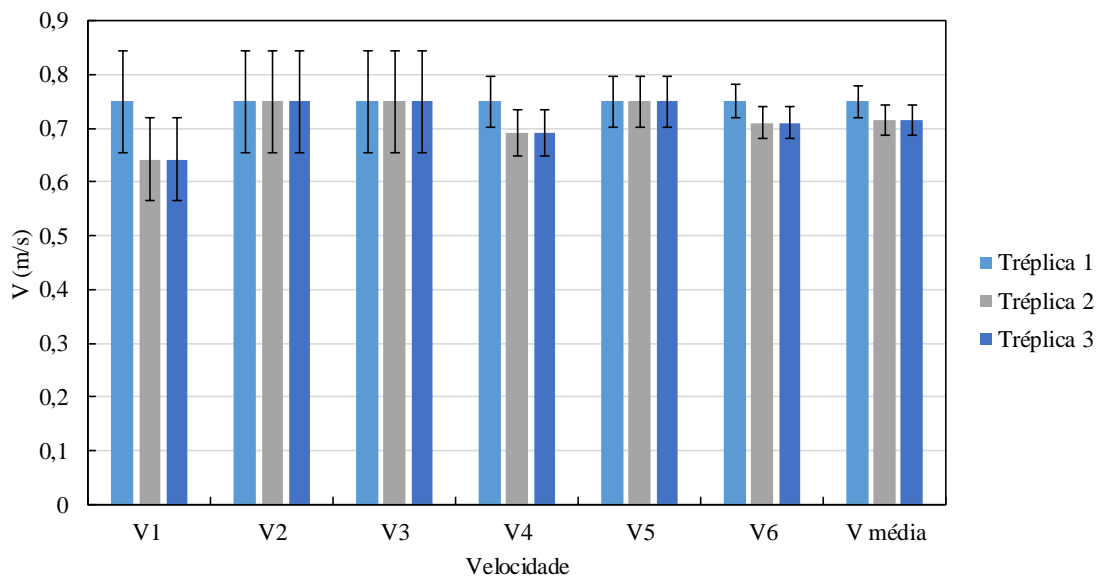
As velocidades V6 nas Tréplicas 2 e 3 apresentaram valores coincidentes, diferentemente da Tréplica 1, na qual o valor de V6 se mostrou maior em relação às tréplicas subsequentes e igual ao Valor de V média. Para as Tréplica 2 e 3 esses valores de V6 e V média diferiram em 0,75%.

Para as três tréplicas as incertezas associadas as velocidades calculadas a partir de Intervalos Primários (V1 a V3) apresentaram valores semelhantes, em torno de 12%. O mesmo

ocorreu para as incertezas das Velocidades V6 e V médias, com valor de 4%, avaliado como satisfatório.

Na Figura 13, é visível a representação dos valores de velocidade do carreamento dos sedimentos finos pela frente da mancha para as três Tréplicas, juntamente com as barras de incerteza correspondentes.

Figura 13 - Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q1



Fonte: Do autor (2023).

O valor médio para V6 para as três réplicas, avaliado como o mais representativo do real foi de $0,72 \pm 0,02$ m/s.

4.5.2 Resultados para o centroide da mancha térmica de sedimento fino

A Tabela 11 a seguir mostra os valores de velocidade e suas incertezas para aos dados térmicos para o centroide da mancha de sedimento aquecido para a vazão 1.

Tabela 11 - Dados do centroide da mancha de sedimento fino para Q1 (continua)

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12
V2	0,75	0,09	12	0,64	0,08	12	0,75	0,09	13
V3	0,75	0,09	12	0,75	0,09	13	0,64	0,08	12

Tabela 11 - Dados do centroide da mancha de sedimento fino para Q1 (conclusão)

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V4	0,69	0,04	6	0,64	0,04	6	0,69	0,04	6
V5	0,75	0,05	6	0,69	0,04	6	0,69	0,04	6
V6	0,71	0,03	4	0,67	0,03	4	0,68	0,03	4
V média	0,72	0,03	4	0,67	0,03	4	0,68	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Para este ensaio nenhuma das três tréplicas se mostrou coincidente com alguma outra. A Tréplica 1 apresentou a velocidade V1 inferior a V2 e V3 (todas oriundas de Intervalos Primários), isso se devido ao Intervalo I1 ter apresentado um frame a mais em relação a I2 e I3.

Para a Tréplica 2, os Intervalos Primários I1 e I2 apresentaram um frame a mais na análise em relação a I3, o que acarretou as velocidades V1 e V2 inferiores a V3.

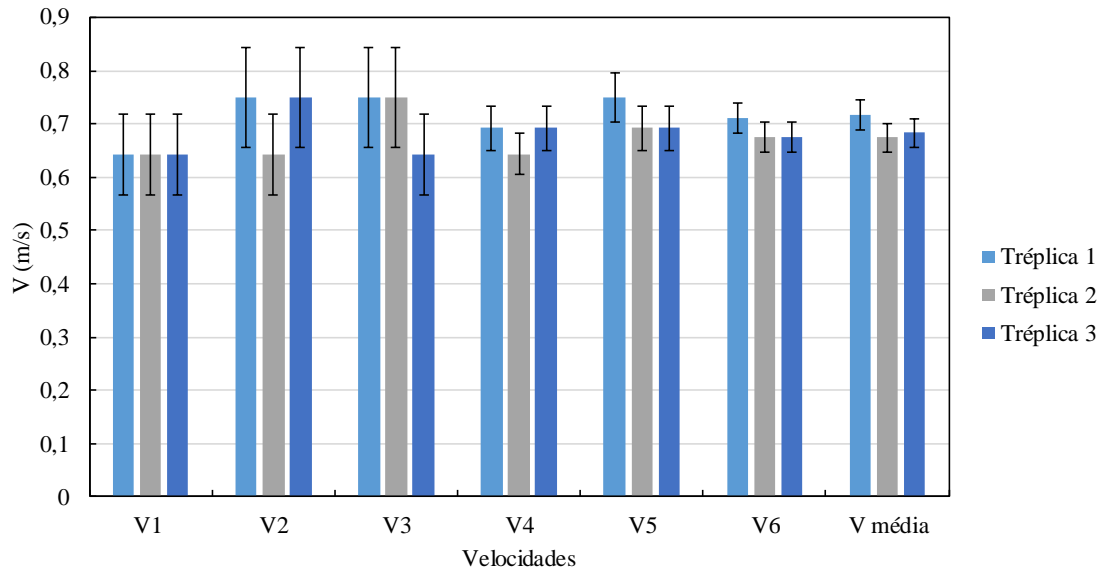
Os Intervalos Primários I1 e I3 da Tréplica 3 apresentaram um frame a mais em relação a I2. Neste caso, V1 e V3 se mostraram inferiores a V2

Os valores da velocidade V6 para as Tréplicas 2 e 3 se mostraram coincidentes com suas respectivas V médias e ligeiramente diferentes entre si. Para a Tréplica 1 os valores de V6, assim como para as velocidades médias.

As incertezas associadas as velocidades V1 a V3 (Intervalos Primários) para as Tréplicas 2 e 3 variaram entre 12 e 13 %. Para a Tréplica 3 esses valores se mostraram constantes em torno de 12%. Todos os valores de incerteza para as Velocidades V6 e V médias foram considerados satisfatórios com valor de 3%

A Figura 14 apresenta a representação gráfica das velocidades encontradas para o centroide da mancha térmica de sedimento fino.

Figura 14 - Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q1



Fonte: Do autor (2023).

O valor médio para V6 para as três réplicas, avaliado como o mais representativo do real valor da velocidade do carreamento dos sedimentos foi de $0,69 \pm 0,02$ m/s, valor cerca de 4% inferior ao observado para a frente da mancha no item 4.5.1 ($0,72 \pm 0,02$ m/s).

4.5.3 Resultados para a frente da mancha térmica de sedimento grosso

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos de velocidade juntamente com suas incertezas para os dados térmicos da mancha de sedimento grosso aquecido para a vazão 1.

Tabela 12 - Dados da frente da mancha de sedimento grosso para Q1

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	12	0,64	0,08	12	0,75	0,09	12
V2	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V3	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V4	0,75	0,05	6	0,69	0,04	6	0,75	0,05	6
V5	0,75	0,05	6	0,75	0,05	6	0,75	0,05	6
V6	0,75	0,03	4	0,71	0,03	4	0,75	0,03	4
V média	0,75	0,03	4	0,72	0,03	4	0,75	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Observou-se nas Tréplicas 1 e 3 uma uniformidade na quantidade de frames por Intervalo Primário (I1 a I3), acarretando todas as velocidades (V1 a V6 e V média) coincidentes para essas duas tréplicas.

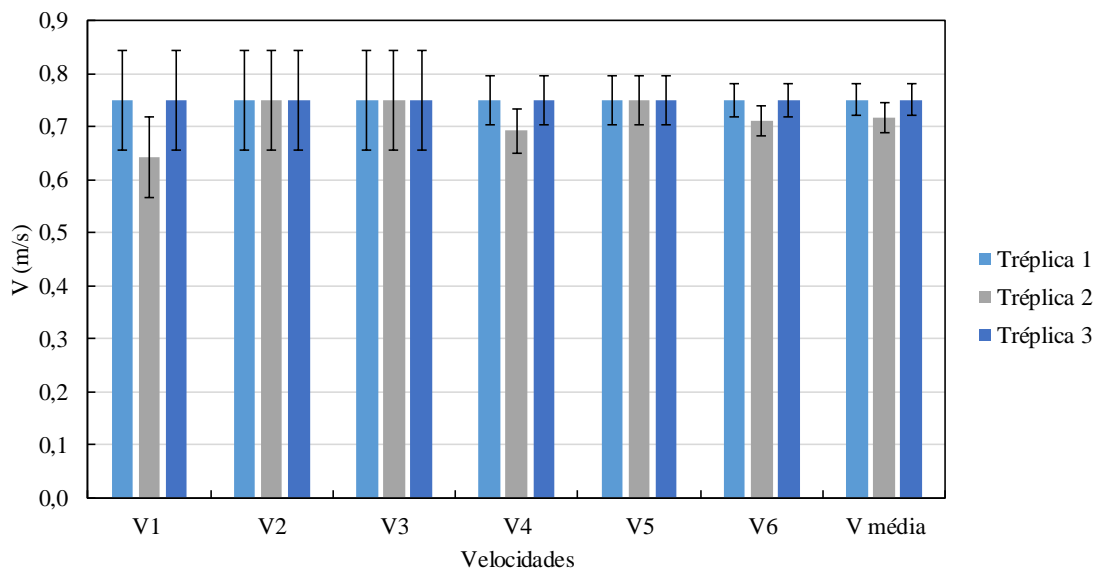
Para a Tréplica 2, o Intervalo Primário I1 apresentou um frame a mais em relação a I2 e I3, sendo V1 inferior a V2 e V3.

