



FRANCISCO FILIPE AVEIRO  
Licenciado em Engenharia Civil

# DETEÇÃO DA BATIMETRIA EM CANAL DE ONDAS USANDO IMAGENS DE VÍDEO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL  
DE ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa  
maio, 2023





# DETEÇÃO DA BATIMETRIA EM CANAL DE ONDAS USANDO IMAGENS DE VÍDEO

**FRANCISCO FILIPE AVEIRO**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Orientadores:** Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,  
Professora Associada com Agregação, Universidade NOVA de Lisboa  
Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu,  
Professor Adjunto, Instituto Politécnico do Porto

**Júri:**

**Presidente:** Doutora Ana Catarina P. S. Cruz Lopes,  
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Arguentes:** Doutor Moisés Gonçalves de Brito,  
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Orientador:** Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,  
Professora Associada com Agregação, Universidade NOVA de Lisboa  
Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu,  
Professor Adjunto, Instituto Politécnico do Porto



## **Deteção da Batimetria em Canal de Ondas Usando Imagens de Vídeo**

Copyright © Francisco Filipe Aveiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.







## AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, queria deixar um agradecimento público a todas as pessoas estando ou não envolvidas neste trabalho e que possam ou não estar de seguida mencionadas, mas que de uma forma ou de outra tenham contribuído para que eu tenha chegado finalmente a esta etapa da minha vida, que agora termina. E que acima de tudo, que quem agora me lê, que desfrute deste tema tanto ou mais do quanto eu.

Queria deixar um agradecimento especial aos meus orientadores, professora Maria Graça Neves e professor Tiago Abreu. À professora, por mostrar sempre toda e qualquer disponibilidade, por promover todas as condições necessárias para o desenrolar deste trabalho, intermediando o meu contacto com todas as pessoas envolvidas, por me proporcionar um tema de tese (a meu ver) tão desafiante e finalmente por me abrir os horizontes da engenharia civil na UC de hidráulica marítima e portos. Mostrando sempre dedicação para com o sucesso dos seus alunos. Ao professor Tiago, por mesmo estando tão longe esteve sempre tão perto, entre chamadas *Zoom* ou telefónicas, mostrando toda e qualquer disponibilidade imaginável, pela paciência em explicar e re-explicar todos os pormenores que este trabalho exigiu, pelo facto de ser tão humano na maneira como fala com as pessoas e finalmente por partilhar o seu bom gosto gastronómico.

Outro agradecimento especial, ao professor Moisés de Brito, que sem ele os ensaios deste trabalho não teriam sido possíveis. Pela disponibilidade na preparação do laboratório e assistência técnica imediata para todos os ensaios e finalmente pela disponibilização da câmara fotográfica, que foi a peça chave neste trabalho.

Outro agradecimento especial ao Diogo Santos, por me facultar o código *MATLAB* e se mostrar sempre disponível em ajudar.

Agradecimento em especial ao LNEC, na pessoa do Eng. Francisco Sancho, pela disponibilização do material utilizado nos ensaios com fundo móvel.

Aos meus colegas de curso (mais próximos), por sempre me apoiarem nesta caminhada e aos meus amigos de longa data, por sempre poder contar com eles no sucesso e na desgraça, um forte abraço a todos eles e muito obrigado.

Um abraço eterno à minha família pela infância que me proporcionaram e um agradecimento especial aos meus pais, pelas propinas extra que mais recentemente patrocinaram.

E por último um agradecimento especialíssimo à minha namorada, por sempre estar pronta a ajudar nos bons e maus momentos, exigentes ou nem tanto exigentes, nesta caminhada que já vai longa e por me livrar de muitos momentos de solidão e outros tantos de procrastinação.





## RESUMO

Nesta dissertação pretende-se averiguar a fiabilidade de uma metodologia utilizada para a determinação da batimetria junto a portos marítimos através da captação de imagens da superfície do mar, com recurso a câmara de vídeo, aquando aplicada a um canal em laboratório onde decorrem ensaios à escala reduzida. Esta tecnologia é importante para a análise da batimetria em campo, na medida em que, em dias de temporal, é difícil analisar as mudanças da batimetria nas embocaduras dos portos com recurso a metodologias tradicionais, que dependem do acesso por via marítima e que estão impossibilitados de efetuar levantamentos nessas condições. No caso de ensaios em modelo físico, esta ferramenta é igualmente uma forma barata e rápida de obter informação de alterações de batimetria durante um ensaio. No entanto, a sua fiabilidade não foi verificada, sendo este o objetivo desta dissertação.

Assim, neste trabalho, captam-se imagens sequenciais da propagação de ondas regulares geradas num canal de laboratório a escala reduzida com fundo fixo e móvel, sendo posteriormente tratadas por um processo de ortorretificação, e utiliza-se um programa em linguagem *MATLAB*, que através do padrão exibido pelas ondas à superfície, deteta os comprimentos e os períodos das ondas. Com o conhecimento dessas características, estimam-se as profundidades ao longo do canal, através da relação de dispersão.

Realizaram-se ensaios com agitação regular com características de onda (alturas e períodos de onda) distintas e foram efetuados em configurações de fundo fixo e de fundo móvel composto por baquelite. Para os ensaios com fundo fixo verificou-se que os melhores resultados obtidos nos ensaios foram para os menores períodos e maiores alturas de onda ensaiados. Dadas as pequenas dimensões do canal, para períodos maiores o número de cristas observadas numa imagem era reduzido, levando à redução da qualidade dos resultados. As pequenas alturas de onda tinham fraca distinção entre os pixels nas várias fases da onda.

Para os ensaios com fundo móvel, a análise de imagens baseou-se na determinação da celeridade instantânea reproduzida pelas coordenadas das cristas das ondas nas *timestacks*, para determinar a batimetria ao longo do canal. Os resultados obtidos não conseguiram, de uma forma geral, reproduzir eficazmente a geometria do fundo real, mas permitiram qualitativamente seguir a evolução das barras entre os instantes finais e iniciais na grande maioria dos ensaios.

**Palavras chave:** Batimetria, Batedor, Ortoretificação de imagem, Relação de dispersão, *Timestack*, *Wavelets*.

## ABSTRACT

In this dissertation it is proposed to verify the reliability of a methodology used for the determination of bathymetry near seaports, by capturing images, used to determine the bathymetry near maritime ports through the capture of images of the sea surface using a video camera, to be applied to a channel in a laboratory where small-scale experiments are carried out. This technology is important in stormy conditions when is difficult to analyze bathymetric changes at ports entrance channels, using traditional methodologies that depend on access by sea, which are unable to carry out surveys on stormy days. This technology, providing bathymetric estimates in a cheaper and faster way, However, its reliability has not been verified, which is the purpose of this dissertation.

In this work, sequential images of regular wave propagation generated in a laboratory channel are captured at a reduced scale, with fixed and changed bottom, and subsequently treated by an orthorectification process. A MATLAB language program is used which, through the surface wave pattern, detects the wavelengths and wave periods. With the knowledge of these characteristics, the depths along the channel are estimated through the dispersion relation.

Tests were carried out with different wave characteristics (wave heights and periods) and were accommodated in configurations with a fixed and changed bottom. For tests with a fixed bottom, it was found that the best results obtained in the tests were for the shortest periods and highest wave heights tested. Given the small dimensions of the channel, for longer periods the number of crests observed in an image was reduced, leading to a reduction in the quality of the results. Small wave heights had poor distinction between pixels in the various wave phases.

For tests with a changed bottom, the analysis of images was based on the determination of the instantaneous celerity reproduced by the coordinates of the wave crests in the time-stacks, to determine the bathymetry along the channel. The obtained results, in general, did not effectively reproduce the geometry of the real bottom, but allowed to qualitatively follow the evolution of the bars between the final and initial instants in the vast majority of tests.

**Keywords:** Bathymetry, Dispersion relation, Image orthorectification, Timestack, Wave Maker, Wavelets.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto e motivação .....	1
1.2	Objetivos e abordagem .....	2
1.3	Metodologia.....	2
1.4	Organização do documento .....	3
<b>2</b>	<b>DETEÇÃO DA BATIMETRIA UTILIZANDO IMAGENS DE VÍDEO .....</b>	<b>5</b>
2.1	Considerações gerais.....	5
2.2	Metodologia.....	6
2.3	Teoria de ondas .....	9
2.4	Utilização das <i>wavelets</i> para detecção da batimetria .....	10
2.5	Ortorretificação de imagem.....	12
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE ENSAIO.....</b>	<b>19</b>
3.1	Descrição da instalação e materiais .....	19
3.2	Preparação e desenvolvimento dos ensaios.....	21
3.3	Ensaios realizados .....	23
<b>4</b>	<b>ENSAIOS COM FUNDO FIXO E MÓVEL .....</b>	<b>25</b>
4.1	Correção de imagens.....	26
4.2	Metodologias adotadas.....	36
4.2.1	Metodologia adotada por Santos <i>et al.</i> (2022b).....	36
4.2.2	Metodologia alternativa.....	40

4.3	Estudo de sensibilidade à luz .....	46
4.3.1	Ausência de luz natural e artificial tipo 1 .....	46
4.3.2	Ausência de luz natural e artificial tipo 2 .....	48
4.3.3	Presença de luz natural .....	51
4.3.4	Presença de luz artificial .....	53
4.3.5	Presença de luz natural e artificial .....	56
4.3.6	Súmula dos resultados obtidos .....	58
4.4	Ensaio de fundo fixo .....	60
4.4.1	Influência do período de onda .....	60
4.4.2	Influência da profundidade .....	76
4.4.3	Influência da altura de onda .....	95
4.5	Ensaio de fundo móvel .....	105
4.5.1	Perfil plano horizontal .....	105
4.5.2	Perfil com barra .....	106
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>125</b>
5.1	Conclusões .....	125
5.2	Desenvolvimentos futuros .....	127
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>129</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>131</b>
	Anexo 1 - Planeamento dos ensaios .....	133
	Anexo 2 - Ensaio realizado em 25 de outubro .....	135
	Anexo 3 - Ensaio realizado em 11 de novembro .....	136
	Anexo 4 - Ensaio realizado em 15 de novembro .....	137
	Anexo 5 - Ensaio realizado em 15 de novembro .....	138
	Anexo 6 - Ensaio realizado em 17, 18 e 24 de novembro .....	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema da localização espacial da câmara relativamente à zona de estudo de Santos <i>et al.</i> (2022b) ao largo do Porto da Figueira da Foz.....	7
Figura 2.2- <i>Timestack</i> gerada para o perfil indicado na Figura 2.1, para um tempo de gravação de 10 minutos.....	8
Figura 2.3- Sinal ao longo do tempo (a), espectro obtido pela transformada de <i>Fourier</i> (b) e espectro obtido pela transformada de <i>wavelet</i> (c) (Santos <i>et al.</i> , 2020).....	12
Figura 2.4- Esquema do processo de ortorretificação, adaptado de Lippmann e Holman (1989). .....	13
Figura 2.5- Caso de estudo da praia do Norte (Nazaré).....	14
Figura 2.6- Variação dos erros de localização de 30 pontos com a distância à câmara, na direção paralela e transversal à costa (Taborda & Silva, 2012).....	15
Figura 2.7- Definição da região da imagem a retificar (Loomis, 2015).....	16
Figura 2.8- Imagem retificada e limitação da zona pretendida (Loomis, 2015).....	17
Figura 2.9- Diferença de tons de cor indicado pelo código <i>RGB</i> para o mesmo pixel.....	17
Figura 3.1- Piso intermédio do Laboratório de Hidráulica Professor Armando Lencastre e disposição dos equipamentos de ensaio.....	19
Figura 3.2- Canal de laboratório, durante ensaios de (A) fundo fixo e (B) fundo móvel.....	21
Figura 3.3- Elementos do gerador de ondas no canal.....	21
Figura 4.1- Fases da ortorretificação de imagem pelo "planar2".....	27
Figura 4.2- Exemplo de coordenadas dos pontos de controlo.....	27
Figura 4.3- Exemplo de <i>timestack</i> .....	28
Figura 4.4- Primeiro problema detetado na correção de imagem.....	29
Figura 4.5- Correção da orientação do canal nos <i>frames</i> após ortorretificação.....	30
Figura 4.6- Problema de resolução de imagem após ortorretificação.....	31

Figura 4.7- Variação da resolução de imagem associada à ortorretificação de imagem. ....	32
Figura 4.8- Verificação da geometria do quadrilátero utilizado na metodologia de ortorretificação. ....	33
Figura 4.9- Comparação entre <i>timestacks</i> com durações de ensaio distintas. ....	34
Figura 4.10- Comparação entre dois formatos de imagem para a mesma <i>timestack</i> . ....	35
Figura 4.11- Exemplo de coloração da <i>timestack</i> : (A) original; e (B) uniformizada. ....	37
Figura 4.12- Exemplo de uniformização do sinal (no tempo), para a <i>timestack</i> da Figura 4.11 na posição 1500 mm da extensão do canal. ....	38
Figura 4.13- Exemplo de resultado de $z$ para um ensaio com fundo fixo. ....	39
Figura 4.14- Exemplo de resultados: (A) dos valores de $T$ ; e (B) dos valores de $\lambda$ , para um ensaio de fundo fixo. ....	40
Figura 4.15- Exemplos de uma <i>timestack</i> : (A) completa; (B) para um intervalo de tempo mais reduzido; e (C) uniformizada de um ensaio de fundo móvel. ....	43
Figura 4.16- Exemplo de determinação das cristas das ondas (A) da <i>timestack</i> , (B) sem perturbações e (C) com a propagação visível do início ao fim da zona em análise. ....	44
Figura 4.17- Exemplos de uma linha de tendência: (A) de todas as trajetórias das cristas; e (B) regularizada com uma linha mediana para um intervalo de 500 mm. ....	45
Figura 4.18- Exemplo de resultado de $z$ para um ensaio com fundo móvel. ....	45
Figura 4.19- <i>Timestack</i> para o ensaio de ausência de luz natural e artificial tipo 1. ....	47
Figura 4.20- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 1. ....	47
Figura 4.21- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 1. ....	48
Figura 4.22- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 1. ....	48
Figura 4.23- <i>Timestack</i> para o ensaio de ausência de luz natural e artificial tipo 2. ....	49
Figura 4.24- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 2. ....	50
Figura 4.25- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 2. ....	50
Figura 4.26- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 2. ....	51
Figura 4.27- <i>Timestack</i> para o ensaio de presença de luz natural. ....	52

Figura 4.28- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio presença de luz natural.....	52
Figura 4.29- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural.....	53
Figura 4.30- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural.....	53
Figura 4.31- <i>Timestack</i> para a presença de luz artificial.....	54
Figura 4.32- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio presença de luz artificial.....	55
Figura 4.33- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio com presença de luz artificial.....	55
Figura 4.34- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio com presença de luz artificial.....	56
Figura 4.35- <i>Timestack</i> para o ensaio de presença de luz natural e artificial.....	57
Figura 4.36- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio presença de luz natural e artificial.....	57
Figura 4.37- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural e artificial.....	58
Figura 4.38- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural e artificial.....	58
Figura 4.39- <i>Timestack</i> para o ensaio de período de 0,79 s.....	61
Figura 4.40- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de período de 0,79 s.....	61
Figura 4.41- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de período de 0,79 s.....	62
Figura 4.42- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de período de 0,79 s.....	62
Figura 4.43- <i>Timestack</i> para o ensaio de período de 0,88 s.....	63
Figura 4.44- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de período de 0,88 s.....	64
Figura 4.45- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de período de 0,88 s.....	64

Figura 4.46- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de período de 0,88 s. ....	65
Figura 4.47- <i>Timestack</i> para o ensaio de período de 1,00 s. ....	65
Figura 4.48- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,00 s. ....	66
Figura 4.49- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,00 s. ....	67
Figura 4.50- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,00 s. ....	67
Figura 4.51- <i>Timestack</i> para o ensaio de período de 1,13 s. ....	68
Figura 4.52- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,13 s. ....	69
Figura 4.53- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,13 s. ....	69
Figura 4.54- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,13 s. ....	70
Figura 4.55- <i>Timestack</i> para o ensaio de período de 1,29 s. ....	70
Figura 4.56- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,29 s. ....	71
Figura 4.57- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,29 s. ....	72
Figura 4.58- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,29 s. ....	72
Figura 4.59- <i>Timestack</i> para o ensaio de período de 1,79 s. ....	73
Figura 4.60- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,79 s. ....	74
Figura 4.61- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,79 s. ....	74
Figura 4.62- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de período de 1,79 s. ....	75
Figura 4.63- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 15,2 cm. ....	78
Figura 4.64- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 15,2 cm. ....	78

Figura 4.65- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 15,2 cm.....	79
Figura 4.66- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 15,2 cm.....	79
Figura 4.67- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.....	80
Figura 4.68- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.....	80
Figura 4.69- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.....	81
Figura 4.70- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.....	81
Figura 4.71- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.....	82
Figura 4.72- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.....	82
Figura 4.73- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.....	83
Figura 4.74- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.....	84
Figura 4.75- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.....	85
Figura 4.76- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.....	85
Figura 4.77- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.....	86
Figura 4.78- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.....	86
Figura 4.79- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.....	87
Figura 4.80- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.....	88
Figura 4.81- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.....	88
Figura 4.82- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.....	89
Figura 4.83- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 8,9 cm.....	90

Figura 4.84- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 8,9 cm. ....	90
Figura 4.85- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 8,9 cm. ....	91
Figura 4.86- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 8,9 cm. ....	91
Figura 4.87- <i>Timestack</i> para o ensaio de profundidade de 6,8 cm. ....	92
Figura 4.88- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 6,8 cm. ....	92
Figura 4.89- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 6,8 cm. ....	93
Figura 4.90- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio de profundidade de 6,8 cm. ....	93
Figura 4.91- <i>Timestack</i> para o ensaio da altura de onda para uma distância de 1,5 cm ao eixo do disco. ....	96
Figura 4.92- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 1,5 cm. ....	96
Figura 4.93- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 1,5 cm. ....	97
Figura 4.94- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 1,5 cm. ....	97
Figura 4.95- <i>Timestack</i> para o ensaio da altura de onda para uma distância de 2,0 cm ao eixo do disco. ....	98
Figura 4.96- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,0 cm. ....	98
Figura 4.97- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,0 cm. ....	99
Figura 4.98- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,0 cm. ....	99
Figura 4.99- <i>Timestack</i> para o ensaio da altura de onda para uma distância de 2,5 cm ao eixo do disco. ....	100
Figura 4.100- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,5 cm. ....	100

Figura 4.101- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,5 cm.....	101
Figura 4.102- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,5 cm.....	101
Figura 4.103- <i>Timestack</i> para o ensaio da altura de onda para uma distância de 3,0 cm ao eixo do disco.....	102
Figura 4.104- Valores medianos e estimados de $T$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 3,0 cm.....	103
Figura 4.105- Valores medianos e estimados de $\lambda$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 3,0 cm.....	103
Figura 4.106- Valores medianos e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 3,0 cm.....	104
Figura 4.107- Ocorrência de rebentação no ensaio de fundo móvel com perfil plano horizontal. .....	106
Figura 4.108- Geometrias dos perfis de ensaio plano horizontal.....	106
Figura 4.109- Perfil tipo, com barra, para ensaios com fundo móvel.....	107
Figura 4.110- Geometrias dos perfis dos ensaios preliminares com barra.....	108
Figura 4.111- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com $T=1,24$ s, no instante $t=0$ .....	108
Figura 4.112- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio preliminar com $T=1,24$ s, no instante $t=0$ .....	109
Figura 4.113- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com $T=1,24$ s, no instante $t=20$ min.....	109
Figura 4.114- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio preliminar com $T=1,24$ s, no instante $t=20$ min.....	110
Figura 4.115- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com $T=0,87$ s, no instante $t=0$ .....	111
Figura 4.116- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio preliminar com $T=0,87$ s, no instante $t=0$ .....	112
Figura 4.117- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com $T=0,87$ s, no instante $t=10$ min.....	112
Figura 4.118- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio preliminar com $T=0,87$ s, no instante $t=10$ min.....	113

Figura 4.119- Geometrias dos perfis dos ensaios finais com barra.....	114
Figura 4.120- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com $T=1,24$ s, no instante $t=0$ .....	115
Figura 4.121- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio final com $T=1,24$ s, no instante $t=0$ .....	116
Figura 4.122- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com $T=1,24$ s, no instante $t=15$ min.....	116
Figura 4.123- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio final com $T=1,24$ s, no instante $t=15$ min.....	117
Figura 4.124- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com $T=0,75$ s, no instante $t=0$ .....	118
Figura 4.125- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio final com $T=0,75$ s, no instante $t=0$ .....	118
Figura 4.126- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com $T=0,75$ s, no instante $t=10$ min.....	119
Figura 4.127- Valores reais e estimados de $z$ e erro relativo para o ensaio final com $T=0,75$ s, no instante $t=10$ min.....	119
Figura 4.128- Exemplos da presença de reflexo da luz artificial sobre a superfície das ondas. .....	122
Figura 4.129- Diferença de coloração na <i>timestack</i> devido à presença de sedimentos no canal durante os ensaios de fundo móvel.....	123

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1- Síntese dos resultados do estudo de sensibilidade à luz.....	59
Tabela 4.2- Síntese dos resultados do estudo da influência do período da onda.....	76
Tabela 4.3- Síntese dos resultados do estudo da influência da profundidade.....	94
Tabela 4.4- Síntese dos resultados do estudo da influência da altura de onda.....	105
Tabela 4.5- Síntese dos resultados das posições das barras, para o ensaio de fundo móvel (perfil barra fossa). .....	120



## ABREVIATURAS

<b>2D</b>	Espaço bidimensional
<b>3D</b>	Espaço tridimensional
<b>COSMOS</b>	Programa de monitorização da zona costeira de Portugal continental
<b>FCT-UNL</b>	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
<b><i>MATLAB</i></b>	Plataforma de programação e computação numérica
<b><i>RGB</i></b>	Sistema de composição de cores baseado na adição de tons de Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul (Blue) para representar uma tela/ecrã digital



## SÍMBOLOS

<b><i>C</i></b>	Celeridade da onda	[L·T <sup>-1</sup> ]
<b><i>dt</i></b>	Resolução de imagem ao longo da duração do ensaio	[T]
<b><i>dx</i></b>	Resolução de imagem ao longo da extensão do canal	[L]
<b>D</b>	Distância ao eixo de rotação do batedor	[L]
<b><i>g</i></b>	Aceleração gravítica	[L·T <sup>-2</sup> ]
<b><i>h</i></b>	Profundidade	[L]
<b><i>R</i><sup>2</sup></b>	Coefficiente de determinação	
<b><i>T</i></b>	Período da onda	[T]
<b><i>t</i></b>	Instante de análise dos ensaios	[T]
<b><i>x</i></b>	Posição horizontal de uma imagem em análise	[L]
<b><i>y</i></b>	Posição vertical de uma imagem em análise	[L]
<b><i>z</i></b>	Cota com nível de referência (z=0) no fundo do canal	[L]
<b><i>λ</i></b>	Comprimento de onda	[L]
<b><i>λ<sub>o</sub></i></b>	Comprimento de onda para grandes profundidades	[L]
<b><i>Z<sub>c</sub></i></b>	Altura da câmara relativamente à zona de estudo	[L]



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto e motivação

A batimetria é a medição da profundidade dos oceanos, lagos e rios. Sendo representada em cartas batimétricas através de curvas de nível que ligam pontos com a mesma profundidade. Essas curvas são equidistantes verticalmente, tal como acontece com as linhas de nível na topografia (National Geographic Society, s.d.). O seu conhecimento é importante para a navegação de todo o tipo de embarcações em condições de segurança, especialmente em zonas de aproximação à linha costeira, na entrada de rios e portos, onde a profundidade pode ser bastante pequena e a sua monitorização necessária.

Atualmente, o Instituto Hidrográfico tem realizado levantamentos batimétricos em Portugal, utilizando sistemas com sondadores acústicos de feixe simples ou multifeixe ou ainda através de sistemas interferométricos (Instituto Hidrográfico, 2018). Estes métodos acústicos apresentam uma precisão muito elevada, mas são relativamente caros e difíceis de operar em águas pouco profundas. Além disso, é necessário que ocorram condições meteorológicas e de agitação favoráveis para se efetuar esse tipo de levantamentos, pelo que a monitorização não é feita regularmente. Isso pode constituir um sério constrangimento quando há variações da morfologia em curtos períodos de tempo, comprometendo a monitorização da profundidade necessário para a gestão de sedimentos e intervenções de dragagem. Assim, recentemente, Santos *et al.* (2022b) apresentaram uma tecnologia para a determinação da batimetria que consiste na captação de imagens de vídeo e que, a partir do padrão exibido pelas ondas à superfície, permite inferir as profundidades. Em particular, com base na informação obtida das características das ondas que compõe o estado de mar, *i.e.*, os seus períodos e respetivos comprimentos de onda, estima-se a profundidade através da relação de dispersão.

A obtenção de períodos e comprimentos de onda é efetuada a partir da análise das imagens vídeo com recurso à transformada de ondas (wavelets). As wavelets consistem em discretizar um sinal em vários sectores e analisá-los separadamente de forma a obter a frequência ao longo do tempo, permitindo perceber *quando* e *onde* é que as diferentes frequências ocorrem (Santos *et al.*, 2022b).

Desta forma, este sistema de captação de imagens de vídeo permite a substituição de sistemas acústicos ou de outros métodos de medição, sobretudo, em casos em que os levantamentos a partir destes não podem ser efetuados como, por exemplo, em períodos de temporal, onde a navegabilidade é, muitas vezes, interdita nas proximidades de zonas portuárias. Trata-se de uma técnica de deteção remota, capaz de cobrir grandes áreas ou zonas remotas de difícil acesso, que se torna vantajosa face às técnicas tradicionais que se apresentam relativamente dispendiosas e demoradas. A metodologia proposta foi aplicada a dados de campo, não tendo sido aplicada até agora a ensaios em laboratório, a escala reduzida. Este tipo de medições é especialmente interessante em canais que possam contemplar perfis transversais com fundo móvel, que se vão alterando ao longo do ensaio.

## 1.2 Objetivos e abordagem

O objetivo desta dissertação é a estimação da batimetria num canal de ondas com base em imagens de vídeo. Neste trabalho pretende-se seguir a metodologia proposta em Santos *et al.* (2022b), agora aplicada a um canal de laboratório, verificando a sua aplicabilidade nestas condições.

Assim, esta metodologia é aplicada a ensaios num pequeno canal de ondas regulares do Laboratório de Hidráulica Prof. Armando Lencastre da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. São analisadas imagens onde se variaram as condições de agitação (regular), os níveis de água e as formas de fundo. Os resultados são analisados e discutidos, estimando-se o erro associado às medições para as diferentes condições de ensaio.

## 1.3 Metodologia

Neste trabalho, começou-se por estabelecer as condições de gravação dos ensaios, tentando aproximá-las às condições de gravação em campo (câmara oblíqua ao canal). De seguida, para corrigir a obliquidade das imagens de vídeo estas são ortorretificadas, permitindo estudar as ondas do canal através da fotogrametria das imagens tratadas. Posteriormente,

estabeleceram-se os ensaios a realizar de acordo com o planeamento de ensaios, dando início à realização dos ensaios de laboratório, onde se fizeram variar as características das ondas para geometrias de fundo fixo e móvel no canal para uma agitação regular de ondas. Finalmente, as gravações de ensaio são analisadas e com base no padrão das ondas aí obtido, estima-se a batimetria e compara-se com a esperada.

## 1.4 Organização do documento

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo corresponde à parte introdutória do tema, onde se explica o contexto e objetivos concretos da metodologia abordada neste trabalho.

No segundo capítulo é exposta a componente teórica associada a essa metodologia e meramente explicativa dos conceitos a ter em conta na sua aplicação.

No terceiro capítulo pretende-se dar a conhecer ao leitor em que condições foi realizado este trabalho, o desenvolvimento da metodologia e problemáticas abordadas no desenrolar do trabalho.

No quarto capítulo abordam-se os resultados obtidos e as metodologias utilizadas nas fases de desenvolvimento deste trabalho quer na captação de imagem, quer para todos os ensaios de laboratório realizados. Os resultados obtidos são de seguida alvo de discussão.

Finalmente, no quinto apresentam-se as conclusões oportunas relativamente aos resultados obtidos e apurados alguns aspetos a melhorar nesta metodologia em desenvolvimentos futuros.



# DETEÇÃO DA BATIMETRIA UTILIZANDO IMAGENS DE VÍDEO

## 2.1 Considerações gerais

As zonas costeiras, em especial aquelas onde ocorre o transporte de grandes volumes de sedimentos, estão sujeitas a alterações significativas da morfologia do fundo em épocas de temporal. São as condições de mar adversas que tornam a monitorização da batimetria *in situ* desses locais, com recurso às metodologias convencionais, uma tarefa difícil para garantir condições de navegabilidade em segurança. Na presença desta problemática, a deteção da batimetria efetuada de forma remota surge como solução alternativa face às técnicas tradicionais que não podem operar sob condições meteorológicas adversas e com ondas desfavoráveis (*i.e.*, energéticas).

Em Santos *et al.* (2022b), salienta-se a distinção entre dois tipos de abordagem na deteção da batimetria remotamente com base em imagens para zonas de pequena profundidade. A primeira diz respeito à interação do fundo marinho com a transferência de radiação da luz para a água, requerendo águas praticamente transparentes, ou seja, com pouca turbidez. A segunda baseia-se em métodos que utilizam as características das ondas de superfície para estimar a profundidade local, sendo esta a tecnologia a que se dará continuidade neste estudo.

Salienta-se que, na deteção remota a partir de imagens, a batimetria é estimada, contrariamente ao que acontece nas metodologias tradicionais em que a profundidade é medida diretamente. A utilização de imagens demonstra, por isso, ter um melhor custo-benefício em zonas remotas e de larga escala, apesar de se reconhecer que a precisão dos resultados possa ser inferior (Santos *et al.*, 2022b).

Dentro da detecção remota a partir de imagem, é possível efetuar análises com recurso a imagens de vídeo ou de satélite. Neste texto, é dada uma maior importância à determinação da batimetria por via remota com recurso a imagens de vídeo, por demonstrar ser bastante vantajosa face às imagens de satélite (Santos *et al.*, 2022b), quando se pretende analisar áreas menores e que, portanto, requerem maior precisão de imagem. De facto, uma das razões prende-se com o nível de detalhe de uma imagem de satélite. De uma forma geral, este é bastante inferior ao das imagens de vídeo, sendo habitualmente de ordem superior a uma dezena de metro. Por essa razão, a localização de fundos com variações espaciais inferiores à resolução de imagem tem implicações na obtenção de bons resultados (Santos *et al.*, 2022b). O mesmo acontece quando as alterações do fundo ocorrem em curtos espaços de tempo.

Ainda, as imagens de vídeo possibilitam a utilização de várias imagens sequenciais, ao invés de uma única imagem da agitação marítima (com acesso a imagens de satélite), como utilizado em Santos *et al.* (2022a). A sequência de várias imagens captadas com maior frequência de aquisição que a dos períodos de ondas permite, em tempo real e durante longos períodos de tempo, identificar a evolução/propagação de onda de diferentes períodos ao longo do tempo de ensaio, melhorando a estimativa da profundidade (Santos *et al.*, 2022b).

## 2.2 Metodologia

Este estudo tem como ponto de partida a aquisição das imagens de vídeo. Nesta fase, existe a possibilidade de utilizar qualquer tipo de câmara, sem restrições relativamente à ótica da câmara ou à resolução da imagem, otimizando custos sobre a instalação e a portabilidade do equipamento (Taborda & Silva, 2012). A única implicação técnica a salientar, na aquisição de imagem, tem que ver com a necessidade de capturar imagens a partir de uma zona elevada relativamente à zona de estudo, com um bom campo de visão sobre esta.

A fase que se segue à aquisição de imagem é o tratamento de imagem, que engloba três passos: calibração da câmara; correção de imagem; e retificação de imagem (Taborda & Silva, 2012). Os primeiros dois passos têm como função eliminar as distorções provocadas pela curvatura das lentes e o último passo transforma as imagens adquiridas (obíquas à zona de estudo) em imagens projetadas num plano horizontal (Santos *et al.*, 2022b). Estes passos repetem-se para toda a sequência de imagens do vídeo (*frames*).

Após o tratamento das imagens, é criada uma imagem denominada por *timestack*, típica em estudos de monitorização de zonas costeiras com imagens de vídeo (Andriolo, 2019), que representa a junção de pixels, de uma linha espacial particular, obtidos a partir de cada *frame*.

Essa linha de pixels localiza-se, na imagem retificada, sobre o perfil que se pretende estudar. A título de exemplo, a Figura 2.1 ilustra a posição dessa linha no caso de estudo de Santos *et al.* (2022b). Esta assinala um comprimento de 600 m na embocadura do rio Mondego, imediatamente em frente ao Porto da Figueira da Foz. A *timestack* correspondente encontra-se na Figura 2.2, mostrando a evolução da imagem em toda a extensão do perfil ao longo da duração da gravação que neste caso foi de 10 minutos (600 segundos). Resumidamente, cada *frame* na *timestack* corresponde a uma linha horizontal e a acumulação dessas linhas na vertical (*i.e.*, ao longo do tempo) evidencia um padrão do que foi gravado na superfície do mar. As dimensões da *timestack* dependem da resolução temporal e espacial ( $dt$  e  $dx$  respetivamente) de cada pixel ao longo perfil indicado na Figura 2.1.

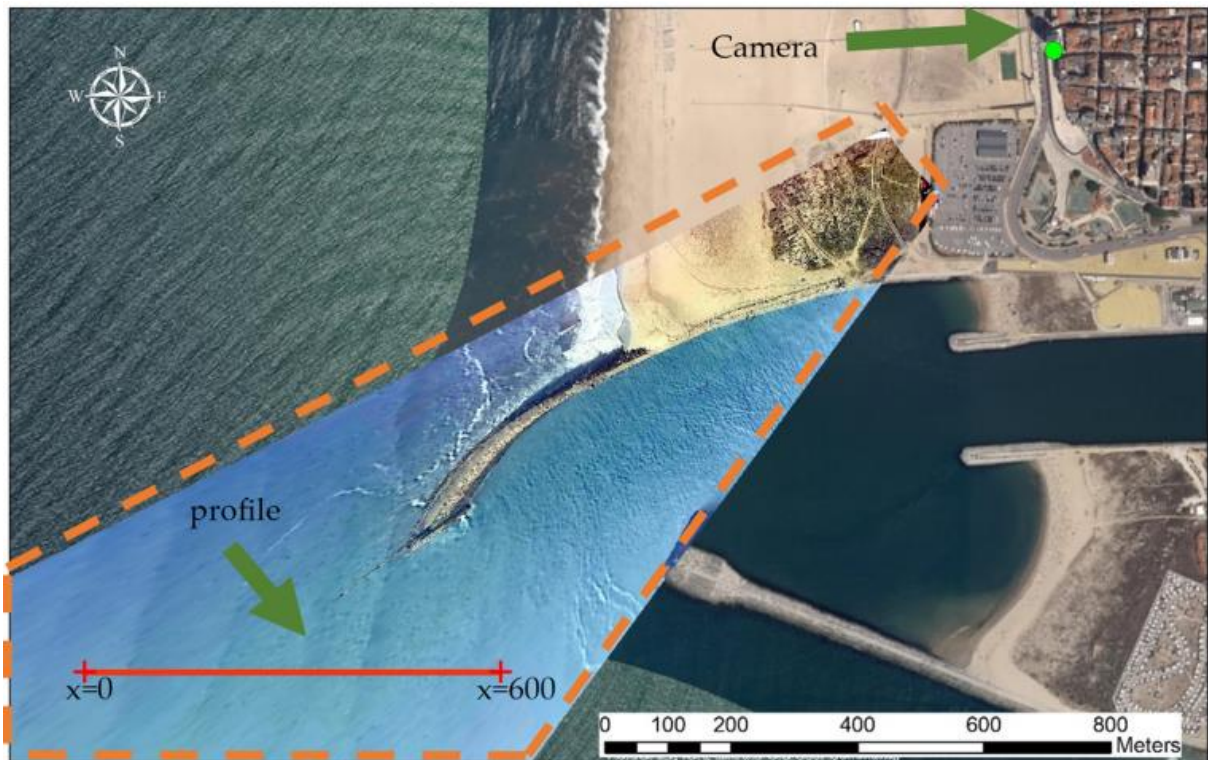


Figura 2.1- Esquema da localização espacial da câmara relativamente à zona de estudo de Santos *et al.* (2022b) ao largo do Porto da Figueira da Foz.

A localização da câmara está representada pelo ponto verde e o perfil de estudo pela linha vermelha. A linha laranja, a traço interrompido, representa a área que cobre a imagem de vídeo pós tratamento e ortorretificação de imagem sobre a zona de estudo. Imagem de Santos *et al.*, 2022b.

Nas *timestacks* as intensidades dos valores de cada pixel passam a comportar-se como sinais da agitação observada e estes sinais permitem detetar, através de uma análise espectral utilizando *wavelets*, as características das ondas tais como o comprimento de onda  $\lambda$  (ao longo de uma linha para um determinado instante  $t$ ) e o período da onda  $T$  (para cada posição  $x$  do

perfil analisado) (Santos *et al.*, 2022b). No fundo, a trajetória de cada crista representa a celeridade  $C$  da onda durante o tempo de observação para a zona em análise.