Os valores das velocidades V6 se mostraram coincidentes entre si e com suas respectivas V médias para as Tréplicas 1 e 3. Na Tréplica 2 o valor de V6 foi inferior as demais Tréplicas e diferiu de sua V média em 0,75%.

Neste ensaio todas as incertezas associadas a Intervalo Primários se mostraram semelhantes, em torno de 12% para as três tréplicas. As incertezas referentes às velocidades V6 e V médias, para todas as tréplicas, apresentaram o valor satisfatório de 4%.

A Figura 15 apresenta a representação gráfica das velocidades encontradas para a frente da mancha térmica de sedimento grosso.

Figura 15 - Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q1



Fonte: Do autor (2023).

Neste ensaio, a média das velocidades V6, indicando o valor mais representativo da velocidade real do escoamento, foi determinada como $0,73 \pm 0,02$ m/s, levando em conta a respectiva incerteza.

4.5.4 Resultados para o centroide da mancha térmica de sedimento grosso

A Tabela 13 a seguir mostra os valores de velocidade e suas incertezas para os dados térmicos para o centroide da mancha de sedimento aquecido para a vazão 1.

Tabela 13 - Dados do centroide da mancha de sedimento grosso para Q1

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12
V2	0,64	0,08	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	13
V3	0,75	0,09	13	0,75	0,09	12	0,64	0,08	12
V4	0,64	0,04	6	0,69	0,04	6	0,69	0,04	6
V5	0,69	0,04	6	0,75	0,05	6	0,69	0,04	6
V6	0,68	0,03	4	0,71	0,03	4	0,67	0,03	4
V média	0,67	0,03	4	0,72	0,03	4	0,68	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Neste ensaio as três tréplicas se apresentaram diferentes entre si. Na Tréplica 1, os Intervalos Primários I1 e I2 apresentaram um frame a mais em relação a I3, conseqüentemente as velocidades V1 e V2 se mostraram inferiores.

Para a Tréplica 2, a velocidade V1 se mostrou valor inferior a V2 e V3, isso ocorreu devido ao Intervalo Primário I1 ter apresentado um frame a mais na análise do que os intervalos I2 e I3.

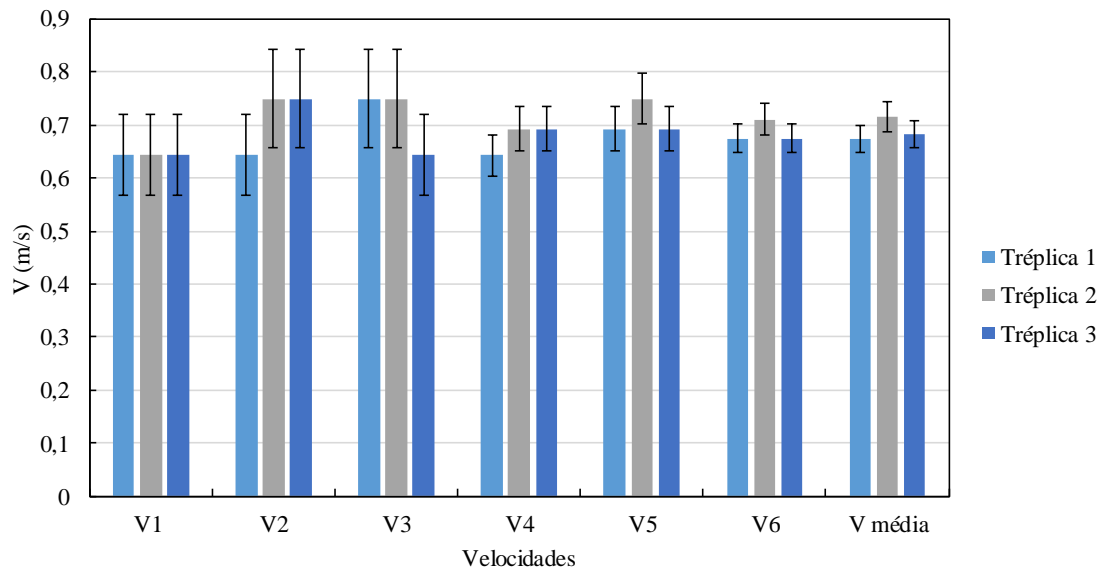
Na Tréplica 3, o Intervalo Primário I2 apresentou um frame a menos comparado a I1 e I3, com as velocidades V1 e V3 inferiores a V2.

As velocidades V6 apresentaram três valores diferentes nas três tréplicas, sendo que nenhum desses valores coincidiu exatamente com sua respectiva V média. Para as Tréplicas 1 e 3, V6 diferiu de V médio em torno de 1%. Para a Tréplica dois, essa diferença foi de 0,75%.

As incertezas associadas as velocidades na Tréplica 2 foram uniformes em torno de 12%. Para as Tréplica 1 e 3 esses valores variaram entre 12 e 13%. As incertezas de todas as velocidades V6 e V médias apresentaram valores semelhantes de 4%, avaliados como satisfatórios.

A Figura 16 apresenta a representação gráfica das velocidades encontradas para o centroide da mancha térmica de sedimento grosso.

Figura 16 - Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q1



Fonte: Do autor (2023).

Para esta análise, o valor adotado como representativo da velocidade real de V6 média para as três réplicas e sua incerteza foi de **0,69 ± 0,02 m/s**, muito semelhante ao encontrado no item 4.5.2.

4.6 RESULTADOS PARA OS SEDIMENTOS PARA Q2

4.6.1 Resultados para a frente da mancha térmica de sedimento fino

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos de velocidade e suas incertezas para os dados térmicos da mancha de sedimento fino aquecido para a vazão 2.

Tabela 14 - Dados da frente da mancha de sedimento fino para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V2	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V3	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V4	0,82	0,05	6	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7
V5	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7
V6	0,84	0,04	4	0,90	0,04	4	0,90	0,04	4
V média	0,85	0,04	4	0,90	0,04	4	0,90	0,04	4

Fonte: Do autor (2023).

Neste ensaio, as Tréplicas 2 e 3 mostraram valores correspondentes entre si, sendo que todos os Intervalos Primários dessas tréplicas (I1 a I3) apresentaram o mesmo número de frames, resultando em velocidades V1 a V6 semelhantes.

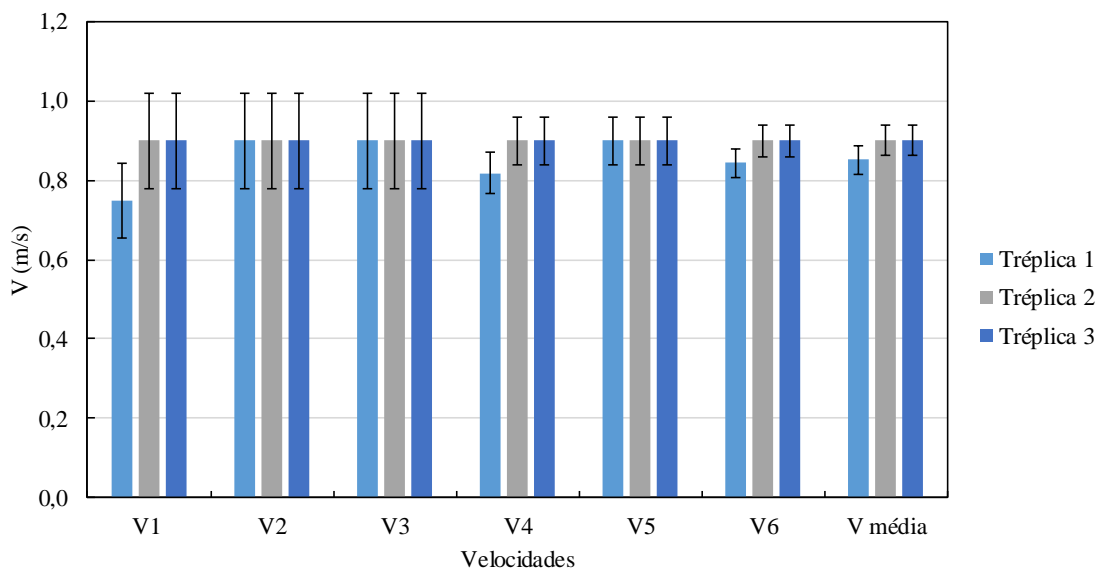
Para a Tréplica 1, A velocidade V1 se mostrou inferior às velocidades oriundas de Intervalos Primários subsequentes (V2 e V3), isso se deu pelo fato do Intervalo I1 ter apresentado um frame a mais em relação a I2 e I3.

As velocidades V6 nas Tréplicas 2 e 3 foram semelhantes entre si e com suas respectivas V médias. No caso da Tréplica 1, o valor de V6 se mostrou inferior às velocidades V6 das Tréplicas 2 e 3 e diferiu de sua respectiva velocidade média em 1%.

As incertezas associadas às velocidades de Intervalos Primários na Tréplica 1 variaram entre 12 e 13%. Para as Tréplicas 2 e 3 esses valores de incerteza se mantiveram constantes em torno de 4%, considerados satisfatórios.

Na Figura 17, estão representados os valores de velocidade do carreamento dos sedimentos finos pela frente da mancha para as três Tréplicas, juntamente com as barras de incerteza correspondentes.

Figura 17 - Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q2



Fonte: Do autor (2023).

O valor médio para as velocidades V6 para as três tréplicas, avaliado como o mais representativo do real, juntamente com sua incerteza foi de **0,88 ± 0,03 m/s**.

4.6.2 Resultados para o centroide da mancha térmica de sedimento fino

A Tabela 15 a seguir mostra os valores de velocidade e suas incertezas para os dados térmicos para o centroide da mancha de sedimento aquecido para a vazão 2.

Tabela 15 - Dados do centroide da mancha de sedimento fino para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12
V2	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13
V3	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V4	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6
V5	0,75	0,05	6	0,75	0,05	6	0,82	0,05	6
V6	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4
V média	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,81	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Para este caso, as Tréplicas 1 e 2 apresentaram resultados semelhantes entre si, com os Intervalos Primários I1 apresentando um frame a menos em relação a I2 e I3, acarretando velocidade V1 superiores às velocidades V2 e V3 em ambas as tréplicas.