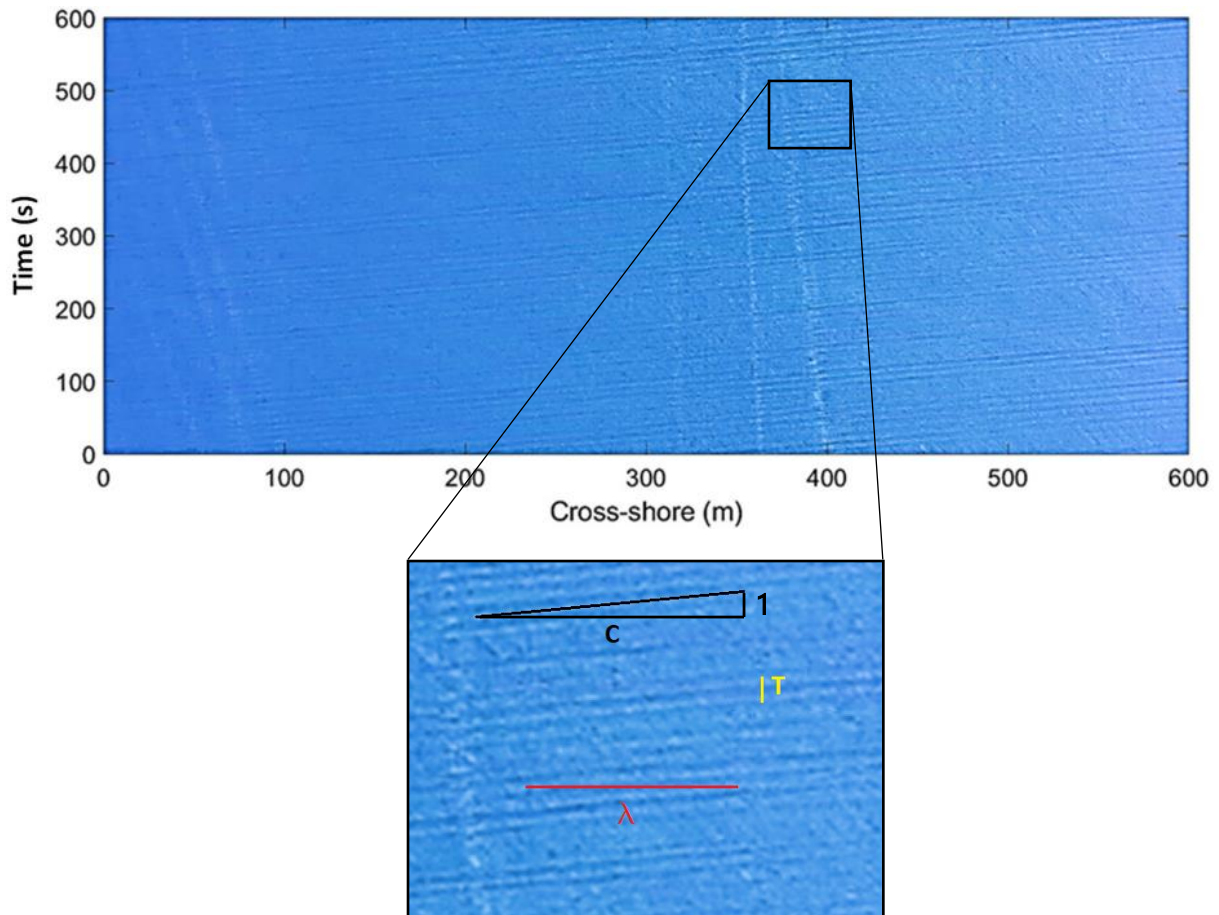


Figura 2.2- *Timestack* gerada para o perfil indicado na Figura 2.1, para um tempo de gravação de 10 minutos. Aqui,  $C$  representa a celeridade da crista,  $\lambda$  a distância entre duas cristas (comprimento de onda) e  $T$  a distância temporal entre duas cristas (período da onda). Adaptado de Santos *et al.*, 2022b.

Posteriormente, para cada instante de tempo,  $t$ , é possível estimar a profundidade,  $h$ , utilizando a relação de dispersão. A profundidade de um ponto específico do perfil corresponde à mediana de todos os valores de  $h$  obtidos durante todo o tempo de análise para a mesma posição do perfil. A mediana é aqui utilizada como ferramenta estatística, para remover valores anómalos ou fora da ordem de grandeza dos resultados obtidos (Santos *et al.*, 2022b).

A batimetria obtida é validada com a batimetria real, permitindo avaliar a eficácia desta tecnologia perante zonas costeiras de pequena profundidade.

## 2.3 Teoria de ondas

A teoria de ondas de Airy (ou teoria linear de ondas) é a teoria mais simples presente na literatura (Coastal Engineering Manual, 2015). Esta teoria é extensamente utilizada na resolução de problemas de engenharia, por ser de simples utilização e pelo facto de que as estimativas das características das ondas fornecem resultados aceitáveis em alguns casos. A aplicabilidade desta teoria é assegurada caso as premissas desta teoria não sejam "grosseiramente violadas". E essas premissas são:

- O fluido é homogéneo e incompressível;
- A tensão superficial pode ser desprezada;
- O efeito de *Coriolis* devido à rotação da terra pode ser desprezado;
- A pressão aplicada à superfície livre é uniforme e constante;
- O fluido não é viscoso;
- A onda considerada não interage com nenhum outro movimento da água;
- O fundo é horizontal, fixo e impermeável, o que implica que a velocidade vertical no fundo seja nula;
- A amplitude da onda é pequena e a forma da onda é invariável no espaço e no tempo.

De acordo com esta teoria, é possível determinar a propagação de ondas gravíticas (*i.e.*, ondas geradas pelo vento) nas condições enunciadas acima. A relação de dispersão permite relacionar a profundidade da zona de estudo,  $h$ , com o comprimento de onda,  $\lambda$ , sendo dada pela seguinte expressão:

$$h = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{atanh}\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right), \quad (2.1)$$

onde  $\lambda_0$  representa o comprimento de onda para grandes profundidades (*i.e.*, quando o comprimento de onda é pelo menos o dobro da profundidade nesse local) que depende do período da onda,  $T$ , e da aceleração gravítica,  $g$ :

$$\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}. \quad (2.2)$$

Contudo, a Eq. (2.1) pode também ser escrita em função da celeridade da onda  $C$  (velocidade com que a onda se propaga) que corresponde ao quociente  $\lambda/T$ . Esta é dada pela seguinte expressão:

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}. \quad (2.3)$$

No entanto, na presença de pequenas profundidades (*i.e.*, quando  $\lambda$  é pelo menos vinte vezes superior a  $h$ ),  $\tanh(2\pi h/\lambda) \approx 2\pi h/\lambda$  e a Eq. (2.3) pode ser simplificada para:

$$C = \sqrt{gh}, \quad (2.4)$$

onde o valor de  $h$  passa a depender unicamente da celeridade  $h = C^2/g$ , pois a aceleração gravítica é constante.

As imagens de vídeo recolhidas durante os ensaios são processadas com recurso a uma análise espectral com *wavelets*, onde as características da agitação, tais como  $T$  e  $\lambda$  ao longo da sua propagação, são calculadas para posteriormente se determinar a batimetria por via da Eq. (2.1) ou Eq.(2.4).

## 2.4 Utilização das *wavelets* para deteção da batimetria

A aplicação da transformada de *wavelet* na geofísica teve origem na década de 1980 para a análise de sinais sísmicos (Kumar & Foufoula-Georgiou, 1994). Atualmente existem diversas aplicações na análise de processos geofísicos tais como turbulência atmosférica, precipitação, ondas marítimas provocadas pelo vento, batimetria do fundo do mar, estruturas geológicas em camadas, alterações climáticas, entre outros (Kumar & Foufoula-Georgiou, 1994). É ainda extensivamente aplicada nas ciências e engenharias.

No contexto da hidráulica marítima, a utilização de análises espectrais surgiu como ferramenta para perceber e caracterizar o comportamento de ondas geradas pelo vento. A análise espectral de imagens de vídeo utilizando *wavelets* demonstrou ser uma ferramenta bastante útil na determinação da batimetria em ambientes marinhos de profundidade intermédia e pequena (Santos *et al.*, 2022b).

A transformada de *wavelet*, é uma técnica de análise espectral que permite desconstruir um sinal e analisar separadamente todos esses troços no seu domínio. Neste sentido, é possível representar um sinal em simultâneo no espaço (tempo) e em frequência, permitindo saber exatamente *quando* ou *onde* cada frequência ocorre (Santos *et al.*, 2020).

A transformada de *wavelet* de um sinal é uma transformação integral que tem implícita uma família de funções (núcleo da transformada) denominadas por *wavelets*. Essa família de funções é obtida através de mudanças de forma de uma função base (*wavelet* mãe). A alteração

da forma da função base permite estudar as características do sinal com um nível de detalhe adequado à sua escala, ou seja, dilatando ou contraindo a função para sinais com variações mais ou menos amplas ao longo do tempo, respetivamente. Já a escolha da função base, determina o tipo de informação que pode ser obtida de um sinal (Kumar & Foufoula-Georgiou, 1994), *i.e.*, a função base descreve melhor ou pior um sinal consoante a sua natureza.

Existem bastantes funções utilizadas como *wavelets*, dada a flexibilidade que existe na sua escolha (Kumar & Foufoula-Georgiou, 1994). No entanto, para uma função ser considerada uma *wavelet* mãe esta tem de satisfazer essencialmente estas duas propriedades:

- Ter uma média nula para respeitar a condição de admissibilidade, garantindo que de algum modo a função oscila, comportando-se como uma onda;
- Ter uma boa localização no tempo e na frequência através de um decaimento suficientemente rápido, garantindo que a função não se comporte como uma onda regular no seu domínio.

Estas duas propriedades justificam o facto pelo qual essas funções têm o nome de *wavelets* (onduletas) (Kumar & Foufoula-Georgiou, 1994; Soares, 1997).

Como se explicou anteriormente, existem vários tipos de *wavelets*. Uma vez que o algoritmo utilizado neste trabalho segue o utilizado em Santos *et al.* (2022b), neste estudo a *wavelet* utilizada para a análise espectral será a denominada por *Morlet*. Esta escolha parece ser adequada na medida em que, segundo Kumar e Foufoula-Georgiou (1994), esta *wavelet* é bastante utilizada na análise de processos geofísicos.

Inicialmente, no contexto da deteção da batimetria, a análise espectral com recurso à transformada rápida de *Fourier* era frequentemente utilizada na deteção do comprimento de onda e direção das ondas junto à costa (Santos *et al.*, 2020). No entanto, esta metodologia apresenta algumas limitações (Santos *et al.*, 2020), pelo que as *wavelets* surgiram como alternativa.

Neste estudo, as *wavelets* são utilizadas na determinação das características da agitação, tais como o comprimento de onda e o seu período (Santos *et al.*, 2022a), permitindo, através destes parâmetros, estimar a batimetria de zonas costeiras. Santos *et al.* (2020), considera que o uso das transformadas de *wavelets* é preferível à análise com transformada de *Fourier*. A principal vantagem apontada está relacionada com a segunda propriedade das *wavelets*, apresentada anteriormente: as *wavelets* permitem estudar as características do sinal localmente, com uma função ajustada às variações do sinal (Soares, 1997), enquanto a transformada de *Fourier* representa o sinal através da soma de funções seno e cosseno com amplitudes e fases específicas, constantes em todo o seu domínio (Santos *et al.*, 2020). Consequentemente, com

as transformadas de *Fourier*, é possível decompor um sinal apenas em termos de frequência, sendo possível determinar comprimentos de onda presentes no sinal, mas não mostrando como variam ao longo do tempo. Em Santos *et al.* (2020), encontra-se um bom exemplo que demonstra esta vantagem das *wavelets* em relação às transformadas de *Fourier*.

O exemplo é apresentado na Figura 2.3, onde um sinal é representado pela soma de duas funções seno com amplitudes iguais e períodos bastante próximos ( $T = 5$  s e  $T = 5.2$  s). No entanto como se pode observar a transformada de *Fourier* só consegue identificar a frequência de cada uma das ondas. Enquanto utilizando as *wavelets*, neste caso a *wavelet Morlet*, é possível perceber a variação das frequências que caracterizam a onda de grupo ao longo do tempo.

Esta propriedade das *wavelets* permite também a análise de sinais não lineares e não estacionários, muitas vezes presentes na propagação de ondas para ambientes marinhos de intermédias e pequenas profundidades (Santos *et al.*, 2020).

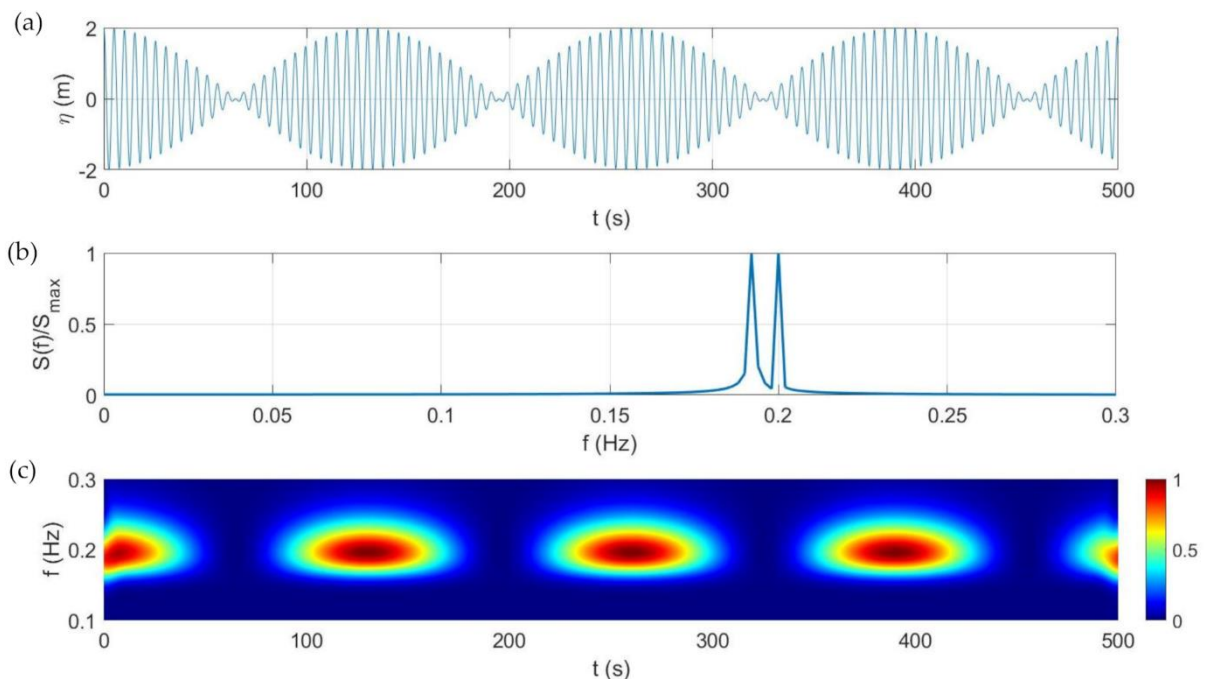


Figura 2.3- Sinal ao longo do tempo (a), espectro obtido pela transformada de *Fourier* (b) e espectro obtido pela transformada de *wavelet* (c) (Santos *et al.*, 2020).

## 2.5 Ortorretificação de imagem

A ortorretificação de imagem consiste na transformação de imagens oblíquas em imagens planificadas, livres de deformações criadas pela inclinação da máquina relativamente ao plano de projeção (Taborda & Silva, 2012). A ortorretificação de imagem permite a correta

extração das dimensões e posição dos objetos contidos numa imagem (fotogrametria) sempre que exista essa obliquidade.

A ortorretificação de uma imagem tem por base a relação geométrica de colinearidade entre as coordenadas da zona de estudo, as coordenadas da imagem e o centro de projeção (câmara) (Taborda & Silva, 2012). Estes pontos, ao estarem contidos na mesma reta, tornam irresoluto o processo de transformação das coordenadas da imagem (2D) em coordenadas reais da zona de estudo (3D) (ortorretificação). No entanto, para a retificação de imagens, neste caso de ondas, este problema é ultrapassado assumindo que a dimensão na vertical está toda ao nível do mar em repouso, como se mostra na Figura 2.4 (*i.e.*, as cristas e cavas das ondas estão à mesma cota). Assim, quaisquer erros de retificação associados à amplitude das ondas tornam-se desprezáveis quando comparados com a altura da câmara ( $Z_c$ ) relativamente ao plano das ondas (*ground plane*) (Lippmann & Holman, 1989).

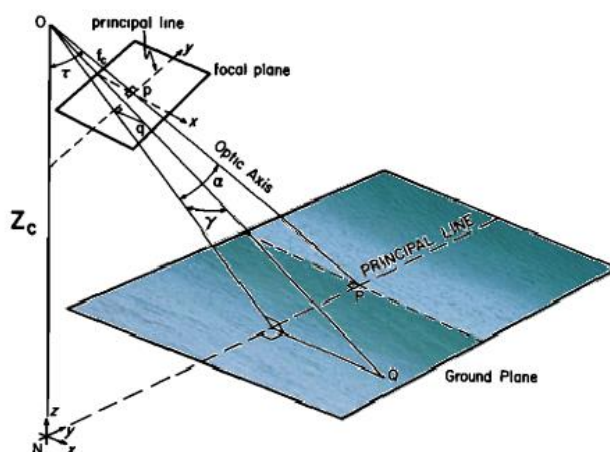


Figura 2.4- Esquema do processo de ortorretificação, adaptado de Lippmann e Holman (1989).

Em alguns casos de estudo que utilizam a ortorretificação de imagem (Taborda & Silva, 2012; Silva et al., 2009; Plant & Holman, 1997), são analisadas zonas de praia com imagens obtidas de uma altura significativamente acima do nível do mar e com a orientação ótica da câmara sensivelmente paralela à linha de costa (ver exemplo de Taborda e Silva (2012) na Figura 2.5-A). Porém, nestes casos, as imagens resultantes da ortorretificação de imagem, mostram uma perda da resolução de imagem relacionada com o afastamento da câmara à zona retificada. Esta condição está relacionada com as dimensões da projeção de cada *pixel* na zona de estudo. Em todos os casos de estudo demonstra-se que, com o aumento da distância à

câmara, a componente da projeção do *pixel* na direção paralela à costa apresenta maiores variações comparativamente à componente transversal à costa (Taborda & Silva, 2012).

Na Figura 2.5-B apresenta-se a imagem resultante da ortorretificação de imagem do programa COSMOS, metodologia utilizada em Santos *et al.* (2022b). Nessa figura, estão representadas com linhas as resoluções dos *pixels* em ambas as direções, nas várias zonas da imagem retificada (*e.g.*, todos os pixels na primeira linha horizontal têm uma dimensão de 15 m segundo *y*, e segundo *x*, a sua dimensão varia entre menos de 1 m até mais de 2 m).