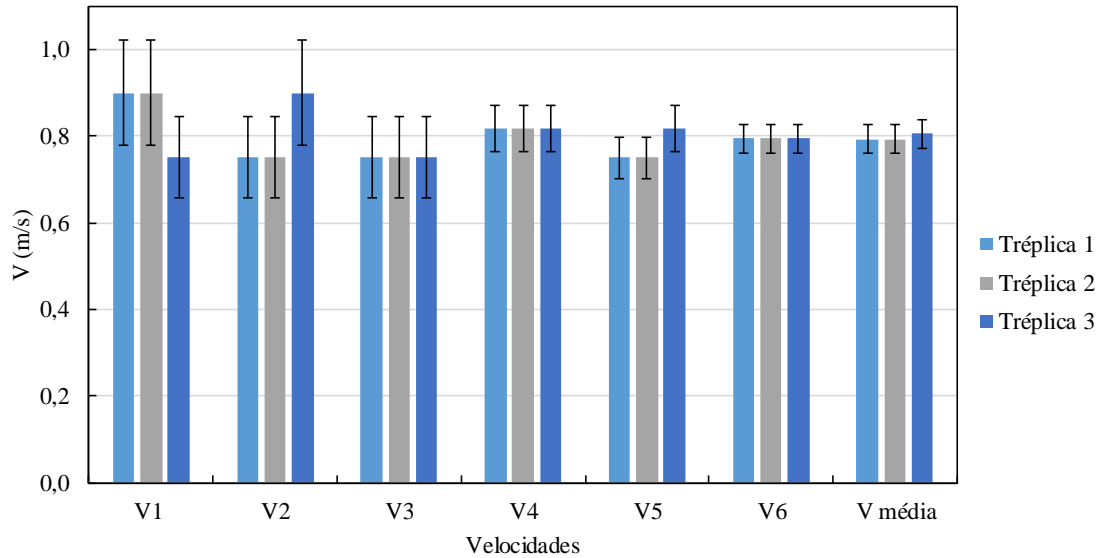
Na Tréplica 3, o valor de V2 se mostrou superior aos valores de V1 e V2 devido ao Intervalo Primário I2 ter apresentado um frame a menos em relação aos intervalos I1 e I3.

As velocidades V6 se mostraram coincidentes nas três tréplicas, porém somente nas Tréplicas 1 e 2 esses valores de V6 se apresentaram semelhantes às suas respectivas velocidades médias. No caso da Tréplica 2, o valor de V6 diferiu em 1,4% de sua respectiva V média.

Para as três tréplicas, os valores de incerteza associados aos Intervalos Primários (I1 a I3) variaram entre 12 e 13%. Também para as três tréplicas, os valores de incerteza das velocidades V6 e V média apresentaram valores em torno de 4 %, avaliados como satisfatório.

A Figura 18 apresenta a representação gráfica das velocidades encontradas para o centroide da mancha térmica de sedimento fino.

Figura 18 - Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos finos aquecidos para Q2



Fonte: Do autor (2023).

O valor médio para as velocidades V6, avaliado como o mais representativo do real valor da velocidade do carreamento dos sedimentos foi de $0,79 \pm 0,02$ m/s.

4.6.3 Resultados para a frente da mancha térmica de sedimento grosso

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos de velocidade juntamente com suas incertezas para os dados térmicos da mancha de sedimento grosso aquecido para a vazão 2.

Tabela 16 - Dados da frente da mancha de sedimento grosso para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,64	0,08	12
V2	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V3	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13
V4	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,75	0,05	6
V5	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7	0,90	0,06	7
V6	0,84	0,04	4	0,84	0,04	4	0,79	0,03	4
V média	0,85	0,04	4	0,85	0,04	4	0,81	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Para este ensaio, foi observado nas três tréplicas valores de V1 inferiores aos valores de V2 e V3, possivelmente porque os sedimentos ainda estavam acelerando a velocidade ao passarem pelo intervalo Primário I1.

As Tréplicas 1 e 2 se mostraram coincidentes entre si, com os valores de V1 inferiores a V2 e V3, isto se deu por conta dos Intervalos Primários I1 nessas duas tréplicas terem apresentado um frame a mais em relação a I2 e I3.

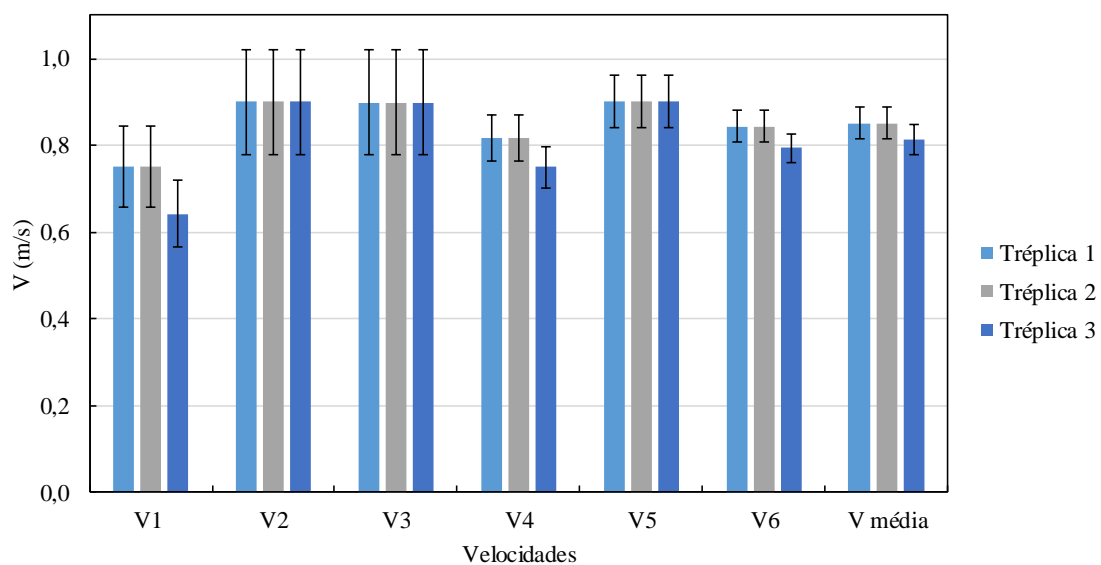
Para a Tréplica 3, o Intervalo Primário I1 apresentou dois frames a menos em relação aos intervalos subsequentes I2 e I3, ocasionando uma velocidade V1 em torno de 28% menor em relação a V2 e V3.

Para as Tréplicas 1 e 2, os Valores da velocidade V6 apresentaram correspondência entre si e ambos diferiram em 1% de suas respectivas velocidades médias. Para a Tréplica 3, o valor de V6 se mostrou inferior em relação aos valores de V6 das Tréplicas 1 e 2 e diferiu de sua respectiva V média em 2,5%.

As incertezas associadas às velocidades obtidas dos Intervalos Primários (I1 a I3) se mantiveram entre 12 e 13 % para as três tréplicas. Os valores de incerteza associados às velocidades V6 e V médias foram considerados satisfatórios e se apresentaram constantes em torno de 4%.

A Figura 19 apresenta a representação gráfica das velocidades encontradas para a frente da mancha térmica de sedimento grosso.

Figura 19 - Representação visual das velocidades térmicas para a frente da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q2



Para este ensaio, a média das velocidades V6, indicando o valor mais representativo da velocidade real do escoamento, foi determinada como $0,83 \pm 0,02$ m/s, levando em conta a respectiva incerteza.

4.6.4 Resultados para o centroide da mancha térmica de sedimento grosso

A Tabela 17 a seguir mostra os valores de velocidade e suas incertezas para os dados térmicos para o centroide da mancha de sedimento aquecido para a vazão 2.

Tabela 17 - Dados do centroide da mancha de sedimento grosso para Q2

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V2	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13	0,75	0,09	13
V3	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V4	0,75	0,05	6	0,82	0,05	6	0,75	0,05	6
V5	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,75	0,05	6
V6	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,75	0,03	4
V média	0,79	0,03	4	0,81	0,03	4	0,75	0,03	4

Fonte: Do autor (2023).

Para este ensaio, a Tréplica 3 apresentou o número de frames por Intervalo Primário (I1 a I3) constante para todas os intervalos, o que gerou resultados uniformes para todas as velocidades analisadas (V1 a V6).

Para a Tréplica 1, o Intervalo Primário I3 apresentou um frame a menos em relação aos Intervalos Primários anteriores (I1 e I2), consequentemente a velocidade V3 se mostrou superior em relação a V1 e V2.

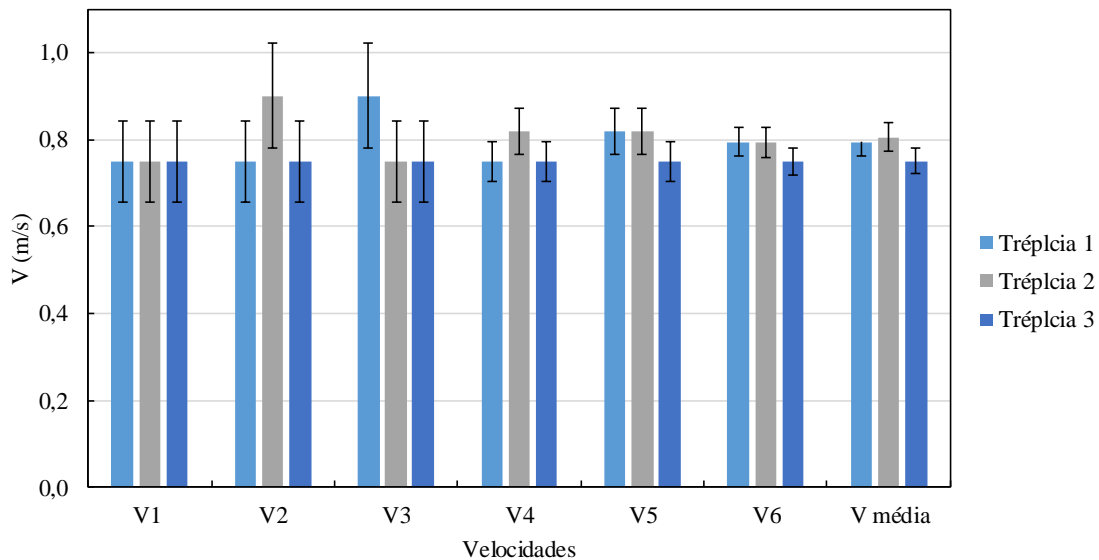
Na Tréplica 2, observou-se o valor de V2 superior a V1 e V3, isso ocorreu devido ao Intervalo Primário I2 ter apresentado um frame a menos na análise em relação a I1 e I3.

Todos os resultados para os valores da velocidade V6 para as três tréplicas diferiram entre si. Nas Tréplicas 1 e 3 esses valores coincidiram com suas respectivas velocidades médias. Para a Tréplica 2, V6 apresentou valor 2,5% inferior à sua respectiva V média.

Para os Intervalos Primários das três Tréplicas, as incertezas associadas a cada velocidade apresentaram valores de 12 e 13%. As incertezas dos valores de V6 e V média apresentaram valor de 4% para todas as tréplicas, o que foi avaliado como satisfatório.

A Figura 20 apresenta a representação gráfica das velocidades encontradas para o centroide da mancha térmica de sedimento grosso.

Figura 20 - Representação visual das velocidades térmicas para o centroide da mancha de sedimentos grossos aquecidos para Q2



Fonte: Do autor (2023).