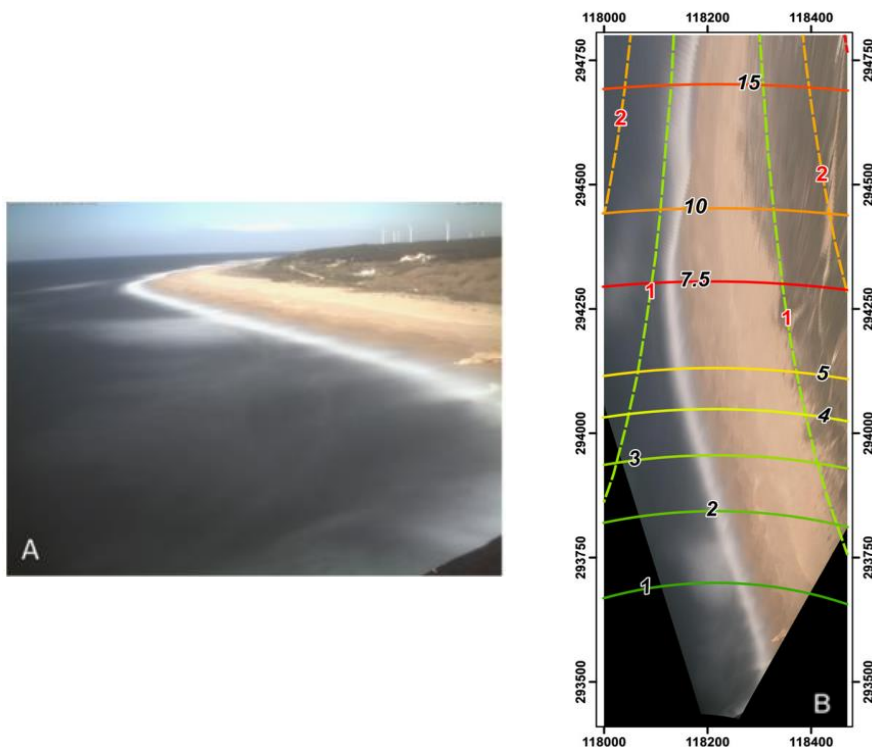


Figura 2.5- Caso de estudo da praia do Norte (Nazaré).

A imagem (A) original; e (B) retificada pelo programa COSMOS: com indicação da resolução dos pixels. Ao longo das linhas a traço contínuo as componentes da resolução ao longo da costa e linhas a traço interrompido as componentes da resolução transversal à costa (Taborda & Silva, 2012).

Neste exemplo, o facto de o aumento da distância à câmara conduzir à perda de resolução de imagem, leva a que se perca também a capacidade/precisão na localização das características da praia e da sua envolvente. Esta condicionante é observável na Figura 2.6, que apresenta a variação do erro de localização de 30 pontos espalhados pela imagem original. Essa figura comprova que o afastamento de um ponto à posição da máquina tem implicações na precisão da localização desse ponto na imagem retificada.

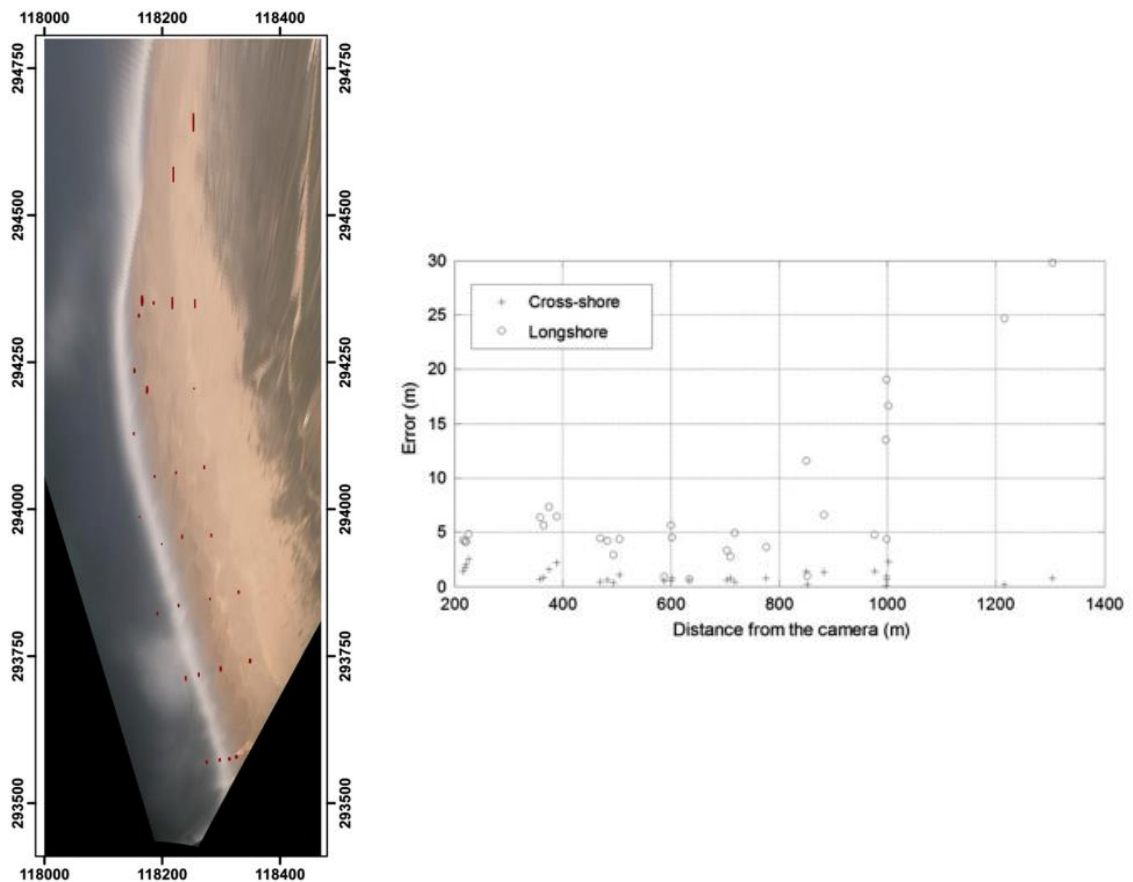


Figura 2.6- Variação dos erros de localização de 30 pontos com a distância à câmara, na direção paralela e transversal à costa (Taborda & Silva, 2012).

Os autores apontam ainda, como razões para este problema: a escolha do tipo de algoritmo e o seu modo de implementação; o tipo de ótica da câmara fotográfica; e estabilidade da orientação da máquina ao longo do tempo (Taborda & Silva, 2012).

Para o presente trabalho utilizou-se o programa "planar2" (Loomis, 2015) em linguagem *MATLAB*, para a transformação de imagens oblíquas ao canal, em imagens ortorretificadas. Este programa, ao contrário do COSMOS, não faz uso das coordenadas espaciais da zona de estudo, mas recorre ao auxílio de um tabuleiro com padrão axadrezado, visível na imagem a retificar, como ferramenta de localização espacial.

Como ponto de partida, define-se um quadrilátero regular dentro dos limites do tabuleiro, com os vértices coincidentes com os vértices do quadriculado (

Figura 2.7). De seguida, as coordenadas dos *pixels* desses vértices e o número de quadrados contidos entre eles são utilizados para definir a resolução de imagem e de seguida gerar a transformação da mesma. A resolução de imagem considerada para este exemplo foi

de 80 *pixels* por cada aresta de 10 mm dos quadrados contidos nesse quadrilátero, o que corresponde a 880 *pixels* de lado da zona vermelha tal como se pode observar na

Figura 2.8. Finalmente, já com a imagem retificada, limita-se a imagem à área de estudo pretendida.

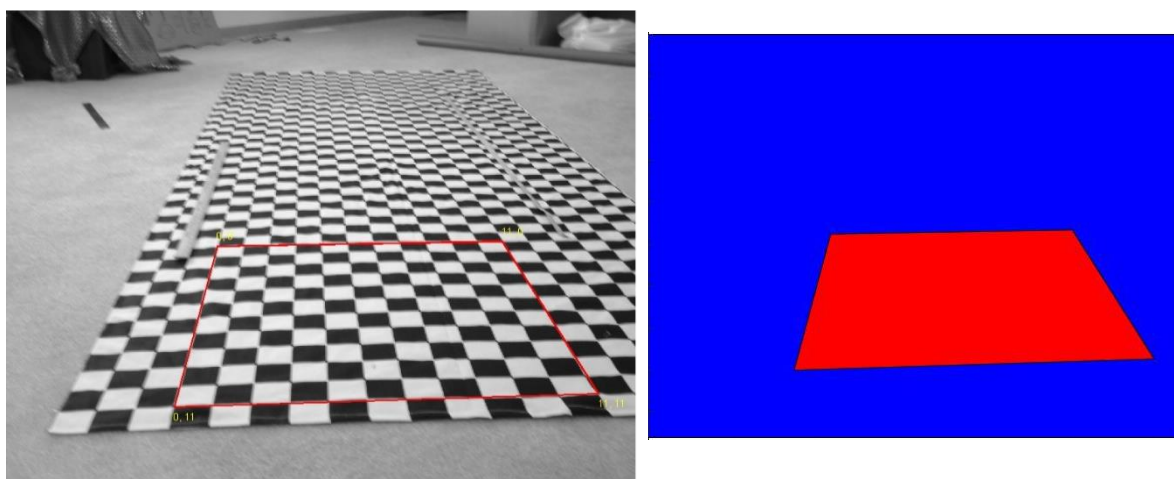


Figura 2.7- Definição da região da imagem a retificar (Loomis, 2015).

Não obstante os ensaios realizados neste estudo serem em laboratório, o que facilita a medição e controlo da posição da máquina fotográfica relativamente ao canal, esta tecnologia demonstra ser bastante expedita na georreferenciação da zona em estudo, quando comparada à apresentada anteriormente.

Relativamente ao tom de cor das imagens utilizadas pelo "planar2", este transforma as imagens a cores (espaço de cores RGB) em imagens de tons de cinza. O código do programa trabalha com imagens de tons de cinza como forma de diminuir o custo computacional que é utilizado para a ortorretificação de imagem, como também o facto de facilitar a programação do mesmo. Na Figura 2.9 demonstram-se as diferenças de tons de cor para um mesmo pixel da imagem original para a utilizada em "planar2". Na imagem a cores o código de cores varia entre 0 a 255, onde 0 representa o tom mais escuro (cor preta) e 255 representa o tom mais claro (cor branca). Já nas imagens a cinza o código de cores varia entre 0 a 1, onde 0 continua a representar a cor preta e 1 representa a cor branca.

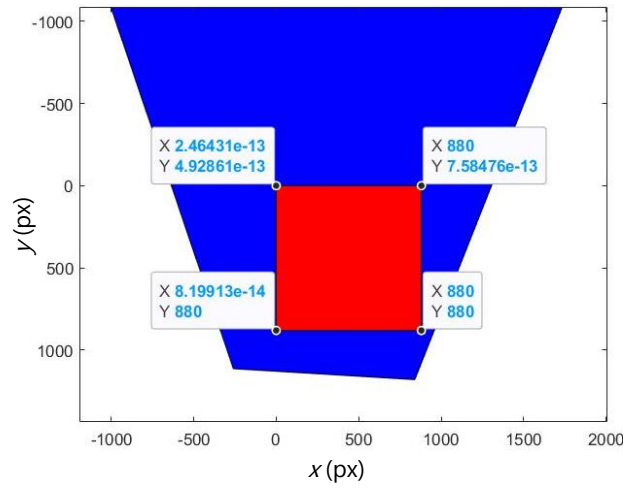
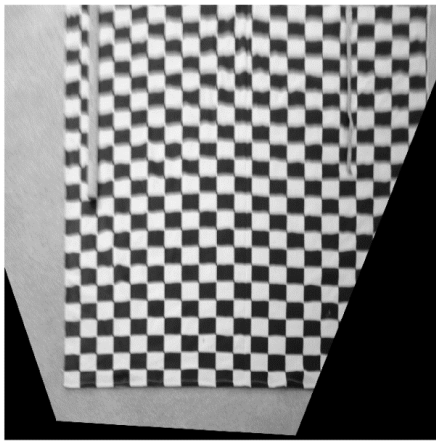
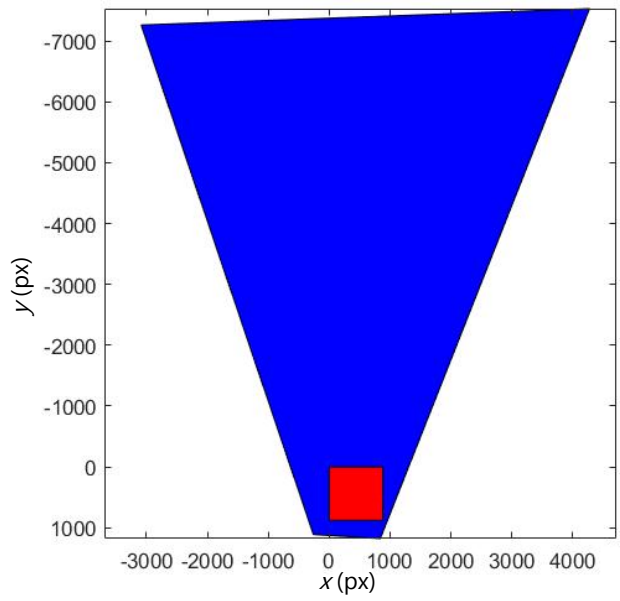
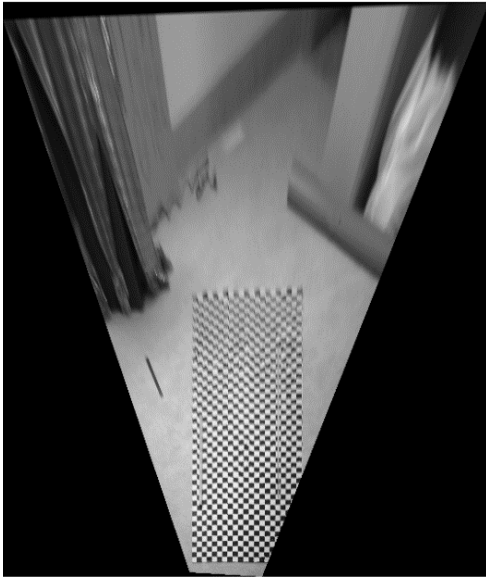


Figura 2.8- Imagem retificada e limitação da zona pretendida (Loomis, 2015).

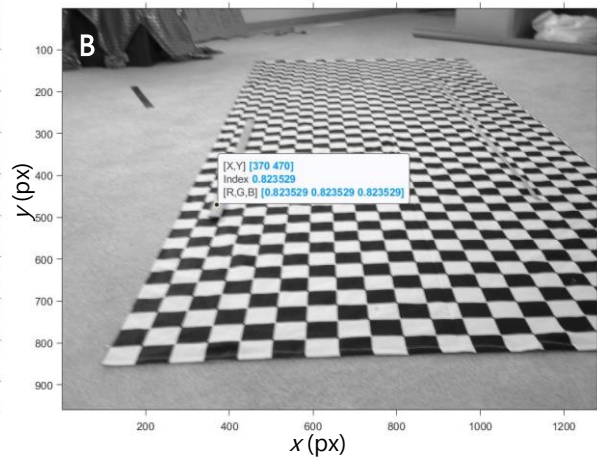
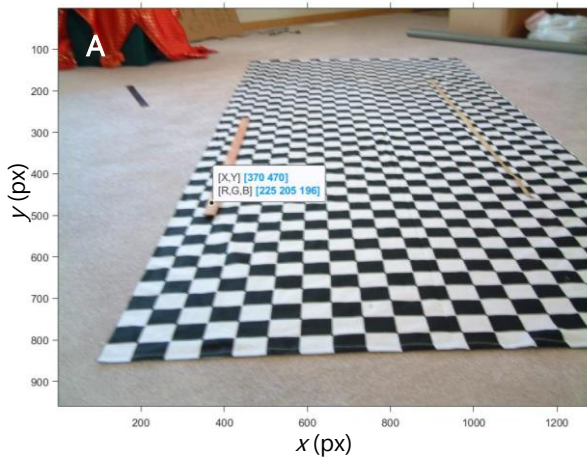


Figura 2.9- Diferença de tons de cor indicado pelo código *RGB* para o mesmo pixel. (A) imagem com tons de cor; (B) imagem com tons de cinza. Adaptado de Loomis (2015).



## METODOLOGIA DE ENSAIO

### 3.1 Descrição da instalação e materiais

Nesta dissertação pretende-se avaliar a fiabilidade de um método anteriormente utilizado na determinação da batimetria em zonas costeiras de forma remota, quando aplicado a um canal de laboratório, ou seja, a escala reduzida.

O canal utilizado encontra-se no laboratório de hidráulica, que se desenvolve ao longo de três pisos do edifício departamental da FCT-UNL. A zona de ensaios teve lugar no piso intermédio (Figura 3.1), num espaço com cerca de 260 m<sup>2</sup> equipado com circuitos internos de água e ar comprimido e com diversos equipamentos hidráulicos (Nova School of Science & Technology, s.d.).

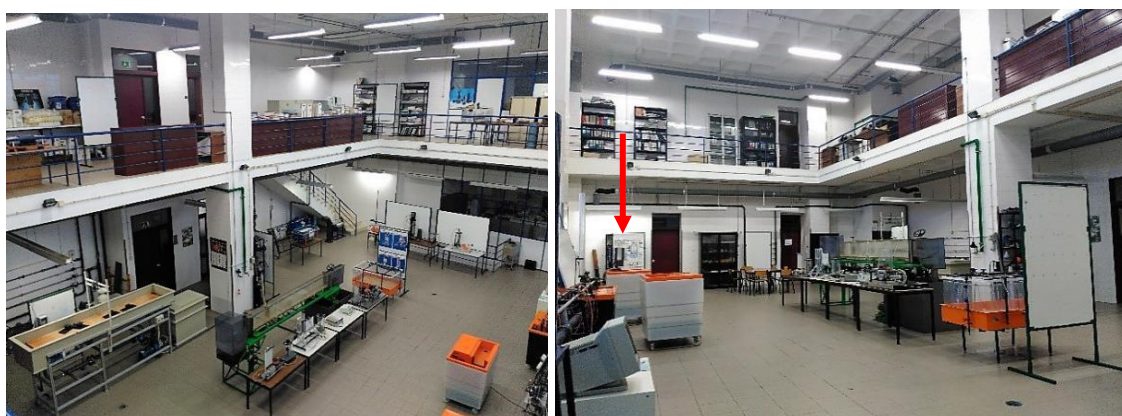


Figura 3.1- Piso intermédio do Laboratório de Hidráulica Professor Armando Lencastre e disposição dos equipamentos de ensaio.

A localização do canal de ensaios está indicada com uma seta a vermelho. Adaptado de Nova School of Science & Technology (s.d.).

A localização do canal no laboratório está evidenciada na Figura 3.1 com uma seta a vermelho. Esta localização permite a incidência de luz natural diretamente sobre o canal, por estar junto à zona dos vãos envidraçados (como se pode ver na Figura 3.2-A). No entanto, estes estão orientados para Este, pelo que no laboratório existe uma certa diferença na intensidade da luz natural ao longo do dia.

Este canal é normalmente utilizado para o estudo de escoamentos com superfície livre, mas tem a possibilidade de instalação de um gerador de ondas regulares, utilizado para a realização deste trabalho.

Ao contrário da utilização do canal para o estudo de escoamentos com superfície livre, onde se criam correntes associadas a regimes permanentes ou variáveis, nestes testes o volume de água é mantido constante no canal durante um ensaio, assegurando uma constância do nível médio da superfície livre. Contudo, cria-se um movimento oscilatório ininterrupto por intermédio de um batedor de ondas colocado numa das extremidades do canal. A água utilizada nos ensaios é armazenada num pequeno reservatório adjacente ao canal e, com um conjunto de uma bomba e uma válvula, é possível regular o nível de água a utilizar nos ensaios. Durante os ensaios, para evitar qualquer tipo de reflexão das ondas, foram colocados nas extremidades do canal dois elementos tipo esponja.

O canal tem o total de cinco metros de comprimento, com uma secção retangular útil de 8,2 por 25 centímetros e, em toda a sua extensão, é constituída por paredes acrílicas de oito milímetros cada, exceto numa das extremidades do canal, onde está instalado o gerador de ondas (Figura 3.2-A). O canal tem ainda a possibilidade de alterar a sua inclinação, mas, nestes ensaios, manteve-se uma posição horizontal.

A zona de filmagem dos ensaios está localizada na extremidade oposta ao batedor, constituída pelo conjunto de tripé mais máquina de filmar sobre duas mesas sobrepostas com um total de aproximadamente 140 centímetros de altura (Figura 3.2).

Para fins de medição do nível de água em cada ensaio, o canal já tinha em cada extremidade régua vertical na escala de milímetros e foi adicionada ainda uma terceira a meio do canal na escala de centímetros. Ao longo do canal existia ainda uma régua, na escala dos milímetros, numa das laterais do canal e foi adicionada uma segunda régua, na escala dos centímetros, no topo de uma das paredes acrílicas para auxiliar as gravações sobre o canal.

O batedor de ondas (Figura 3.3) é movido por um motor elétrico de frequência regulável onde, para uma determinada frequência, são geradas ondas regulares por um movimento horizontal de translação na direção do canal. O batedor está ligado por uma barra metálica aparafusada a um disco com cinco posições, permitindo adaptar para cinco casos possíveis a

amplitude do seu movimento em relação à sua posição inicial, aumentando ou diminuindo a altura das ondas.

Na Figura 3.2-B, pode verificar-se que nos ensaios de fundo móvel se utilizou um sedimento tipo areia. Neste caso, foi utilizada baquelite para simular as condições de fundo de zonas costeiras com fundo sedimentar arenoso. Na extremidade dos perfis de sedimento, foram colocadas duas rampas metálicas para limitar o depósito de sedimentos fora da zona de análise. Evitando também a entrada de sedimentos no circuito da bomba, aquando da evacuação da água após o ensaio.



Figura 3.2- Canal de laboratório, durante ensaios de (A) fundo fixo e (B) fundo móvel.

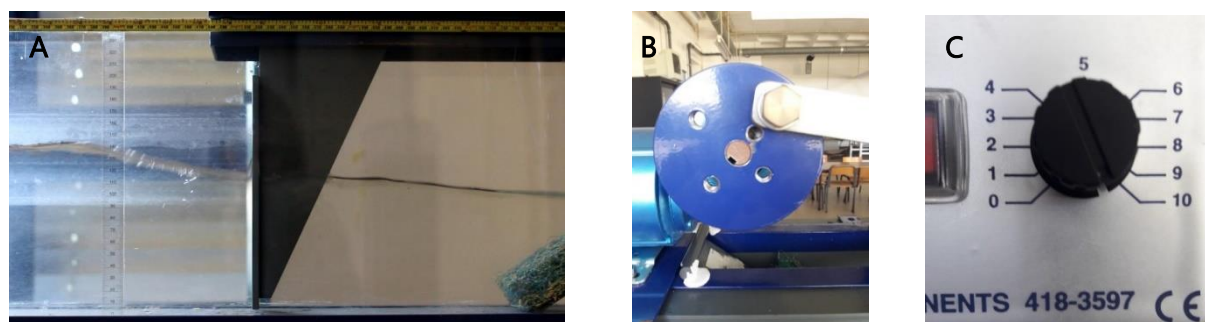


Figura 3.3- Elementos do gerador de ondas no canal.

(A) Batedor; (B) disco com posições ajustáveis da amplitude de movimento do batedor; (C) regulador/mostrador de frequências do batedor.

## 3.2 Preparação e desenvolvimento dos ensaios

A utilização do canal do laboratório de hidráulica da FCT-UNL para estudos de agitação foi pela primeira vez utilizado numa dissertação de mestrado, pelo que a preparação dos

ensaios foi sendo ajustada desde o início dos ensaios e no decorrer os mesmos. O planeamento dos ensaios foram sendo registados tal como pode ser consultado no Anexo 1.

Antes de se iniciarem os ensaios foi necessário definir como deveriam ser realizadas as filmagens. Pretendeu-se reconstruir as condições de filmagem do caso de estudo de Santos *et al.* (2022b), realizadas a partir de uma estação de vídeo montada em terra, no topo de um edifício, com imagens sobre as ondas. Portanto para este trabalho, era necessário garantir que a câmara estivesse a um nível relativamente elevado, comparativamente ao nível de água do canal, possibilitando a gravação da totalidade da zona de estudo. E que o sentido da propagação das ondas fosse oposto ao da câmara. Assim, optou-se por considerar a zona de gravações na extremidade oposta à do batedor e a câmara foi montada o mais elevada possível. Posteriormente, definiu-se a metodologia de ortorretificação a utilizar durante os ensaios. Para a aquisição das imagens utilizou-se, em todos os ensaios, uma câmara Canon EOS 100D (DS126441), fabricada em Taiwan e com uma objetiva EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II.

Após a preparação dos equipamentos de ensaio, iniciou-se a definição das condições de ensaio necessárias para garantir uma constância nas condições de ensaio. Ou seja, garantir que as condições de luminosidade e de aquisição de imagem fossem iguais, ou muito próximas, em todos os ensaios. Iniciando-se assim os ensaios de laboratório. Começou-se então por ensaiar todas as condições de luz possíveis de serem criadas em laboratório, avaliando a sensibilidade dos resultados. Definida a melhor condição de luz, garantiu-se que esta fosse utilizada em todos os ensaios que se seguissem. Para este estudo criaram-se condições de fundo fixo e móvel no canal. Nos ensaios de fundo fixo a geometria do fundo utilizada corresponde ao fundo original do canal (fundo constante em toda a sua extensão). Já nos ensaios de fundo móvel, em cada ensaio é criado o fundo que se pretende.

Nos ensaios de fundo fixo, ensaiaram-se as variações das características das ondas possíveis de serem replicadas com os equipamentos à disposição no laboratório. Foi então possível estudar o comportamento das ondas face à alteração da frequência do batedor, que define o período da onda; à alteração da amplitude do movimento do batedor em relação à sua posição inicial, que define a altura de onda; e posteriormente à variação do nível de água do canal.

Nos ensaios de fundo móvel, ensaiaram-se diferentes geometrias de fundo com um sedimento (baquelite) que tem o papel de fazer alterar o fundo, consoante a agitação no canal.

De forma a permitir a comparação de resultados dos ensaios, foi efetuado, em cada ensaio, a captação de imagens laterais, já que o canal não estava equipado com sondas de nível. Com essas imagens registaram-se as características das ondas, nomeadamente o comprimento

de onda, o período e altura da onda. Para os ensaios de fundo móvel, para além das características das ondas, foram também recolhidas as geometrias dos fundos de ensaio. A partir dos registos da geometria do fundo e das características das ondas é possível comparar com os resultados obtidos e conseqüentemente verificar a capacidade da metodologia utilizada na deteção das mesmas. A utilização de imagens de vídeo garante, nos ensaios de fundo móvel, a observação da evolução da morfologia ao longo do tempo, apesar de que a informação da geometria do fundo só ter sido recolhida no início e fim dos ensaios. Os dados obtidos durante os ensaios podem ser consultados nas fichas de ensaio presentes no Anexo 2 ao Anexo 6.

Ao contrário de Santos *et al.* (2022b), em que o valor do comprimento de onda ao largo ( $\lambda_0$ ) foi considerado variável, já que os períodos de onda (T) para grandes profundidades variam na presença de agitação irregular. Neste estudo, dado que o batedor apenas gera ondas regulares, os valores de T e  $\lambda_0$  ao longo de cada ensaio foram considerados constantes até à rebentação da onda.

Durante os ensaios houve a preocupação de não permitir a ocorrência de rebentação de ondas na zona de interesse do estudo, evitando assim a destabilização da coloração das ondas nas *timestacks*.

A metodologia utilizada nos ensaios pode resumir-se aos seguintes pontos principais:

- aquisição/captura das imagens;
- ortorretificação de imagem;
- criação de *timestack* com base nas imagens captadas;
- obtenção da batimetria dos ensaios com base no padrão das ondas nas *timestacks*.

Ao longo dos ensaios existiram alguns constrangimentos nomeadamente na utilização do canal, devido à sua disponibilidade. Procurou-se realizar os ensaios nos dias sem atividades externas que envolvessem a utilização do laboratório.

### 3.3 Ensaios realizados

Neste trabalho foram realizados os seguintes ensaios de fundo fixo:

- Estudo de sensibilidade à luz
  - Presença de luz natural
  - Presença de luz natural e artificial
  - Presença de luz artificial
  - Ausência de luz natural e artificial tipo 1
  - Ausência de luz natural e artificial tipo 2

- Influência do período da onda
  - Frequência de 10 no batedor ( $T= 0,79$  s)
  - Frequência de 9 no batedor ( $T= 0,88$  s)
  - Frequência de 8 no batedor ( $T= 1,00$  s)
  - Frequência de 7 no batedor ( $T= 1,13$  s)
  - Frequência de 6 no batedor ( $T= 1,29$  s)
  - Frequência de 5 no batedor ( $T= 1,79$  s)
- Influência da profundidade
  - Profundidade de 15,2 cm
  - Profundidade de 13,2 cm
  - Profundidade de 11,3 cm
  - Profundidade de 10,1 cm
  - Profundidade de 8,9 cm
  - Profundidade de 6,8 cm
- Influência da altura de onda
  - Distância ao eixo do disco de 1,5 cm ( $H= 4,0$  cm)
  - Distância ao eixo do disco de 2,0 cm ( $H= 3,3$  cm)
  - Distância ao eixo do disco de 2,5 cm ( $H= 2,8$  cm)
  - Distância ao eixo do disco de 3,0 cm ( $H= 2,1$  cm)
  - Distância ao eixo do disco de 3,5 cm ( $H= 1,7$  cm)

Realizaram-se ainda ensaios de fundo móvel com:

- Perfil plano
- Perfil com barra

Relativamente aos ensaios de sensibilidade à luz, quando se refere à presença ou ausência de luz natural ou artificial, quer na realidade dizer-se que a luz em causa não está a incidir diretamente sobre o canal. Para os ensaios de ausência de luz natural e artificial, realizaram-se dois ensaios. No tipo 1, a luz natural e artificial não incidiu diretamente sobre a metade do canal mais próxima do batedor e no tipo 2, não houve incidência direta de luz natural e artificial sobre a totalidade do canal.

No que diz respeito à frequência do batedor, esta foi limitada e não havia indicação se esta se traduzia em rad/s ou em Hz. Sendo necessário, adicionalmente fazer uma comparação entre as frequências do mostrador e as que se obtiveram pelas imagens laterais.

## ENSAIOS COM FUNDO FIXO E MÓVEL

Neste capítulo apresentam-se os ensaios com fundo fixo e móvel realizados no âmbito desta dissertação e, para cada ensaio, os resultados obtidos da batimetria acompanhados de uma interpretação e discussão dos mesmos. Os resultados batimétricos são aqui apresentados em cotas ( $z$ ), com o nível de referência no fundo do canal ( $z=0$ ). A qualidade dos resultados aqui apresentados dependem do modo de captação e tratamento de imagem, como explicado anteriormente (subcapítulo 2.5), e ainda das circunstâncias em que essas imagens foram obtidas.

Antes da apresentação dos resultados de todos os ensaios, nos dois primeiros subcapítulos, apresentam-se mais detalhadamente os passos associados à obtenção dos resultados. Como os passos se repetem para todos os vídeos apresenta-se, a título de exemplo, a análise de um único ensaio.

No subcapítulo 4.1 estão presentes as várias fases da transformação das imagens captadas em imagens ortorretificadas, permitindo compreender melhor o tratamento de imagem utilizado.

No subcapítulo 4.2 apresentam-se os passos que foram utilizados para a obtenção dos resultados da batimetria para todos os ensaios, a partir da relação de dispersão. Os resultados foram obtidos por duas vias: uma que recorre à obtenção da variação dos comprimentos de onda ao longo do canal (Eq. (2.1), seguindo a metodologia adotada em Santos *et al.* (2022b); e outra que se baseia na obtenção da celeridade local ao longo do canal, utilizando a simplificação para águas pouco profundas (Eq. (2.4)).

No subcapítulo 4.3 são apresentados os resultados para todas as condições de luz possíveis de serem criadas em laboratório, de forma a permitir, através da comparação entre os resultados obtidos, determinar a melhor condição de luz possível.

Finalmente, nos subcapítulos 4.4 e 4.5 apresentam-se os resultados obtidos para todos os ensaios de fundo fixo e móvel e discutem-se os resultados.

## 4.1 Correção de imagens

As imagens de vídeo captadas pela câmara são, como referido anteriormente, submetidas inicialmente a uma ortorretificação para posterior utilização na obtenção de resultados (subcapítulo 4.2). Neste subcapítulo, descreve-se o tratamento de imagem utilizado e apresenta-se o resultado final para um exemplo de ensaio.

Na Figura 4.1, apresentam-se as diferentes fases do processo de transformação das imagens de vídeo em imagens ortorretificadas utilizando o programa *MATLAB*, "planar2".

A primeira etapa no tratamento de imagem, adotado neste trabalho, começa pela colocação de um tabuleiro com padrão axadrezado sobre o canal (Figura 4.1-A), alinhado com as paredes do canal. O padrão do tabuleiro utilizado contém quadrados de 2 cm de lado. De seguida, captura-se a imagem do canal a partir da posição original escolhida para a gravação dos ensaios. É importante que essa posição seja mantida durante o(s) ensaio(s). Caso contrário, a correção de imagem tem de ser repetida. A captação das imagens deve ser feita preferencialmente em vídeo (de curta duração) porque, por vezes, as dimensões (número de *pixels*) das imagens fotografadas podem ser diferentes das dos *frames* de vídeos, alterando as posições dos *pixels* com as mesmas colorações.

Estabelecida a posição do tabuleiro, começa-se por definir manualmente as coordenadas dos *pixels* na imagem (pontos de controlo). Estes encontram-se assinalados nos vértices do quadrilátero a vermelho da zona a ortorretificar evidenciado na Figura 4.1-B. Os pontos de controlo dividem-se em 2 tipos de coordenadas: coordenadas reais dos *pixels*, com a origem no canto superior esquerdo da imagem (

Figura 4.2); e coordenadas relativas dos vértices, considerando a origem num desses pontos (indicados a amarelo na Figura 4.1-B). Para que esta metodologia seja bem executada, o tabuleiro tem de estar disposto de tal forma que, na imagem as linhas do quadriculado, na direção paralela ao canal, convirjam para um ponto de fuga e as linhas perpendiculares à direção do canal permaneçam paralelas. Na realidade, existem vários modos de correção de imagem que podem ser utilizados para corrigir as deformações que a imagem possa ter (Loomis, 2015). A disposição do tabuleiro relativamente à câmara utilizada nos ensaios é compatível com o modo de correção de imagem ("*projective*") utilizado no "planar2".

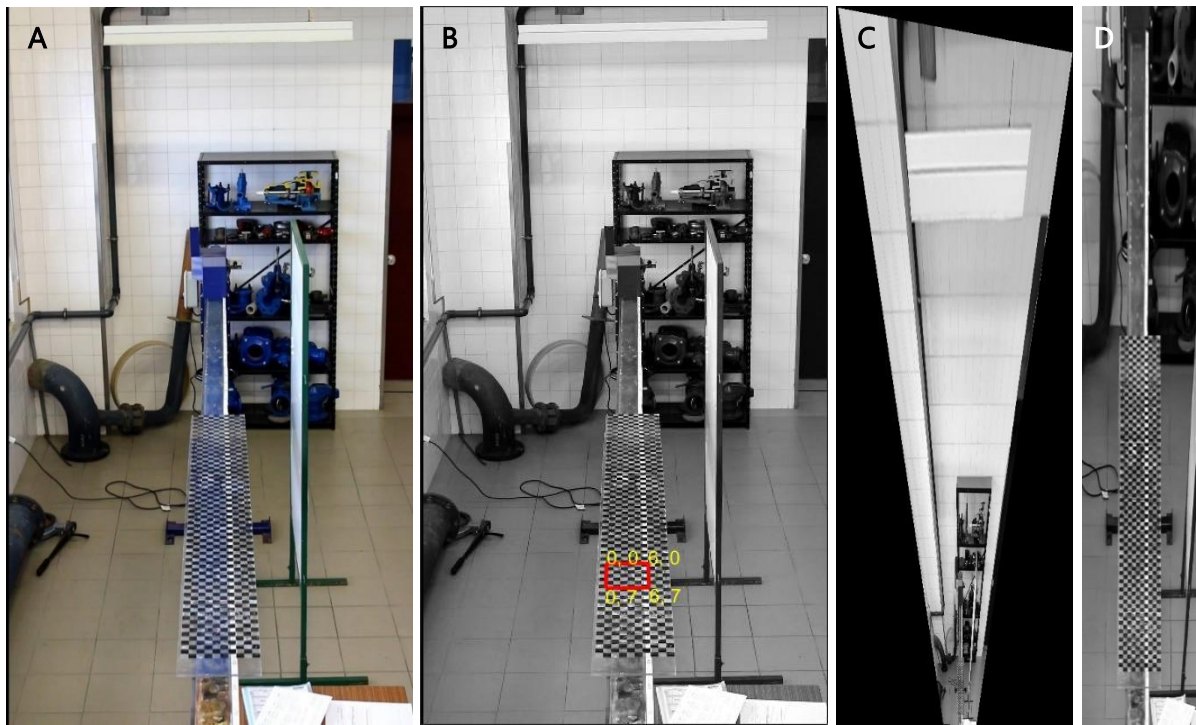


Figura 4.1- Fases da ortorretificação de imagem pelo "planar2".