Neste ensaio, a média das velocidades V6, indicando o valor mais representativo da velocidade real do escoamento, foi determinada como **$0,78 \pm 0,02$ m/s**, levando em conta a respectiva incerteza.

4.7 RESULTADOS PARA A CONDUTIVIDADE

A Tabela 18 apresenta os resultados da velocidade do escoamento obtida pela condutividade (VaCo). Cada velocidade foi calculada pela média das velocidades encontradas nas três réplicas para as duas vazões. As incertezas associadas foram propagadas por meio do método das derivadas parciais descrito na seção 3.4.

Tabela 18 - Velocidades por condutividade para Q1 e Q2

VaCoQ1 (m/s)	VaCoQ1 (m/s)
$0,69 \pm 0,02$	$0,81 \pm 0,02$

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados da velocidade do escoamento pela condutividade apresentaram valores inferiores em relação aos óticos e térmicos. Devido ao fato do comprimento da área utilizada nos testes ser diferente dos comprimentos utilizados para as análises óticas e térmicas, os resultados para condutividade não foram associados ou comparados a nenhum outro resultado na seção a seguir deste estudo.

4.8 COMPARAÇÕES DE RESULTADOS

A partir dos dados apresentados nas seções 4.1 a 4.6, foi possível realizar algumas comparações entre as velocidades obtidas, gerando representações gráficas. Foram inseridas nos gráficos dessa seção e das seções subsequentes uma reta de referência diagonal de 45° que marca a posição onde o ponto estaria caso as velocidades representadas nos eixos X e Y fossem iguais, simulando um cenário ideal com o intuito de observar o quanto os resultados reais diferiram do cenário ideal. Em um certo número de casos, algumas séries representadas nos gráficos apresentam valores a menos comparadas a outras, isso ocorre quando um ou mais pontos dessa série apresentaram o mesmo valor e encontram-se sobrepostos no gráfico.

Os resultados para as velocidades V6 obtidas em cada tréplica dos experimentos realizados, assim como suas respectivas V6 médias, foram isolados na Tabela 19 para uma melhor visualização.

Tabela 19 - Valores de V6 e V6 médias (continua)

	V6			V6 média
	Tréplica 1	Tréplica 2	Tréplica 3	
VoQ1	0,900	0,794	0,900	0,865
VtafQ1	0,794	0,794	0,794	0,794
VtacQ1	0,794	0,750	0,794	0,779
VtffQ1	0,750	0,711	0,711	0,724
VtfcQ1	0,711	0,675	0,675	0,687
VtgfQ1	0,750	0,711	0,750	0,737
VtgcQ1	0,675	0,711	0,675	0,687
VoQ2	0,964	0,901	1,038	0,968
VtafQ2	0,844	0,900	0,964	0,903
VtacQ2	0,844	0,844	0,900	0,862
VtffQ2	0,844	0,900	0,900	0,881

Tabela 19 - Valores de V6 e V6 médias (conclusão)

	V6			V6 média
	Tréplica 1	Tréplica 2	Tréplica 3	
VtfcQ2	0,794	0,794	0,794	0,794
VtgfQ2	0,844	0,844	0,794	0,827
VtgcQ2	0,794	0,794	0,750	0,779

Fonte: Do autor (2023).

4.8.1 Comparações de resultados para o escoamento de água

Foi feito o cálculo do valor do desvio padrão (Tabela 20) para cada conjunto de dados obtidos das variações dos experimentos com água aquecida e colorida.

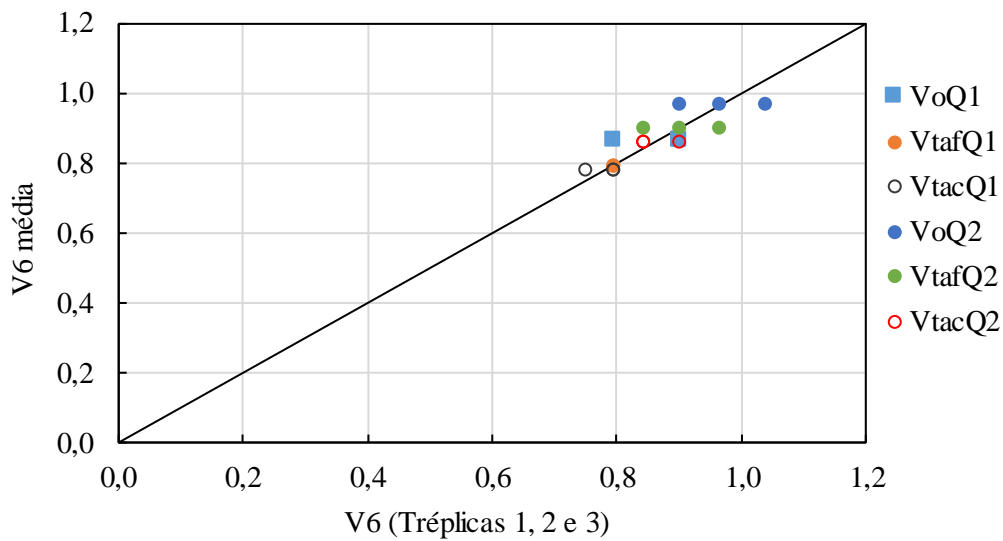
Tabela 20 - Desvios para V6 do escoamento de água

VoQ1		VtafQ1		VtacQ1	
V6 média	Desvio padrão	V6 média	Desvio padrão	V6 média	Desvio padrão
(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
0,865	0,061	0,794	0,000	0,779	0,025
VoQ2		VtafQ2		VtacQ2	
V6 média	Desvio padrão	V6 média	Desvio padrão	V6 média	Desvio padrão
(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
0,968	0,069	0,903	0,060	0,862	0,032

Fonte: Do autor (2023).

Foi possível comparar e representar graficamente as velocidades V6 obtidas em cada tréplica de cada variação do experimento, com seu respectivo valor de V6 média, conforme Figura 21.

Figura 21 - Comparações de V6 com V6 média para água



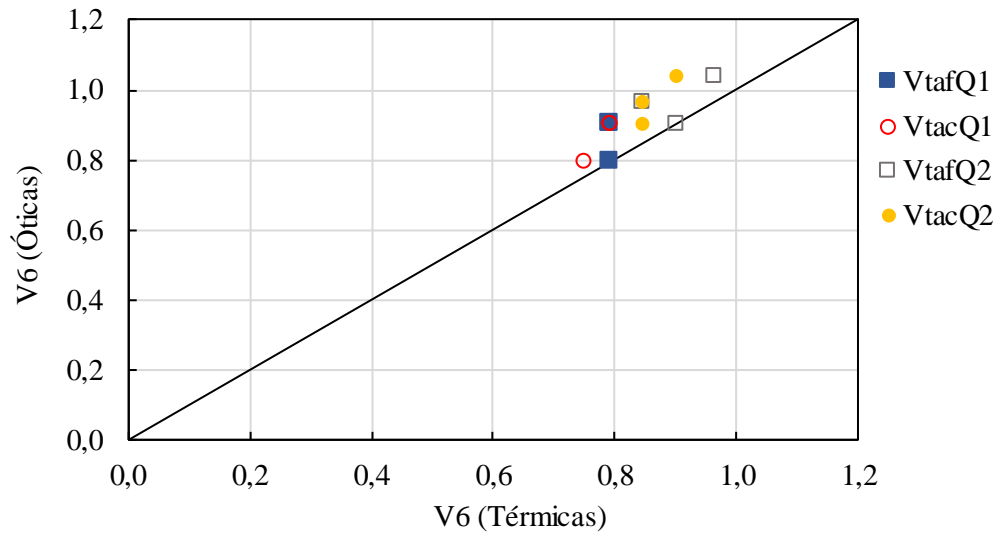
Fonte: Do autor (2023).

As observar a série VtafQ1 todos os valores de V6 das Três tréplicas apresentaram o mesmo valor, resultando uma mesma V6 média e desvio padrão igual a zero. Somente as séries VtafQ2 e VoQ2 não apresentaram pontos sobrepostos. O segundo menor desvio padrão, com valor de 0,025 m/s, foi observado para a série VtacQ1. Os maiores valores de desvio padrão se apresentaram nas velocidades óticas das séries VoQ1 e VoQ2.

Assim como o esperado, s valores para Q2 se mostraram superiores aos para Q1. Foi notado que há um padrão, com uma tendência das velocidades óticas, para as duas vazões, apresentarem valores superiores às térmicas pela frente, estas superiores às térmicas pelo centroide.

A Figura 22 apresenta uma relação entre as velocidades V6 térmicas em comparação com suas respectivas V6 óticas.

Figura 22 - Comparações de V6 térmicas com V6 óticas

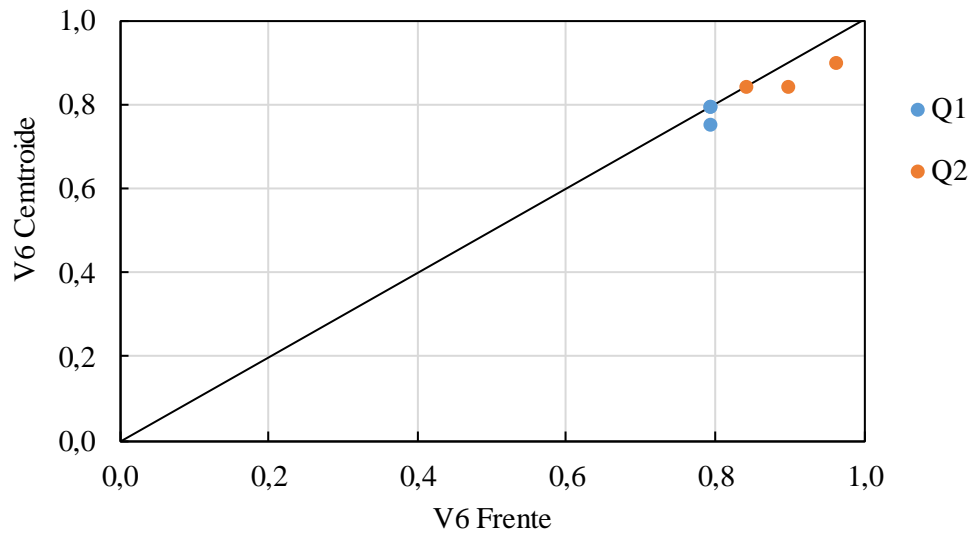


Fonte: Do autor (2023).

Todos os pontos representados encontram-se acima ou tocando a reta de referência, o que evidencia a tendência das velocidades óticas se apresentarem superiores às térmicas. Também os valores para Q2 se mostraram superiores a Q1.

Para comparar as velocidades V6 térmicas obtidas pela frente com as obtidas pelo centroide, para as duas vazões, foi elaborada a Figura 23.

Figura 23 - Comparações de V6 térmicas pela frente com pelo centroide



Fonte: Do autor (2023).

Os pontos apresentados no gráfico evidenciam a diferença de grandeza entre as vazões, além mostrar a tendência de as velocidades térmicas medidas pela frente apresentarem valor superior às medidas pelo centroide, isto se mostrou pelo fato de todos os pontos estarem tocando a reta de referência ou abaixo dela.

4.8.2 Comparações de resultados para o transporte de sedimentos

Foi calculado o valor do desvio padrão (Tabela 21) para as médias de cada conjunto de dados obtidos das variações dos experimentos com sedimento aquecido (Tabela 19).

Tabela 21 – Desvios para V6

(continua)

VtffQ1		VtfcQ1		VtgfQ1	
V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)	V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)	V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)
0,724	0,023	0,687	0,021	0,737	0,023
VtgcQ1		VtffQ2		VtfcQ2	
V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)	V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)	V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)
0,687	0,021	0,881	0,032	0,794	0,000

Tabela 21 – Desvios para V6

(conclusão)

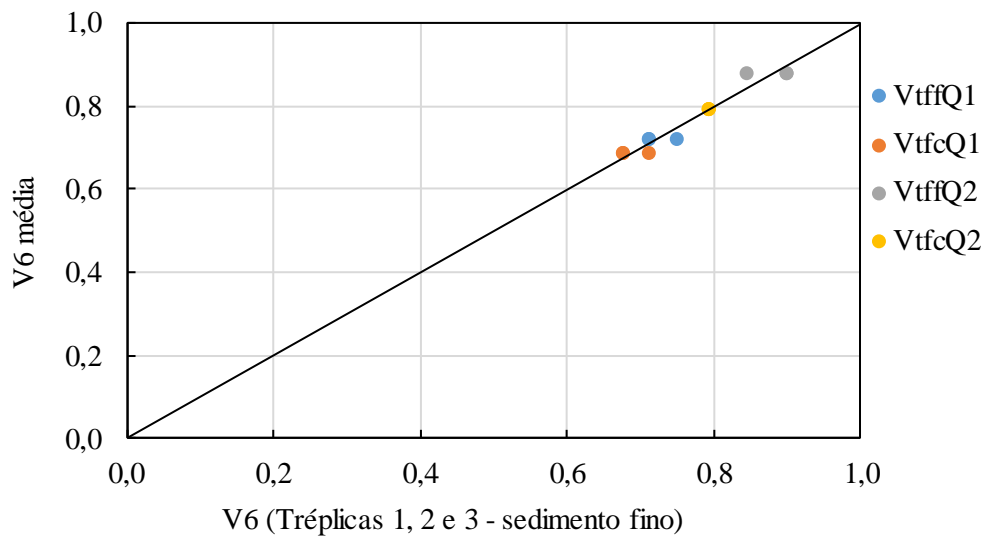
Vt _{gf} Q2		Vt _{gc} Q2	
V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)	V6 média (m/s)	Desvio padrão (m/s)
0,827	0,029	0,779	0,025

Fonte: Do autor (2023).

Os dados para Vt_{fc}Q2 apresentaram uniformidade para as três réplicas e o consequente desvio padrão igual a zero. Todos os valores para o desvio padrão ficaram iguais ou abaixo a 0,32 m/s, apresentando melhores valores em relação aos obtidos na seção 4.8.1.

A Figura 24 apresenta uma comparação entre velocidades V6 obtidas em cada réplica de cada variação do experimento, com seu respectivo valor de V6 média, todas para o sedimento fino.

Figura 24 - Comparações de V6 com V6 média para o sedimento fino

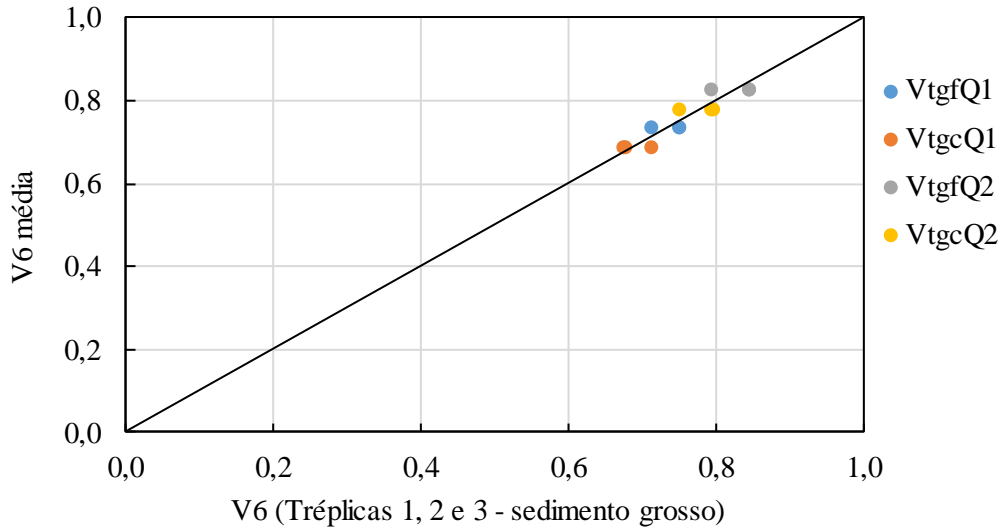


Fonte: Do autor (2023).

Os pontos ficaram distribuídos igualmente acima e abaixo da reta de referência, próximos a ela, o que indica que nenhum valor para V6 nas réplicas diferiu muito de sua média, o baixo valor dos desvios na Tabela 21 também indicou esse comportamento dos dados. Os valores para as velocidades referentes à frente da mancha mostraram uma tendência a serem superiores aos calculados pelo centroide. Os valores para a vazão 2 se apresentaram maiores em relação à vazão 1.

Comportamento semelhante pôde ser observado na Figura 25, que apresenta uma comparação também entre as velocidades V6 obtidas em cada tréplica de cada variação do experimento, com seu respectivo valor de V6 média, porém para o sedimento grosso.

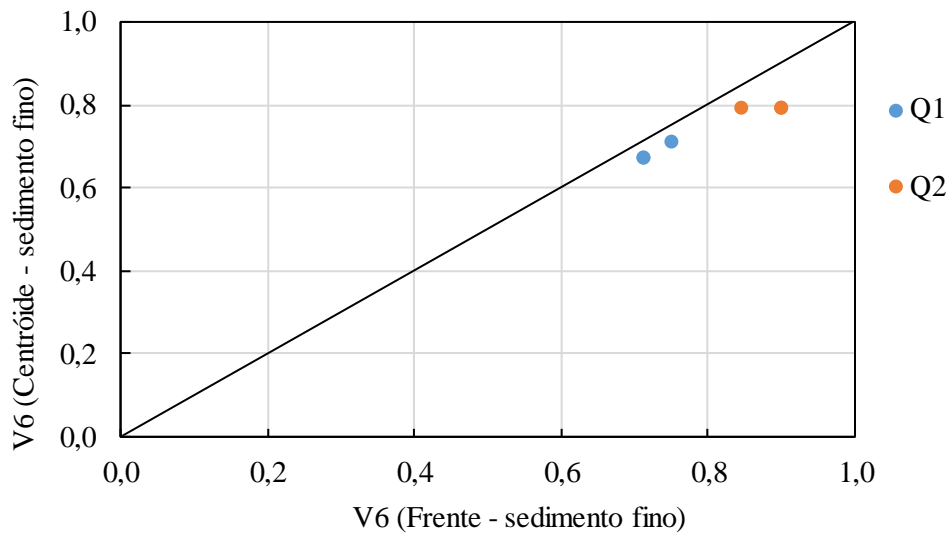
Figura 25 - Comparações de V6 com V6 média para o sedimento grosso



Fonte: Do autor (2023).

Com o intuito de observar mais detalhadamente o comportamento dos dados de velocidade relacionados à frente da mancha, quando comparados aos relacionados ao centroide para o sedimento fino, foi elaborada a Figura 26.

Figura 26 - Comparações de V6 térmicas pela frente com pelo centroide para o sedimento fino

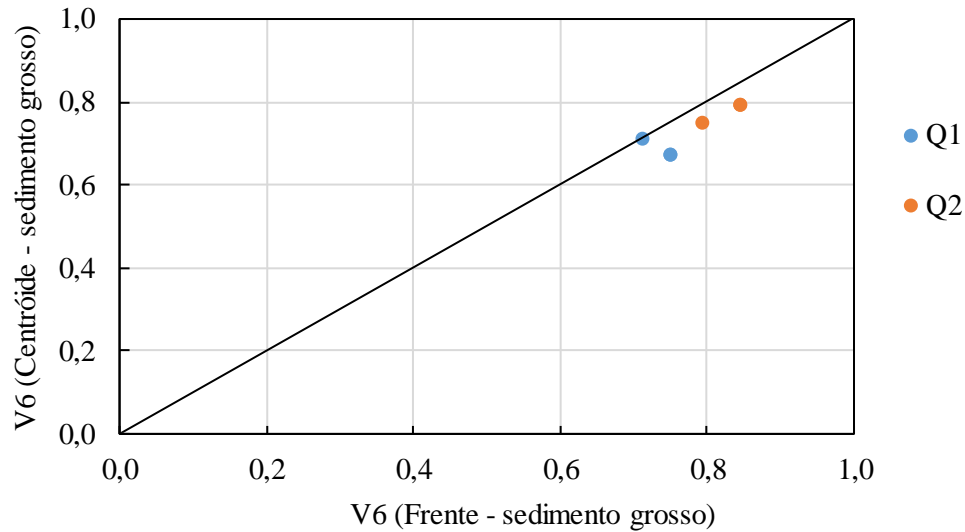


Fonte: Do autor (2023).

Foi observado que todos os pontos se encontram localizados abaixo da reta de referência, o que evidencia a tendência observada de os valores de velocidade obtidos para a frente da mancha se apresentarem superiores aos obtidos pelo centroide. As vazões se mostraram coerentes, com os valores para Q2 superiores aos de Q1.