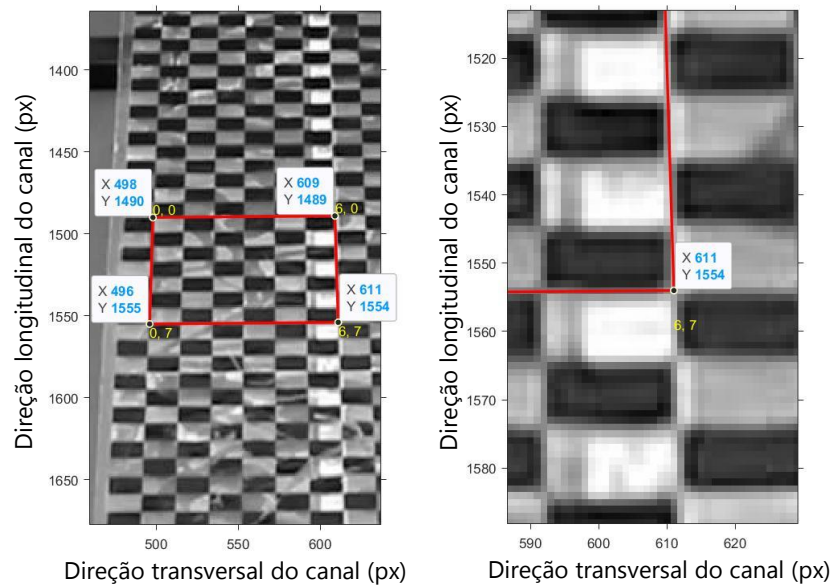


Figura 4.2- Exemplo de coordenadas dos pontos de controlo.

Na Figura 4.1-C, apresenta-se a imagem obtida pós ortorretificação e escolhe-se uma janela adequada da área de estudo, centrada sobre o canal (Figura 4.1-D). A posição da câmara é mantida para todos os ensaios gravados.

Finalmente, como se pretende obter a evolução das ondas ao longo do canal, escolhe-se a linha intermédia do canal como representativa da disposição das ondas para determinado instante. A localização dessa linha era inicialmente escolhida manualmente. No entanto, para solucionar um problema que surgiu aquando dos processamentos, foi necessário passar a

localizar essa linha de forma automática. Nessa linha, os *pixels* com tons de cor mais claros representam as cristas e os *pixels* de tons de cor mais escuros representam as cavas das ondas.

As etapas descritas acima repetem-se para cada *frame* de vídeos de ensaio e as linhas intermédias do canal de todos os *frames* são agrupadas numa só imagem, criando as *timestack*, como produto final da ortorretificação de imagem (Figura 4.3-A).

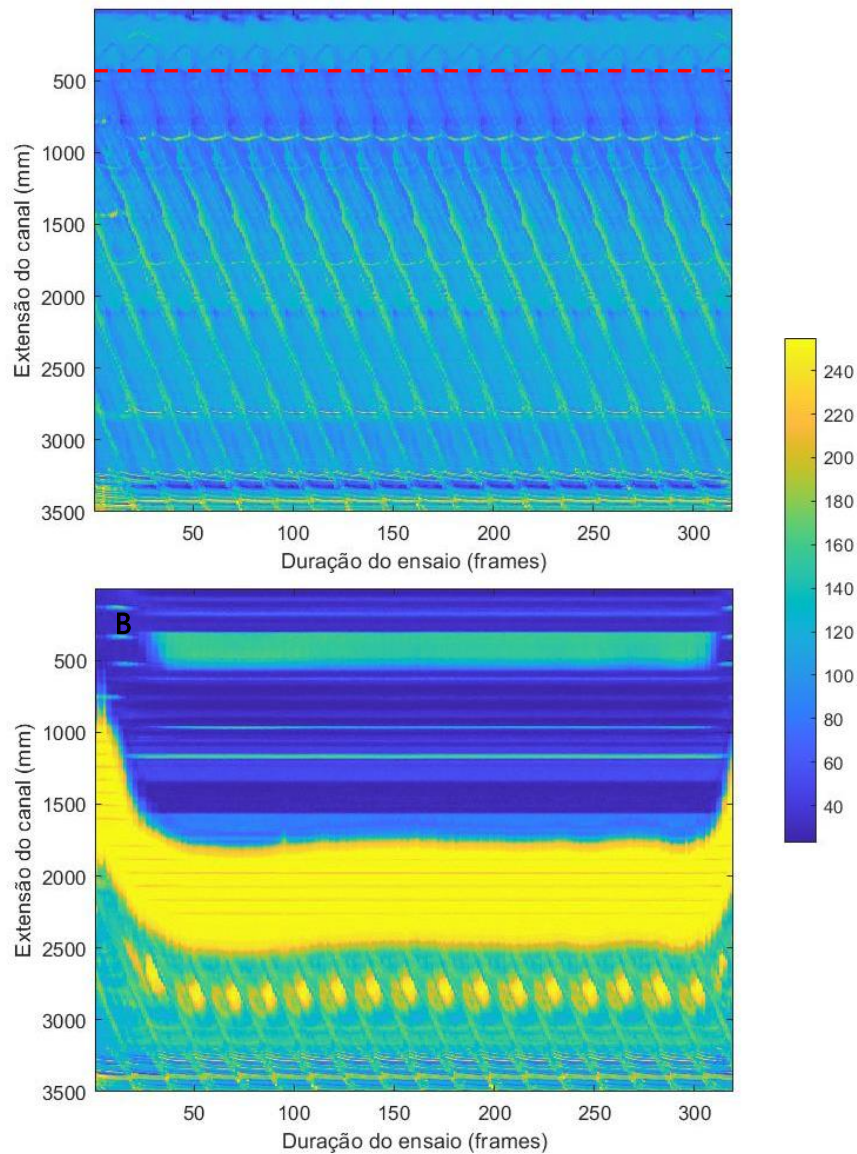


Figura 4.3- Exemplo de *timestack*.

*Timestack*: (A) com ajuste da linha central do canal; (B) sem ajuste da linha central. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

À medida que os ensaios foram sendo realizados, um problema que se registou foi o facto de a câmara fotográfica se mover durante os ensaios. Por exemplo, na Figura 4.4-A

observa-se que os pontos de controlo do quadrilátero vermelho encontram-se deslocados para a direita, *i.e.*, fora do canal. Isto aconteceu quando as gravações foram realizadas por uma única pessoa e, quando havia necessidade de alterar as condições de ensaio, dificilmente se obtinha com exatidão a mesma posição de gravação. Naturalmente, este problema tem implicações no posicionamento correto da linha central do canal e posteriormente na concretização da *timestack* de ensaio (Figura 4.3-B). Como este problema só se detetou durante a análise das *timestacks*, procurou-se solucionar o problema por manipulação da imagem, evitando a repetição de todos os ensaios realizados até então.

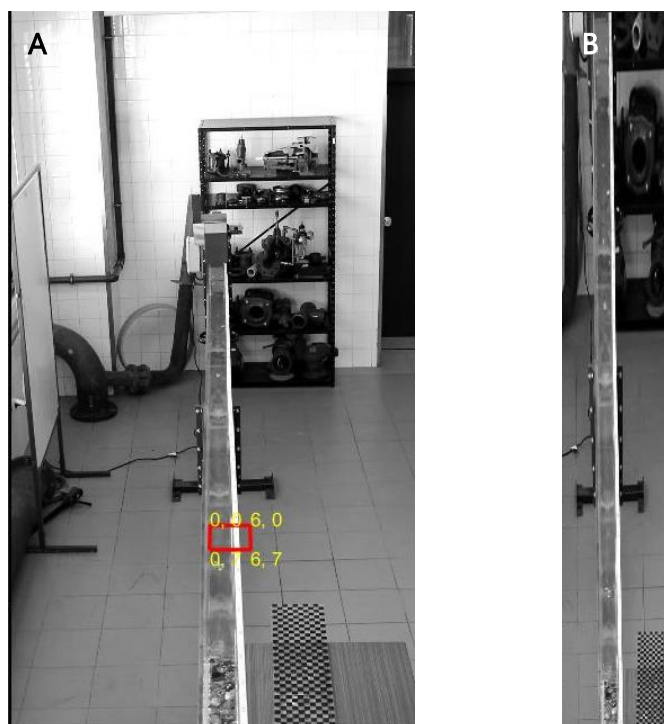


Figura 4.4- Primeiro problema detetado na correção de imagem.

(A) Posição da zona a ortorretificar fora dos limites do canal; e (B) canal desalinhada com a vertical na imagem ortorretificada.

Como solução para esse problema, utilizou-se a orientação da fita métrica, visível sobre a parede direita do canal, para corrigir a orientação do canal. Como a fita métrica tinha cor branca, decidiu-se salientar esta característica na imagem ortorretificada (Figura 4.5-A), salientando-se somente os pixels que continham tons claros. Para distinguir os pixels que representavam a fita métrica, na Figura 4.5-B, todos os pixels que tinham tons claros na imagem anterior passavam a ter cor branca e, os restantes, cor preta. Como se pode ver nessa figura, os pixels que se apresentam destacados a branco estão maioritariamente localizados na zona da fita métrica. De seguida, estimou-se o ângulo que essa linha branca faria com a vertical e

corrigiu-se a orientação do canal (Figura 4.5-C). Este passo foi posteriormente utilizado para corrigir todos os frames dos vídeos de ensaio que apresentavam este problema. Na Figura 4.5-D apresenta-se o frame após correção.

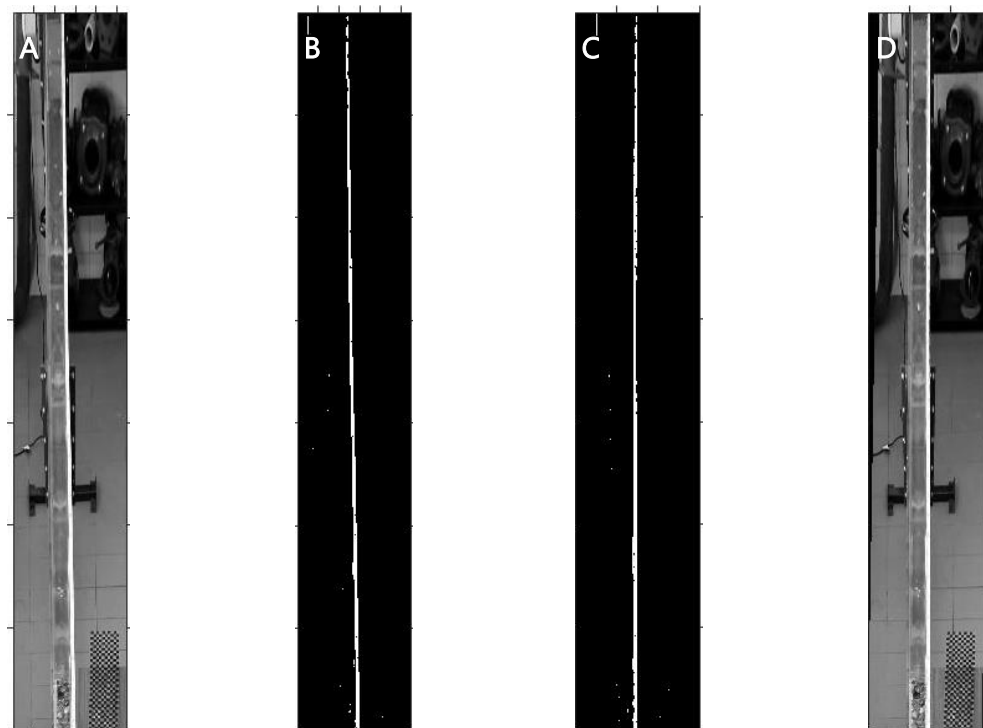


Figura 4.5- Correção da orientação do canal nos *frames* após ortorretificação. Apresentam-se exemplos de: (A) um *frame* pré correção; (B) destaque dos *pixels* da fita métrica sobre o canal; (C) correção da orientação desses *pixels* para uma orientação vertical; e (D) *frame* pós correção.

Neste trabalho considerou-se uma resolução de imagem equivalente a 20 *pixels* em cada aresta de 2 cm dos quadrados do tabuleiro, o que corresponde a 1 mm/*pixel*. No entanto, após utilização do "planar2", verificou-se uma perda de resolução de imagem devido ao afastamento da câmara à zona retificada, tal como mencionado no capítulo 2.5.

Para demonstrar melhor a ocorrência deste segundo problema, apresentam-se na Figura 4.6, três troços que representam 1000 mm da extensão real do canal. Nota-se que no troço mais afastado da câmara (a vermelho), o número de *pixels* que representam essa distância é inferior a 1000. Nos troços seguintes, esse número vai aumentando à medida que se aproxima da câmara até regularizar o seu valor de 1000 *pixels* num total de 1000 mm de extensão do canal no último troço (a amarelo).

Relativamente à metodologia de ortorretificação utilizada, considerou-se uma distribuição de faixas pretas, horizontais e verticais sobre a imagem original, todas com a mesma

espessura e afastamento entre elas. Corrigindo os *frames* com a sobreposição destas faixas na imagem original, foi possível obter a transformação das suas geometrias com o processo de ortorretificação, como se pode ver na Figura 4.7. É então perceptível que, quanto maior o afastamento da câmara, maior é a deformação provocada segundo as duas direções. No entanto, isso ocorre a uma escala bastante superior segundo a direção longitudinal do canal, tal como ilustrado previamente na Figura 2.6. Esta transformação faz sentido, na medida em que, quanto mais longe se encontra um objeto da câmara, menor é a sua dimensão na imagem original. A ortorretificação tende a aumentar progressivamente o tamanho dos objetos quanto maior a sua distância à câmara, uniformizando a resolução dos objetos na imagem retificada.

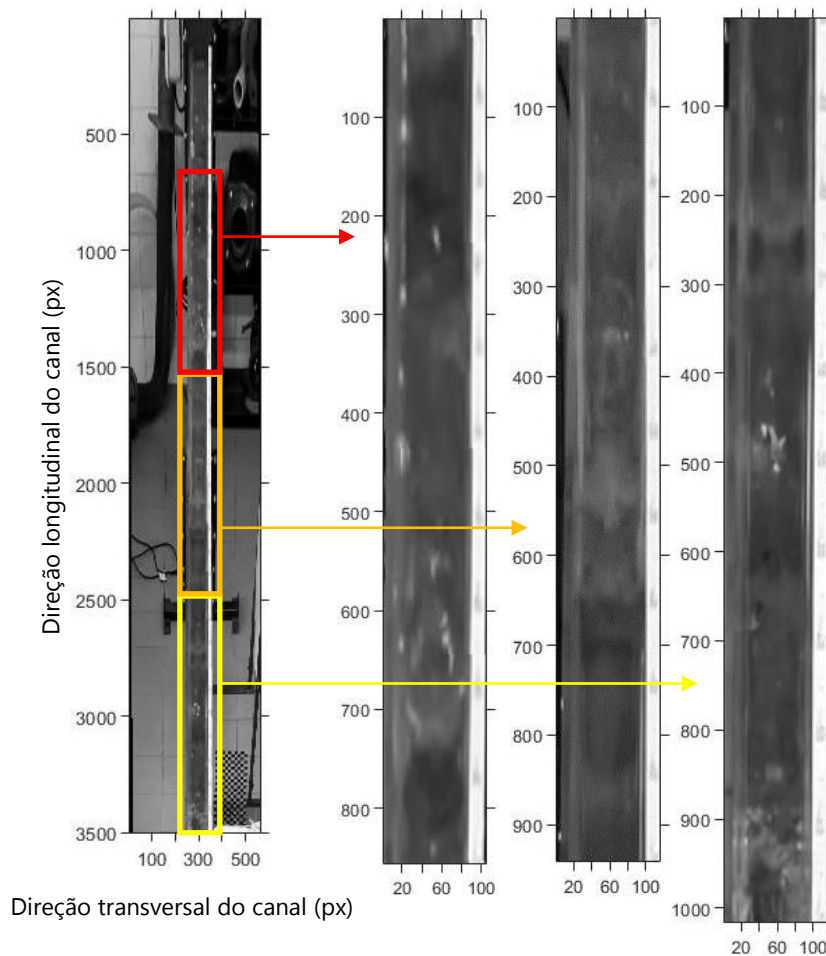


Figura 4.6- Problema de resolução de imagem após ortorretificação.

Ainda assim, como se pode ver na figura 4.6, as distâncias longitudinais reais do canal não foram obtidas com a devida resolução. Uma das razões que pode ter promovido este problema pode estar relacionado com a pequena dimensão do quadrilátero escolhido para pontos de controlo sobre a zona a ortorretificar (Figura 4.8-A). Como se pode verificar nessa

figura, o quadrilátero sobre a zona a retificar tem como dimensões 6 por 7, com quadrados de 2 cm (onde cada pixel corresponde a 1 mm). Na Figura 4.8-B pode observar-se que o quadrilátero, após retificação, tem as dimensões esperadas (120 por 140 *pixels*). No entanto, a qualidade dos resultados pode diminuir com o afastamento da fronteira do quadrilátero. Consequentemente, se o quadrilátero da zona a ortorretificar tivesse englobado a totalidade ou grande parte do tabuleiro, provavelmente existiria menor deformação de imagem. Por outro lado, englobar a totalidade do tabuleiro exigiria um esforço computacional ainda maior, aumentando o tempo de processamento.

Ainda que a qualidade dos resultados obtidos pudesse ser melhor considerando a totalidade do tabuleiro, a qualidade dos resultados obtidos com a dimensão do quadrilátero escolhido, demonstrou ser a opção mais razoável face ao tempo de processamento de aproximadamente 3 horas e não 6, para gerar uma *timestack*.

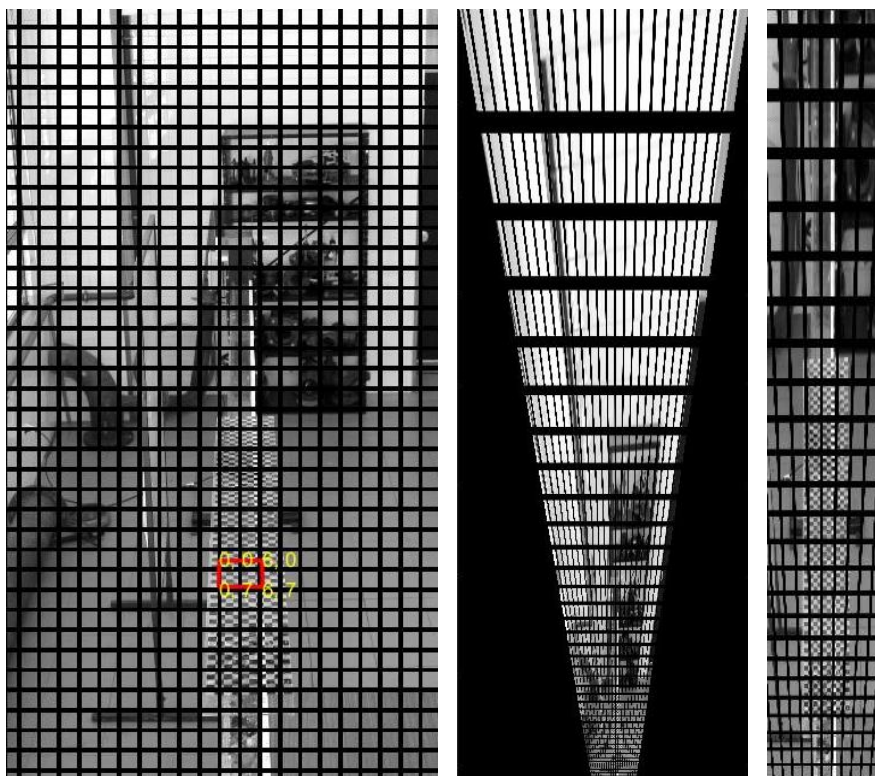


Figura 4.7- Variação da resolução de imagem associada à ortorretificação de imagem.