O mesmo foi feito para o sedimento grosso, onde foi observado um comportamento dos dados muito semelhante ao descrito para o sedimento fino, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 - Comparações de V6 térmicas pela frente com pelo centroide para o sedimento grosso

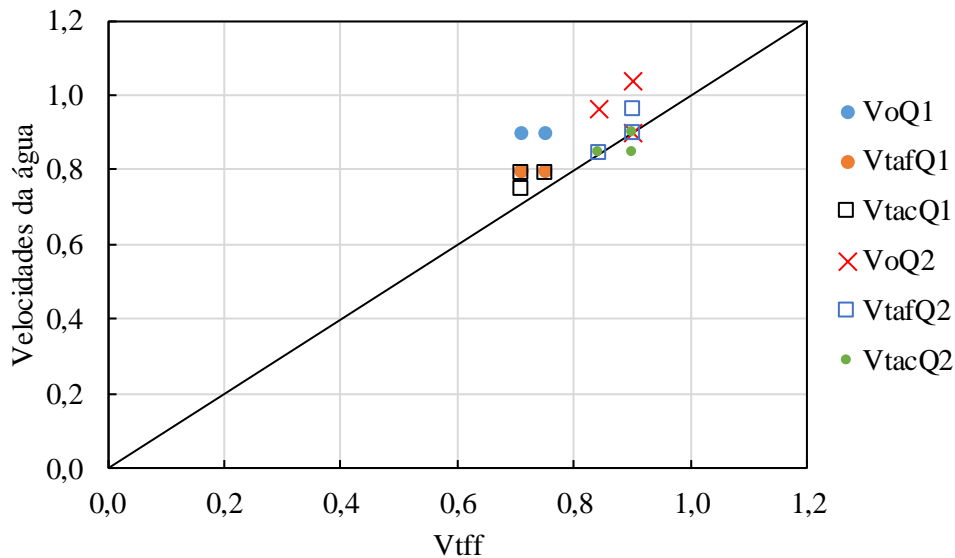


Fonte: Do autor (2023).

4.8.3 Comparações de resultados entre o escoamento e o transporte de sedimentos

Foram elaborados gráficos comparativos entre as velocidades dos sedimentos em função das velocidades encontradas para o escoamento, envolvendo todas as técnicas de medição com intuito de compará-las. A Figura 28 apresenta uma relação entre as velocidades térmicas pela frente do sedimento fino (V_{tff}) para Q1 e Q2, e as velocidades do escoamento de água.

Figura 28 - Comparação de V_{tff} com velocidades da água



Fonte: Do autor (2023).

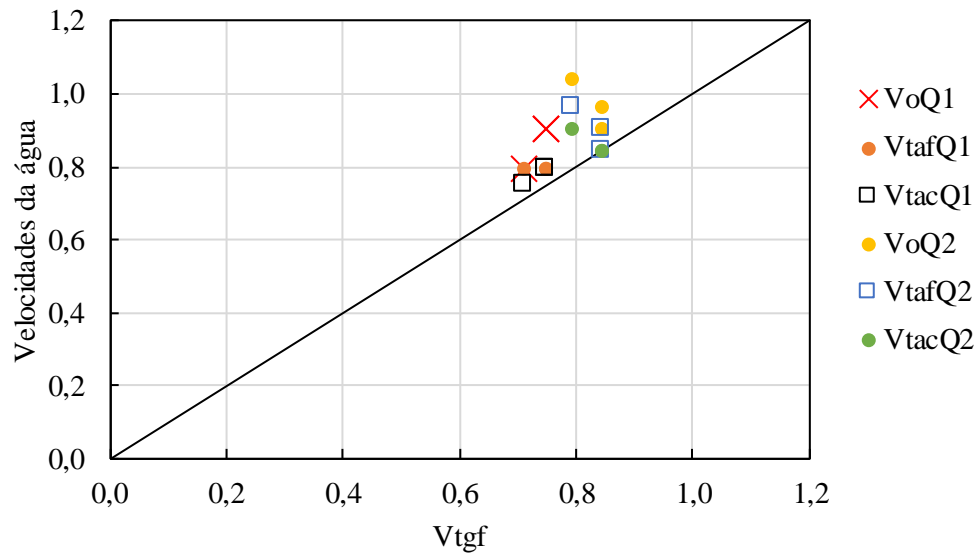
Para as séries de pontos representando as velocidades do escoamento de água, apenas a série VtacQ2 apresentou um ponto abaixo da reta de referência, indicando que somente esse ponto apresentou velocidade menor se comparado com a velocidade V_{tff} em sua respectiva vazão.

Os demais pontos dessa série se mostraram tocando ou acima da reta de referência, o que era esperado dado a tendência das velocidades do escoamento calculadas pelo centroide se mostrarem inferiores às demais técnicas de medição. Todos os demais pontos encontram-se tocando a reta de referência ou acima da mesma, o que mostra uma tendência de as velocidades do sedimento fino para a frente serem inferiores à velocidade do escoamento.

A diferença entre as vazões 1 e 2 ficou evidenciada graficamente, com os pontos referentes a Q2 ocupando uma região acima dos pontos referentes a Q1

A Figura 29 a seguir apresenta uma comparação do mesmo tipo para as velocidades relacionadas à frente do sedimento grosso.

Figura 29 - Comparação de V_{tgf} com velocidades da água

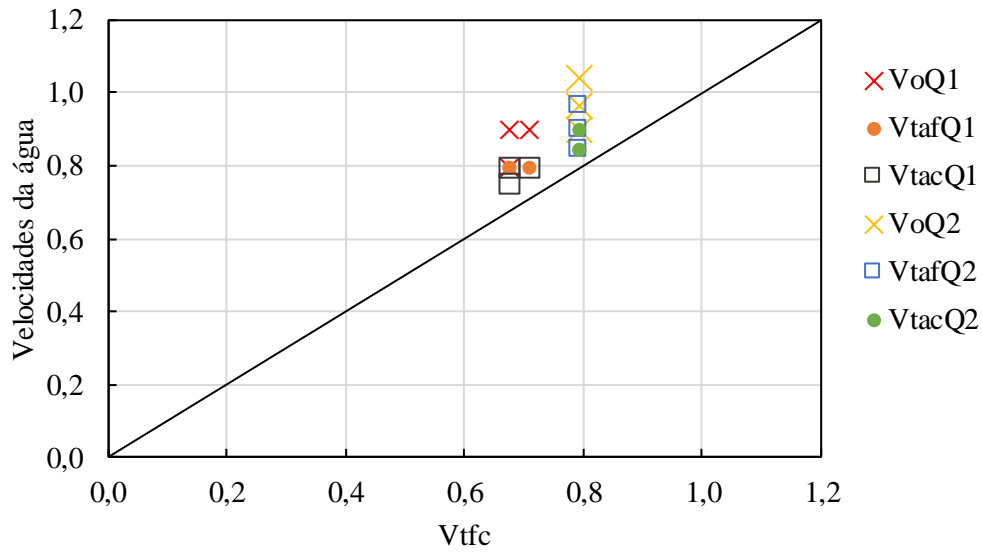


Fonte: Do autor (2023).

Para este caso, nenhum ponto foi localizado abaixo da reta de referência, o que confirma a tendência das velocidades do sedimento se mostrarem inferiores às do escoamento. Novamente a diferença entre as vazões é notável, porém a série VoQ1 apresentou valores semelhantes a alguns pontos para Q2, tendência já observada anteriormente dos dados óticos serem superiores aos dados térmicos.

Na Figura 30 estão representados os dados de velocidade pelo centroide para o sedimento fino (V_{tgc}) em função dos dados de velocidade óticos.

Figura 30 - Comparação de V_{tfc} com velocidades da água



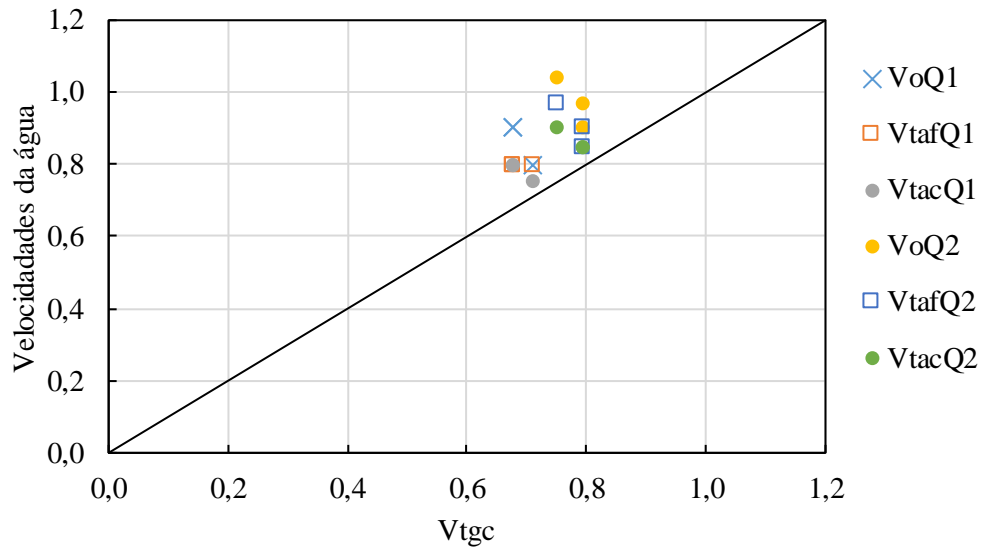
Fonte: Do autor (2023).

Observou-se para este caso que todos os pontos se encontram acima da reta de referência, evidenciando a tendência de as velocidades do escoamento serem superiores as velocidades para o transporte de sedimentos.

Os valores para as vazões distintas se mostraram coerentes, com alguns valores para VoQ1 se mostrando superiores aos demais dados para a mesma vazão.

Comportamento semelhante foi observado na Figura 31, que apresenta uma comparação do mesmo tipo para as velocidades relacionadas à frente do sedimento grosso.

Figura 31 - Comparação de V_{tgc} com velocidades da água

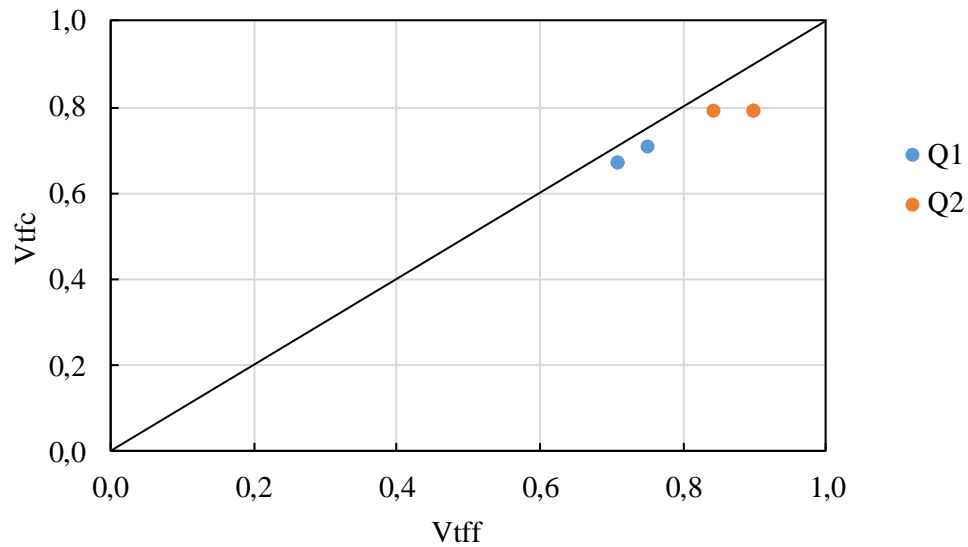


Fonte: Do autor (2023).

Todos os dados apresentados para os sedimentos encontram-se próximos entre si, com valores próximos e desvios baixos, como mostra a Tabela 21, indicando que as técnicas de medição para a frente e para o centroide são viáveis tanto para o sedimento fino quanto para o grosso.

A Figura 32 apresenta uma comparação para o sedimento fino entre as velocidades para a frente (V_{tff}) e as para o centroide (V_{tfc}).

Figura 32 - Comparação de V_{tfc} com V_{tff}

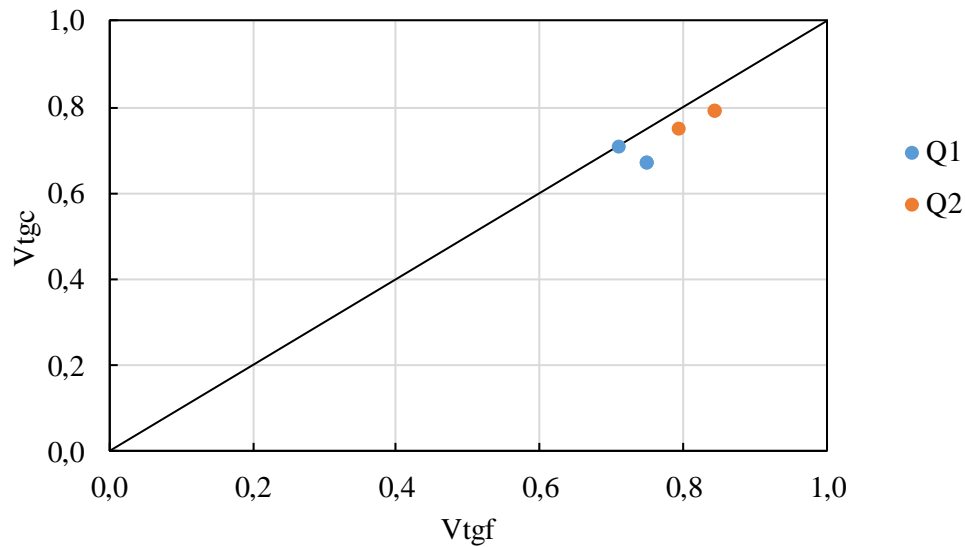


Fonte: Do autor (2023).

Ao comparar as velocidades pela frente com as pelo centroide para o sedimento fino, observou-se que todos os pontos se encontram abaixo da reta de referência, indicando uma tendência de as velocidades pela frente serem superiores às pelo centroide para o transporte de sedimentos, fato que já havia sido observado para as velocidades da água. Os dados pela frente apresentaram, em média, um valor de 0,037 m/s a mais em relação aos valores para o centroide para Q1 e 0,87 m/s para Q2, mostrando que para os dados referentes a Q1 os valores encontram-se mais próximos.

A mesma comparação foi feita para o sedimento grosso, como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Comparação de V_{tgc} com V_{tgf}



Fonte: Do autor (2023).

Fenômenos semelhantes ao sedimento fino puderam ser observados em relação ao sedimento grosso, os pontos encontram-se abaixo da linha de referência, indicando valores de velocidade maiores para a frente do que para o centroide. A média da diferença entre V_{tgf} e V_{tgc} foi de 0,50 m/s para Q1 e Q2, neste caso não houve variação das médias das diferenças ao se mudar a vazão.

Com relação ao sedimento fino comparado ao grosso, não foi identificado um padrão de tendência, em algumas séries as velocidades do sedimento fino foram um pouco maiores e em outras o inverso. A diferença média entre dados de velocidade do sedimento fino e do grosso foi de 0,014, indicando que o comportamento de ambos foi semelhante nas mesmas condições de escoamento.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para a determinação da velocidade de escoamentos de baixa lâmina e a velocidade do transporte de sedimentos pelo mesmo utilizando de termografia por infravermelho. Foram realizados diversos ensaios laboratoriais com variadas técnicas de medição das velocidades envolvidas. Com isso, foi possível analisar cada método de medição e comparar as velocidades obtidas.

Os dados relativos à condutividade não foram utilizados nas comparações finais de resultados por não envolverem a mesma área de estudo que as demais análises, optou-se por focar e comparar apenas os resultados obtidos para as mesmas condições experimentais.

Um padrão foi observado ao se comparar as técnicas ótica e térmica, sendo que as velocidades óticas apresentaram resultados maiores em relação às térmicas para um mesmo experimento. Foi notada maior dificuldade de coleta dos dados nas imagens óticas, dada a imprecisão de sua borda principal, que vai se diluindo ao longo do escoamento, tornando difícil e por ventura imprecisa sua identificação.

Concluiu-se que a técnica ótica foi a que apresentou menor precisão nos resultados, com base nas dificuldades de medição e em fenômenos físicos que podem ter afetado a visualização da mancha de água colorida, já que a água da amostra apresentava densidade e temperatura muito diferentes das condições do escoamento. Também foi para essa técnica que os conjuntos de dados de um mesmo experimento apresentaram os maiores desvios padrões dentre todas as análises.

As técnicas termográficas se mostraram viáveis e com resultados consistentes, apresentando desvios padrões pequenos para conjuntos de dados de uma mesma condição experimental. Ambas as técnicas (pela frente e pelo centroide) se mostraram consistentes, com as diferenças dos dados abrangidas pelas incertezas calculadas,

Após as comparações entre os dados de velocidade calculados, foram identificados alguns padrões. Como mencionado, os resultados óticos apresentaram consistentemente valores maiores que as demais técnicas, já foi discutido que consideramos neste trabalho as velocidades óticas como as menos precisas.

Dentre os dados térmicos, consistentemente as velocidades calculadas pela frente da mancha térmica apresentaram valores muito próximos entre si, porém ligeiramente maiores que as calculadas pelo centroide. As velocidades pela frente foram consideradas as mais precisas por apresentarem menor desvio padrão e uma maior facilidade de se distinguir claramente a frente da mancha nas imagens coletadas e tratadas. As velocidades pelo centroide apresentaram

melhor precisão nas coletas de dados em relação às imagens óticas, porém um pouco mais imprecisas que as imagens da frente da mancha térmica.

Foi observado uma tendência de as velocidades do transporte de sedimentos se apresentarem inferiores às velocidades do escoamento para as mesmas condições experimentais. Isto era esperado já que a resistência ao movimento imposta pela massa dos sedimentos e o atrito com o fundo do canal atrasariam o movimento em relação ao fluxo ao seu redor. Também em relação aos sedimentos, foi concluído que, para as granulometrias testadas, não houve influência do diâmetro dos grânulos nas medidas de velocidade para uma mesma condição e escoamento, dado que os resultados de velocidade se apresentaram muito próximos, com baixo desvio padrão e dentro dos intervalos de incerteza calculados

6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Sugere-se para trabalhos futuros, um aperfeiçoamento nas condições experimentais que permitam uma quantidade maior de variações nos experimentos, como por exemplo aumentar o número de vazões e/ou granulometrias testadas. Também se recomenda que os experimentos realizados neste trabalho sejam repetidos mais vezes, para acrescentar maior validade estatística aos dados.

Adquirir imagens que possibilitem a exportação de vídeos com uma maior frequência de frames por segundo se mostrou fundamental para o desenvolvimento de uma análise mais criteriosa, sendo que a minimização dos intervalos espacial e temporal a cada frame atribuiria maior qualidade e precisão aos resultados.

Para comparação de dados para a velocidade do escoamento obtida por condutividade em trabalhos futuros, recomenda-se a padronização do comprimento da área de estudo, uma diferença considerável entre esses comprimentos mostrou ter influência negativa nos dados obtidos.

A técnica termográfica mostrou-se promissora e há uma gama de estudos possíveis na área da hidrologia que envolvam a tecnologia da termografia por infravermelho.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMAS, AD, PARSONS, AJ, LUK, S. H. Field measurement of surface flow velocity using dye tracing. **Earth Surface Processes and Landforms**. [S. l.], v. 11, n. 6, p. 653-657, 1986.
- ABRANTES, J.R.C.B.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, VALDEMIR P.; DE LIMA, J.L.M.P. The importance of mulching on soil and water dynamics: laboratory experiments under simulated rainfall. *In*: IAHR EUROPE CONGRESS, 3., 2014, Porto. **Anais [...]**. Porto, Portugal, 2014.
- ABRANTES, J. R. C. B., & LIMA, J. L. M. P. DE. Termografia para determinação da micro topografia da superfície do solo em diferentes condições de cobertura morta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. [S. l.], v. 9, n. 3, p. 1-10, 2014.
- ABRANTES, J. R. C. B.; MORUZZI, R. B.; LIMA, J. L. M. P. de; SILVEIRA, A.; MONTENEGRO, A. A. A. Utilização de termografia para a estimativa de velocidades e profundidades de escoamentos superficiais pouco profundos e caracterização do microrelevo. *In*: CONGRESSO DA ÁGUA, 12., 2014, Lisboa, ENCONTRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 16., 2014, Lisboa, SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 16., 2014, Lisboa, **Anais [...]**. Lisboa, Portugal, Março 2014.
- ABRANTES, J. R. C. B.; MORUZZI, R. B.; LIMA, J. L. M. P. de; SILVEIRA, A.; MONTENEGRO, A. A. A. Combining a thermal tracer with a transport model to estimate shallow flow velocities. **Physics and Chemistry of the Earth**. [S. l.], v. 109, p. 59-69, 2019.
- BACH, M. P.; MCCARTHY, D. T.; DELETIC, A. Redefining the stormwater first flush phenomenon. **Water Research**. [S. l.], v. 44, p. 2487-2498, 2010.
- BEZERRA Jr., A. G.; OLIVEIRA, L. P.; LENZ, J. A. Videoanálise com o software livre Tracker no laboratório de ensino de física: movimento parabólico e segunda lei de Newton. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. [S. l.], v. 29, p. 469-490, 2012.
- BJERKLIE, D. M., DINGMAN, S. L., VOROSMARTY, C. J., BOLSTER, C. H., CONGALTON, R. G. Assessing the potential to measure river discharge from space. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 278, n. 3, p. 13-78, 2003.
- BJERKLIE, D. M. Estimating flood velocity and river discharge using remote sensing river morphological information. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 341, n. 3, p. 144-155, 2007.
- CALKINS, D., DUNNE, T. A salt tracing method for measuring channel velocities in small mountain streams. **Journal of Hydrology**. [S. l.], v. 11, n. 4, p. 379-392, 1970.
- CANHOLI, J. F. **Medidas de controle in situ do escoamento superficial em áreas urbanas: análise de aspectos técnicos e legais**. 2013. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CASTANEDO, I., MALDAGUE, X. Infrared thermography. **Handbook of technical diagnostics**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. p. 175-220.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 142f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 225f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CORRALLO, M. V.; JUNQUEIRA, A. C.; LIMA, L. G. Software livre Tracker: análise da viabilidade para ensino de física. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 22., 2017, São Carlos. Anais [...].* São Carlos, 2017.