Na realidade, os vídeos são um conjunto de imagens sucessivas espaçadas entre si por um curto espaço de tempo. O número de imagens captadas por segundo (*frame rate*) pode variar dependendo do tipo de máquina utilizada. Neste trabalho, para a gravação dos ensaios foi utilizada a mesma câmara fotográfica. Logo, todos os vídeos de ensaio têm uma taxa de

aquisição (*frame rate*) constante que, neste caso, corresponde a 23,98 *frames* por segundo. No entanto, para fins de programação esse valor foi arredondado para 24.

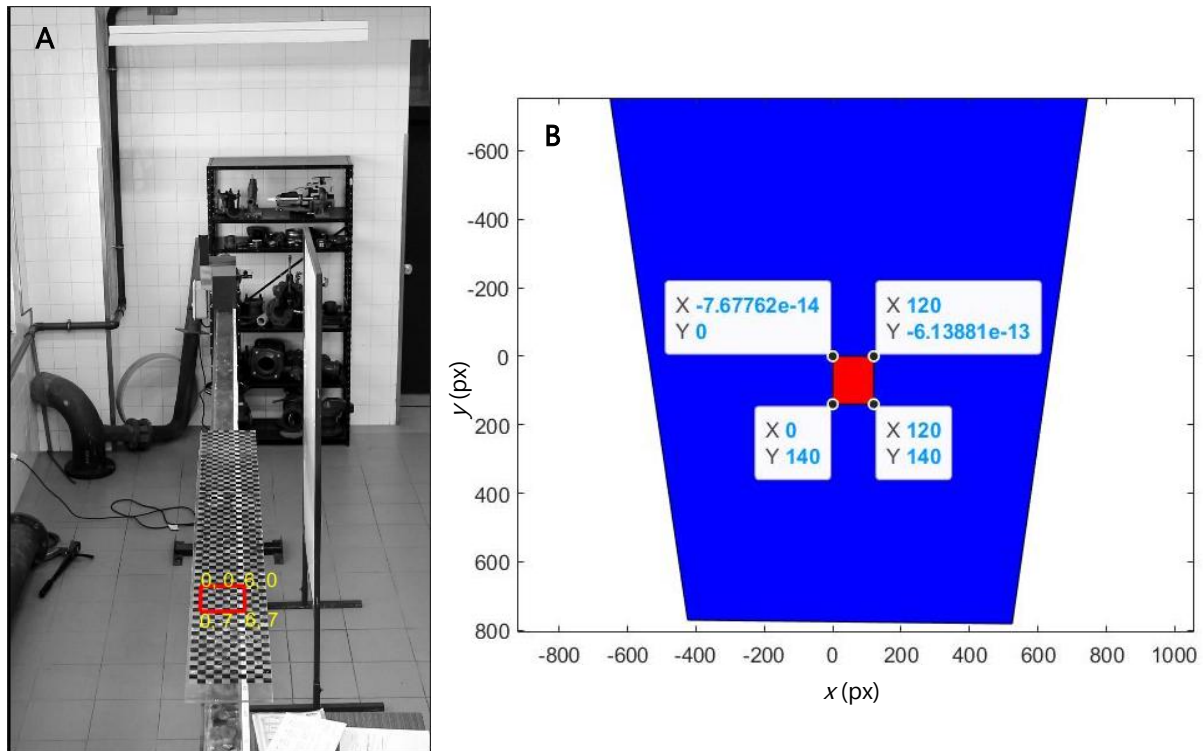


Figura 4.8- Verificação da geometria do quadrilátero utilizado na metodologia de ortorretificação. Geometria do quadrilátero: (A) antes retificação; e (B) após retificação.

Na Figura 4.9, apresentam-se dois casos de *timestacks* obtidas para os ensaios do subcapítulo 4.3. No eixo vertical das *timestacks* a duração do ensaio está expressa em *frames* que, segundo o parágrafo anterior, corresponde cada a 1/24 s e no eixo horizontal a extensão do canal tem como unidades os milímetros devido à resolução das imagens retificadas de 1 mm/*pixel*. A salientar que o eixo vertical das *timestacks* aqui apresentadas, ou por outras palavras, as durações das gravações de ambos os ensaios são distintas. No entanto, aquando da apresentação das imagens no *MATLAB* a dimensão das imagens é sempre equivalente por defeito. Por essa razão, as Figura 4.9-A e Figura 4.9-B aparentam ter períodos de onda diferentes, quando na realidade estes ensaios foram realizados com o mesmas características de onda (subcapítulo 4.3). Inclusivamente, relativamente à apresentação das *timestacks* nos subcapítulos seguintes, as suas dimensões verticais e horizontais também não são apresentadas à escala pela mesma razão enunciada a trás (Figura 4.10-A), *i.e.*, as unidades do eixo vertical e horizontal não têm o mesmo comprimento, como apresentado na Figura 4.10-B. Isso garante por um lado uma melhor visualização/compreensão das imagens apresentadas.

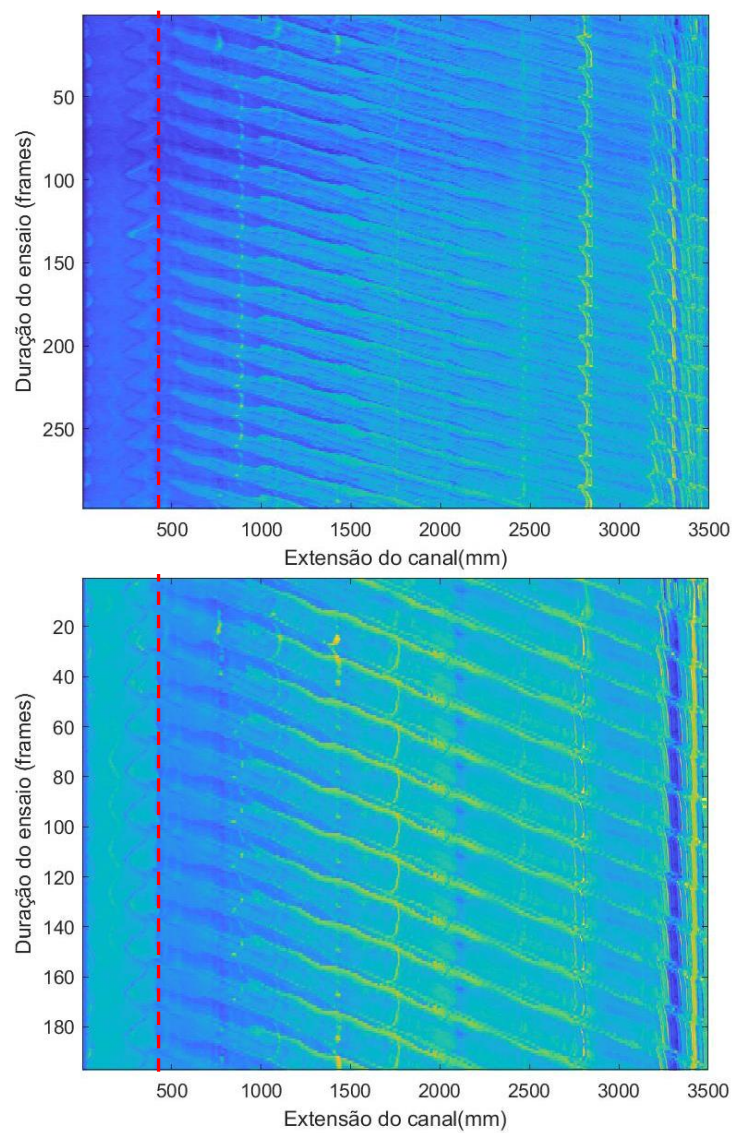


Figura 4.9- Comparação entre *timestacks* com durações de ensaio distintas. *Timestack* com: (A) 298 *frames*; e (B) 197 *frames*. - com características de ondas idênticas. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

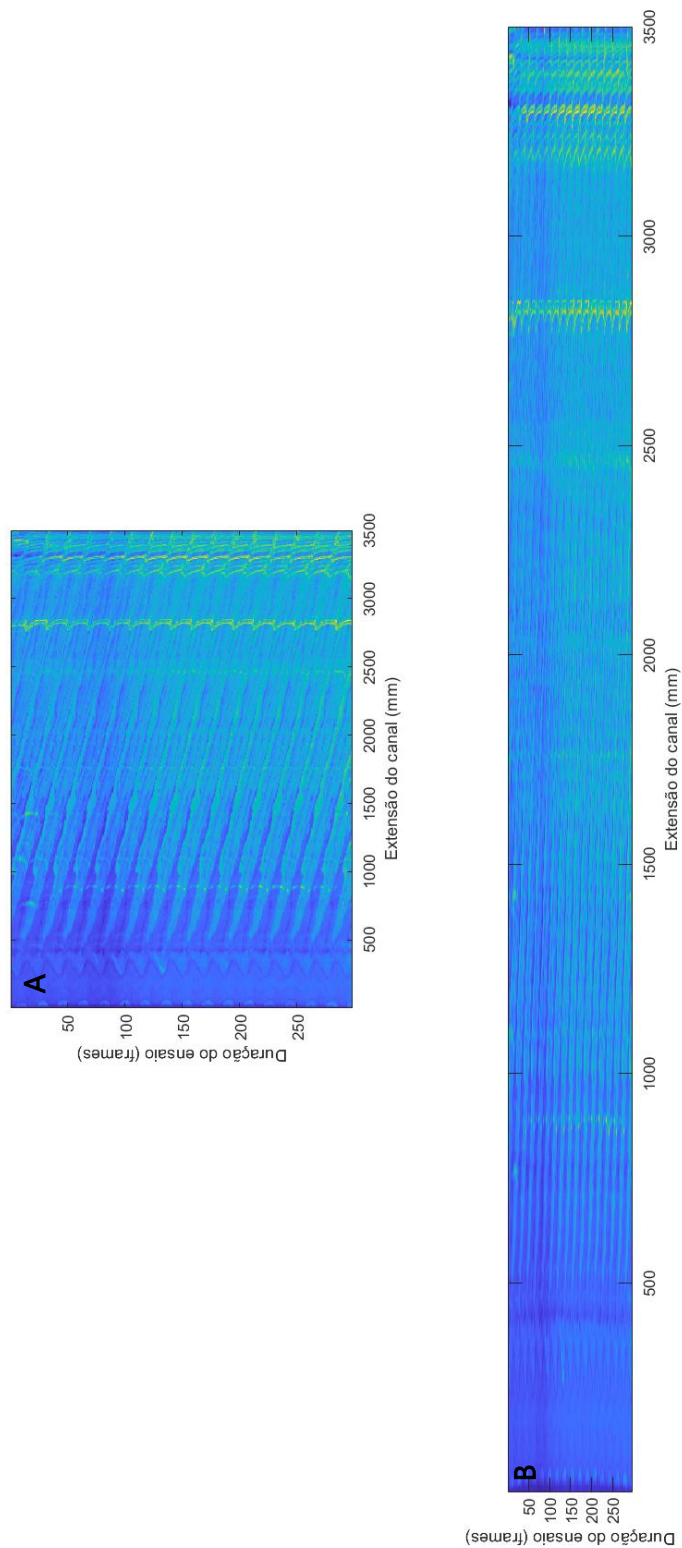


Figura 4.10- Comparação entre dois formatos de imagem para a mesma *timestack*. Apresenta-se essa *timestack*: (A) com o formato, por defeito, do MATLAB; e (B) com o formato original (sem deformações nas dimensões dos pixels).

## 4.2 Metodologias adotadas

Neste ponto apresenta-se a forma pela qual os resultados dos ensaios de fundo fixo e móvel foram obtidos a partir das *timestacks*. Para isso foram utilizadas duas metodologias distintas. A primeira metodologia foi a adotada por Santos *et al.* (2022b) e a segunda metodologia é apresentada como alternativa à primeira, de modo a ultrapassar as dificuldades encontradas pela primeira metodologia.

### 4.2.1 Metodologia adotada por Santos *et al.* (2022b)

Neste subcapítulo apresenta-se detalhadamente os passos percorridos para a determinação da batimetria pela metodologia proposta em Santos *et al.* (2022b), isto é, recorrendo às *wavelets* para detetar as características das ondas.

As diferentes colorações a que cada *pixel* corresponde nas *timestacks* manifesta informações importantes sobre as ondas, *i.e.*, os *pixels* mais claros correspondem às cristas e os *pixels* mais escuros correspondem às cavas (Figura 4.11-A). Estas colorações podem, no entanto, levantar alguns problemas computacionais na distinção das várias fases das ondas. Por essa razão, o primeiro passo desta metodologia passa pela uniformização da *timestack* original (Figura 4.11-B) no tempo (ao longo do eixo vertical) e no espaço (ao longo do eixo horizontal). Nesta uniformização realiza-se inicialmente uma média móvel de todas as linhas e colunas da *timestack* original. O intervalo de valores da média móvel é ajustado consoante a qualidade dos resultados obtidos e depende, no código *MATLAB* utilizado, da dimensão da janela de valores definida. De seguida reconstrói-se esse sinal em forma sinusoidal. Na Figura 4.12-A mostra-se um exemplo da uniformização no tempo do sinal original da *timestack* para a posição 1500 mm da extensão do canal. Aqui os picos do sinal da média móvel passam a corresponder aos máximos e mínimos do sinal em forma sinusoidal. Quando esse sinal toma o valor unitário este representa a crista da onda e o seu valor simétrico representa a cava da onda (Figura 4.12-B).

Após a uniformização do sinal, inicia-se a determinação das características das ondas (comprimento de onda,  $\lambda$  e período da onda,  $T$ ) com recurso às *wavelets*. Como se explicou no subcapítulo 2.4, a transformada de *wavelet* decompõe o sinal em análise em vários troços do seu domínio onde as funções *wavelets*, através de mudanças de forma, se ajustam ao sinal com um nível de detalhe mais ou menos amplo consoante a escala de frequências do sinal. No código *MATLAB* utilizado, o número de frequências analisadas e as frequências de corte são

definidas manualmente e testadas para diferentes combinações e posteriormente determinados os valores de  $\lambda$  e  $T$ . Em função da qualidade dos resultados de  $\lambda$  e  $T$  obtidos, são escolhidas as frequências que melhor aproximam os resultados esperados.

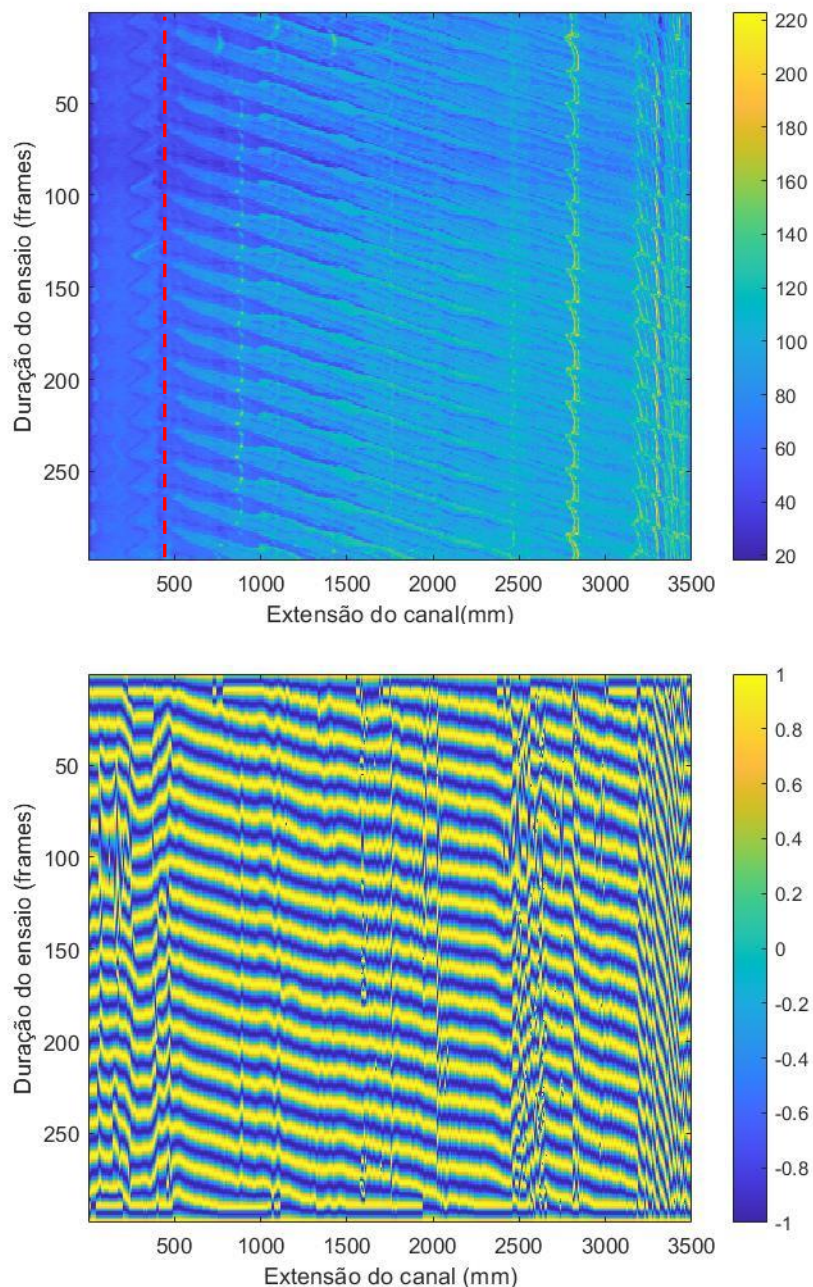


Figura 4.11- Exemplo de coloração da timestack: (A) original; e (B) uniformizada.

A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

O terceiro e último passo desta metodologia passa pela determinação dos valores da profundidade,  $h$ , pela Eq. (2.1). Estes resultados são posteriormente sujeitos a uma mediana móvel para um intervalo de 500 mm de extensão do canal, rejeitando qualquer divergência

exagerada de resultados de  $h$ . Na apresentação de resultados, preferiu-se apresentar os valores de  $z$ , com o nível de referência ( $z=0$ ) no fundo do canal, ao invés dos valores de  $h$ , por se considerar ser mais ilustrativo da batimetria obtida nos ensaios (Figura 4.13).