DELETIC, A. The first flush load of urban surface runoff. **Water Research**, [S.l.], v. 32, n. 8, p. 2462-2470, ago. Elsevier BV, 1998.

DUNKERLEY, D. Estimating mean velocity of shallow laminar flow using dye injection uncertainty on rough surfaces **Earth Surface Processes and Landforms**. [S.l.], v. 26, n. 4, p. 363-374, 2001.

DUNKERLEY, D. An optical tachometer for short-path velocity measurement of shallow surface flows: enhanced alternative to dye-tracing time. **Earth Surface Processes and Landforms**. [S.l.], v. 28, n. 7, p. 777-786, 2003.

EMMETT, W. W. The Hydraulics of overland flow on hillslopes. **Professional Paper of the United States Geological Survey**, 662. US Government Printing Office, Washington, DC, USA, 1970.

FARENHORST, A. R. B.; BRYAN, R. B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**. [S.l.], v. 25, n. 4, p. 47-62, 1995.

FELICE, J. G. **Transporte de material em suspensão e dissolvido em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada**. 2017. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.

FLURY, M., FLÜHLER, H. Brilliant blue FCF as a dye tracer for solute transport studies: a toxicological perspective. **Journal of Environmental Quality**. [S.l.], v. 23, n. 5, p. 1108-1112, 1993.

FLURY, M., WAI, N. N. Dyes as tracers for vadose zone hydrology. **Reviews of Geophysics**. [S.l.], v.41, n. 1, p. 1002, 2003.

FULTON, J., OSTROWSKI, J. Measuring real-time streamflow using emerging technologies: Radar, hydroacoustics, and the probability concept. **Journal of Hydrology**. [S.l.], v. 357, n. 2, p. 1-10, 2008.

GIMÉNEZ, R.; PLANA, F.; GISPERT, M.; SCHMIDT, M. Soil erosion by water: new aspects in an old problem. **Catena**. [S.l.], v. 57, n. 3, p. 299-302, 2004.

GOVERS, G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. **Earth Surface Processes and Landforms**. [S.l.], v. 17, n. 5, p. 515-528, 1992.

GUPTA, K.; SAUL, A. J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. **Water Research**. [S.l.], v. 30, n. 5, p. 1244-1252, 1996.

HAJIGHOLIZADEH, M.; MELESSE, A. M.; FUENTES, H. R. Erosion and sediment transport modelling in shallow waters: a review on approaches, models and applications. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. [S.l.], v. 15, n. 3, p. 518, 2018.

HOLDEN, J., KIRKBY, M. J., LANE, S. N., MILLEDGE, D. G., BROOKES, C. J., HOLDEN, V., MCDONALD, A. T. Surface flow velocity and roughness properties in peatlands. **Water Resources Research**. [S.l.], v. 44, n. 6, p. 1-11, 2008.

HORTON, R.E., LEACH, H.R., VLIET, V.R. Laminar sheet-flow. EOS transactions, **American Geophysical Union**. [S.l.], v. 15 n. 2, p. 393-404, 1934.

JIRKA, G.H., UIJTTEWAAL, W.S.J. Shallow flows. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SHALLOW FLOWS, 1., 2003, Delft, Netherlands. **Anais [...]**. Delft, CRC Press, 2004.

KENNEDY, J. F. Speech at the University of California, Berkeley. Retrieved from **The American Presidency Project**, 1962.

KIMIAGHALAM, N., CLARK, S. P., AHMARI, H. An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate. **International Journal of Sediment Research**. [S.l.], v. 31, n. 1, p. 1-15, 2016.

KREIBICH, H.; THIEKEN, A. H.; PETROW, Th.; MÜLLER, M.; MERZ, B. Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures – lessons learned from the Elbe flood in August 2002. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. [S.l.], v. 5, n. 1, p. 117-126, 2009.

LEI, T., ZHANG, X., PENG, J. Evaluation of water quality models for prediction of non-point source pollution in large river basins. **Journal of Hydrology**. [S.l.], v. 308, n. 4, p. 276-291, 2005.

LEE, J. H.; BANG, K. W.; KETCHUM, L. H.; CHOE, J. S.; YU, M. J. First flush analysis of urban storm runoff. **The Science of the Total Environment**. [S.l.], v. 293, p. 163-175, 2002.

LIMA, B. O. **Transporte de material dissolvido pelo escoamento superficial produzido por um simulador de chuva sobre uma superfície impermeável**. 2017. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.

MAMUN, A., SHAMS, S.; NURUZZAMAN, M. Review on uncertainty of the first-flush phenomenon in diffuse pollution control. **Appl Water Sci.** [S.l.], v. 10, p. 53, 2020.

MAESTRE, A.; PITT, R. The national stormwater quality database, version 1.1: a compilation and analysis of NPDES stormwater monitoring information. **Wayback Machine Report** prepared for U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC. 2005.

MAURICE, L., ATKINSON, T. C., WILLIAMS, A. T., BARKER, J. A., FARRANT, A. R. Testing of a catchment-scale tracer in porous limestone. **Journal of Hydrology.** [S.l.], v. 389, n. 2, p. 31-41, 2010.

MEOLA, C., CARLOMAGNO, G. M. Recent advances in the use of infrared thermography. **Measurement Science and Technology.** [S.l.], v. 15, n. 9, p. 27, 2004.

MICHA, D. N., PENELLO, G. M. "Vendo o invisível": experimentos de visualização do infravermelho feitos com materiais simples e de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física.** [S.l.], v. 33, n. 1, p. 01-06, Março, 2011.

MONTENEGRO, A. A. de A., ABRANTES, J. R. C. de B., PEDROSO DE LIMA, J. L. M., & SINGH, V. P. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena,** [S.l.], v. 109, p. 139-149, 2013.

MÜGLER, A.; THIEKEN, A. H.; KREIBICH, H.; MERZ, B. Flood loss reduction in Germany: impact of private precautionary measures. **Natural Hazards and Earth System Sciences,** v. 11, p. 423-436, 2011.

MUSTE, M.; YU, K.; PRATT, T.; SPASOJEVIC, M. Practical aspects of using ADCP data for quantifying river flow characteristics; part I: measurements from moving boats. **Flow Measurement and Instrumentation.** [S.l.], v. 15, n. 1, p. 1-16, 2004.

MUSTE, M.; YU, K.; PRATT, T.; ABRAHAM, D. Practical aspects of using ADCP data for quantifying river flow characteristics; part II: measurements from fixed vessels. **Flow Measurement and Instrumentation.** [S.l.], v. 15, n.1, p. 17-28, 2004.

NIAZI, A.; BENTLEY, L. R.; HAYASHI, M. Estimation of spatial distribution of groundwater recharge from stream baseflow and groundwater chloride **Journal of Hydrology.** [S.l.], n. 3 v. 546, p. 380-392, 2017.

PESSOTI, B. P. L. **Transporte de material em suspensão e dissolvido em superfície impermeável sob chuva artificial**. 2018. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2018.

PFISTER, L. *et al.* Looking at catchments in colors: combining thermal IR imagery with geochemical and isotopic tracers to document spatio-temporal dynamics of water source and flowpaths in the hillslope-riparian zone-stream system. *In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE ABSTRACTS*, 2012, Corvallis. **Anais [...]**Corvallis, USA, 2012.

QUILES, E. Z. **Influência da implantação de bacia de detenção e da ocupação no amortecimento de hidrogramas e do transporte de material solúvel utilizando modelo reduzido**. 2019, 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2019.

SANTOS, A. R.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, M. C.; LIMA, J. R. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em micro-bacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. [S.l.], v. 18, n. 11, p. 1157-1164, 2014.

SCHUETZ, T., WEILER, M., LANGE, J., & STOELZLE, M. Two-dimensional assessment of solute transport in shallow waters using thermal imagery and heated water. **Water Resources Research**. [S.l.], v. 48, n. 1, p. 224-232, 2012.

SHI, X., ZHANG, F., LEI, T., CHUO, R., ZHOU, S., YAN, Y. Measurement of shallow water flow velocity with virtual boundary condition signal in the electrolyte tracer method. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 452-453, n. 4 p. 172-179, 2012.

SILVA JUNIOR, E. A. **Manual de controle higiênico sanitário em serviços de alimentação**. 7. ed. São Paulo: Varela, 2014.

STENSTROM, M. K.; KAYHANIAN, M. First flush phenomenon. Final report prepared for the **California Department of Transportation**, Sacramento, California, 2005.

STRUCK, W.; YERRICK, R. The effect of data acquisition-probeware and digital video analysis on accurate graphical representation of kinetics in a high school physics class. **Journal of Science Education Technology**. [S.l.], v. 19, p. 199-211. 2010.

TAKKEN, I.; GOVERS, G. Transport capacity of overland flow and its role in soil erosion and sediment transport. **Earth Surface Processes and Landforms**. [S.l.], v. 25, n. 2, p. 239-252, 2000.

TAURO, F., GRIMALDI, S., PETROSELLI, A., PORFIRI, M. Fluorescent particle tracers for surface flow measurements: a proof of concept in a natural stream. **Water Resources Research**. [S.l.], v. 48, n. 6, p. 1-10, 2012.

TAURO, F., GRIMALDI, S., PETROSELLI, A., RULLI, C., PORFIRI, M. Fluorescent particle tracers in surface hydrology: a proof of concept on a semi-natural hillslope. **Hydrology and Earth System Sciences**. [S.l.], v. 16, n. 8, 2012.

TAURO, F., PAGANO, G., PORFIRI, M., GRIMALDI, S. Tracking shallow water flows through floating fluorescent particles. **Flow Measurement and Instrumentation**. [S.l.], v. 26, p. 93-101, 2012.

TAURO, F., PORFIRI, M., GRIMALDI, S. Guiding the camera and firing lasers to enhance large-scale particle image velocimetry for flow monitoring. **Water Resources Research**. [S.l.], v. 50, n. 9, p. 7470-7483, 2014.

TAURO, F., PORFIRI, M., GRIMALDI, S. Drone-based surface flow measurements. **Journal of Hydrology**. [S.l.], v. 540, p. 240-245, 2016.

TAURO, F., GRIMALDI, S. Ice data to monitor stream surface velocity. **Journal of Hydro-Environment Research**. [S.l.], v.14, p. 143-149, 2017.

TAZIOLI, A. Experimental methods for river flow measurements: comparison between tracers and flow meters. **Journal of Hydrological Science**. [S.L.], v. 56, n. 7, p. 1314-1324, 2011.