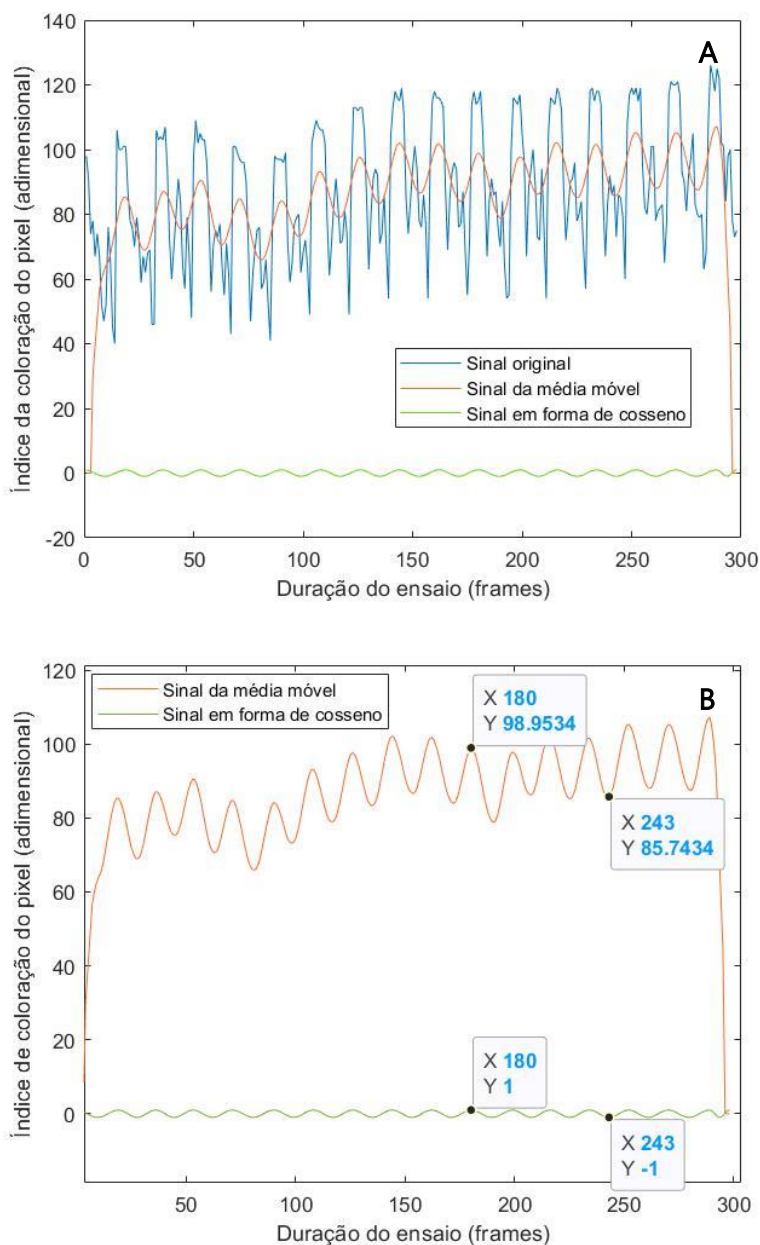


Figura 4.12- Exemplo de uniformização do sinal (no tempo), para a *timestack* da Figura 4.11 na posição 1500 mm da extensão do canal.

Apresentam-se: (A) as fases de transformação do sinal original em sinal uniformizado em forma sinusoidal; e (B) a correspondência das cristas e cavas da onda entre as duas fases da uniformização do sinal.

A análise dos resultados obtidos para todos os ensaios permitiu tirar algumas conclusões. A primeira conclusão está relacionada com a escolha de um grande número de frequências estimadas para a análise dos sinais. Esta garante um maior nível de detalhe na sua análise. No entanto, essas frequências podem, por um lado, não beneficiar da qualidade dos resultados por estarem fora da gama de frequências do sinal esperado. Por exemplo, neste trabalho os valores de  $T$  variaram entre os 0,70 e 1,80 s, pelo que se decidiu utilizar um intervalo de frequências de corte de 0,5 a 5,0 Hz que abrange por completo a gama de frequências do sinal. Por outro lado, a grande duração/custo computacional que é exigida usando um grande número de frequências estimadas pode não trazer grandes benefícios práticos na obtenção de resultados comparativamente aos que seriam obtidos para um menor número de frequências estimadas. Ou seja, para um  $T=0,80$  s (1,25 Hz), seria razoável utilizar o intervalo de frequências [1, 2] Hz como frequências de corte e não outro que abrangesse um maior número de frequências. A segunda conclusão está relacionada com a escolha da janela de valores para a média móvel do sinal original das *timestacks*. A escolha adequada dessa janela de valores pode comprometer a qualidade dos resultados das características das ondas. Aqui, a diferença do tempo de processamento que difere entre cada uma das janelas de valores escolhidas não é significativa face à qualidade de resultados obtidos. Neste caso, para um  $\lambda=0,67$  m, testaram-se diferentes janelas da média móvel entre 0,04 m a 0,40 m, tendo a janela de 0,20 m de média móvel resultado em boas aproximações ao valor esperado.

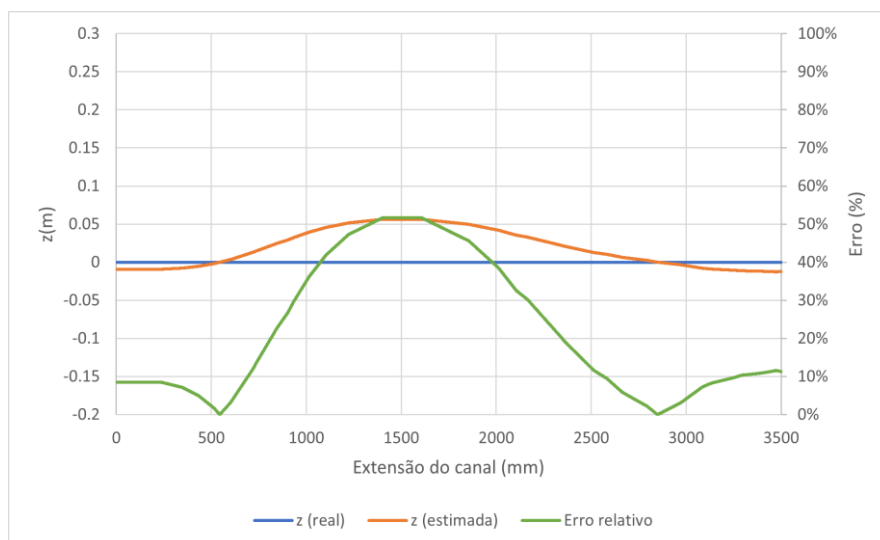


Figura 4.13- Exemplo de resultado de  $z$  para um ensaio com fundo fixo.

Na apresentação de um exemplo de resultados de  $\lambda$  e  $T$  (Figura 4.14), estão presentes os valores estimados, os valores medianos e os erros relativos entre os valores estimados e os

valores esperados (adquiridos pelas imagens laterais tal como se explicou no subcapítulo 3.2). Na realidade, os valores esperados de  $\lambda$  e  $T$ , obtidos através das imagens laterais dos ensaios, não podem ser considerados os valores reais (ao contrário do que acontece na Figura 4.13), uma vez que apenas se consegue obter uma estimativa desses valores. Isto porque, por um lado, os valores de  $T$  são sensíveis à taxa de aquisição das imagens (*frame rate*) e, por outro lado, a qualidade de imagem, dos *frames* dos vídeos, não permite retirar com exatidão o valor do comprimento de onda.

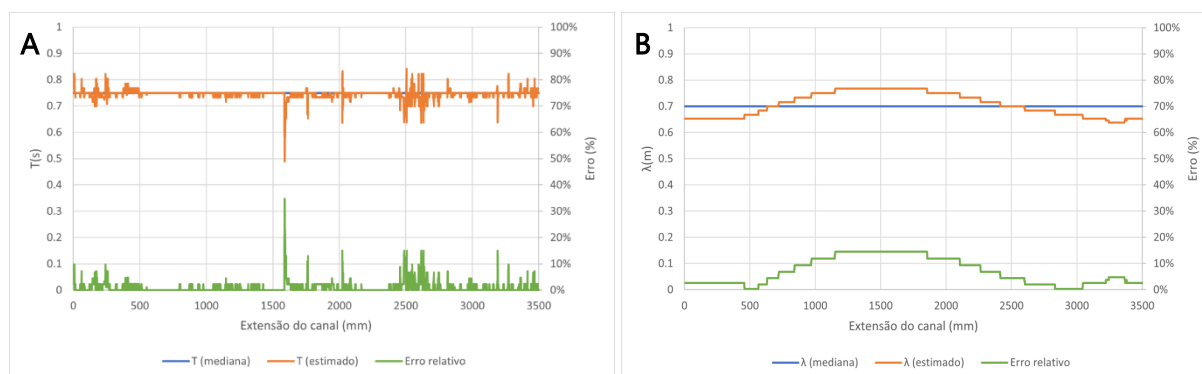


Figura 4.14- Exemplo de resultados: (A) dos valores de  $T$ ; e (B) dos valores de  $\lambda$ , para um ensaio de fundo fixo.

## 4.2.2 Metodologia alternativa

Neste subcapítulo apresenta-se uma alternativa à metodologia utilizada em Santos *et al.* (2022b), para a obtenção de resultados, com vista a ultrapassar alguns problemas encontrados aquando do estudo dos ensaios com fundo móvel.

Para os ensaios de fundo móvel, pretendeu-se seguir a metodologia de ensaio de Santos *et al.* (2022b). No entanto, após a verificação de alguns resultados, chegou-se à conclusão que a determinação do comprimento de onda ao longo do canal utilizando as *wavelets* não era eficaz. Este problema deve-se ao facto de a dimensão do canal não comportar um número mínimo de comprimentos de onda necessários para detetar com clareza os comprimentos de onda observados. Por exemplo, para  $T=0,8$  s, obtém-se  $\lambda_0=1,0$  m, levando a que haja no máximo três comprimentos de onda visíveis na zona do canal em análise, com uma extensão de 3,0 m. Este problema não se reflete na qualidade dos resultados do período da onda, uma vez que na *timestack* (Figura 4.15-C), na direção da duração do ensaio (direção vertical), o número de cristas e cavas presentes, para a mesma posição do canal, é consideravelmente superior à que se encontra na direção da extensão do canal (direção horizontal), para o mesmo instante do ensaio. Por este motivo, decidiu-se seguir outra metodologia para a obtenção da batimetria, que é exposta neste subcapítulo.

Para os ensaios de fundo fixo, utilizando a metodologia de Santos *et al.* (2022b), possivelmente a problemática da pequena extensão do canal poderá também interferir com a qualidade dos resultados do comprimento de onda. No entanto, como nos ensaios de fundo fixo o comprimento de onda é sensivelmente constante ao longo do canal, por não haver variação do fundo, este problema poderá ter menos influência quando comparado com os resultados obtidos com os ensaios de fundo móvel, onde a variação do fundo, para além de modificar o comprimento da onda ao longo do ensaio, também exige espaço suficiente para que a onda se possa adaptar a ele.

O objetivo desta segunda metodologia passa pela utilização da propagação das cristas das ondas, provenientes das *timestacks*, para a determinação da celeridade instantânea das ondas e, a partir desta, a profundidade. Pretende-se então verificar se, para evoluções morfológicas, haverá uma maior adaptação da celeridade face ao comprimento de onda. Desta forma, a determinação do comprimento de onda, que não foi possível de ser determinado com rigor pela anterior metodologia, deixa de ser necessária. Passando-se a utilizar a Eq. (2.4), ou seja, a relação de dispersão simplificada para pequenas profundidades, onde a profundidade apenas depende do conhecimento da celeridade da onda e da aceleração gravítica.

De seguida, apresentam-se detalhadamente os passos utilizados para a determinação da batimetria através desta metodologia.

Nos ensaios de fundo móvel, como se pretende obter a batimetria do ensaio e a sua evolução ao longo do tempo, a duração da gravação dos ensaios foi prolongada até se obter uma clara diferença entre a batimetria pré e pós ensaio. A ordem de grandeza do tempo de gravação dos ensaios vai dos 10 a 20 minutos, onde se anotaram as cotas antes e após cada ensaio para futura comparação com os resultados obtidos. O primeiro passo desta metodologia, passa novamente pela uniformização da *timestack* de cada ensaio (tal como se explicou no subcapítulo anterior), mas neste caso para o instante inicial e final dos ensaios, por só nesses ser conhecida a geometria dos perfis. Como apenas se registaram os perfis iniciais e final de cada ensaio, só esses resultados servirão para análise no subcapítulo 4.5, e avaliação da evolução da batimetria.

Na Figura 4.15, apresenta-se um exemplo da *timestack* completa de um ensaio de fundo móvel, a *timestack* de um dos instantes onde se obtiveram os resultados da batimetria e a *timestack* uniformizada desse mesmo instante. A duração da *timestack* para cada instante do ensaio é de aproximadamente 21 segundos (500 *frames*). Como se pode observar, existe uma maior dispersão de cores dos pixels a partir da posição 750 mm, que se prolonga até ao fim da zona em análise. Estas diferenças refletem que o algoritmo de transformação das imagens

de vídeo em *timestack*, é sensível à diferença de cores entre o fundo do canal (azul-escuro) e os sedimentos (tons bege). Esta problemática não é visível na *timestack* (Figura 2.2), apresentada por Santos *et al.* (2022b), possivelmente pelo facto de que por um lado, as profundidades nesse local não permitiram a visualização do fundo, ou por outro lado, devido ao reflexo natural que não pode ser reproduzido em laboratório. De salientar que nos ensaios de fundo móvel, a extensão do canal para análise, na *timestack*, é de 3000 mm e não 3500 mm, porque se pretendeu limitar a zona de análise para a zona só com os sedimentos, mas também porque na extremidade mais próxima da câmara se registaram maiores perturbações, nomeadamente rebentação de ondas.

Após a uniformização da *timestack* para cada instante, filtram-se os pixels cujas colorações correspondem às cristas, ou seja, os picos do sinal com valor unitário (Figura 4.16-A). De seguida ajusta-se a janela da *timestack*, sem as perturbações na fronteira da *timestack* (Figura 4.16-B) e seleccionam-se apenas as cristas das ondas com uma propagação visível do início ao fim da zona em análise (Figura 4.16-C).

No terceiro passo, utilizando as coordenadas dos pixels que representam as cristas, determina-se a linha de tendência (linha média) da trajetória de todas as cristas, ou seja, os pontos médios de todas as cristas para cada posição ao longo do canal (Figura 4.17-A). E finalmente regulariza-se a linha de tendência da trajetória das cristas com uma mediana móvel para um intervalo de 500 mm tal como se realizou para os ensaios de fundo fixo, rejeitando qualquer dispersão exagerada das coordenadas dos pontos (Figura 4.17-B).

No quarto e último passo, determina-se a batimetria através da Eq. (2.4). Com os pontos da linha de tendência determina-se a celeridade (declive da linha) instantânea com recurso a uma mediana móvel dos pontos, centrada num intervalo total de 500 mm de largura. A Eq. (2.4) deve ser essencialmente utilizada para condições de pequenas profundidades. No entanto, para testes realizados em profundidades intermédias que tendem para essas condições, não deverão resultar em valores de profundidades muito fora da ordem de grandeza do valor real. Apresenta-se na Figura 4.18, um exemplo do resultado de  $z$  estimado e o seu erro relativamente ao  $z$  real, seguindo a metodologia enunciada neste subcapítulo. A cota real corresponde à cota dos perfis de sedimento que se registou ao longo da realização dos ensaios, pelo que, consoante o instante em análise, o  $z$  real vai-se alterando. Durante os ensaios não foi registada a cota real, pelo que nos restantes instantes intermédios não é possível comparar os resultados.

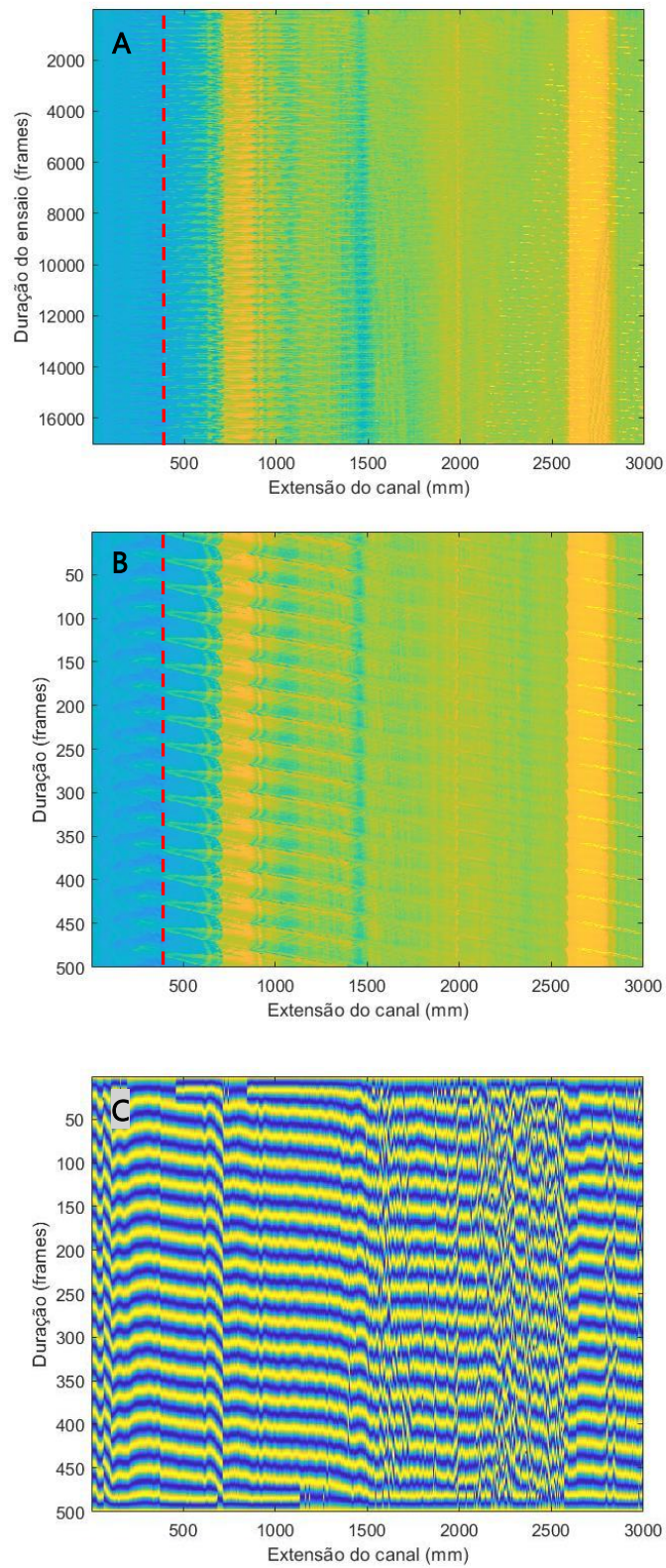


Figura 4.15- Exemplos de uma *timestack*: (A) completa; (B) para um intervalo de tempo mais reduzido; e (C) uniformizada de um ensaio de fundo móvel.

A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bater.

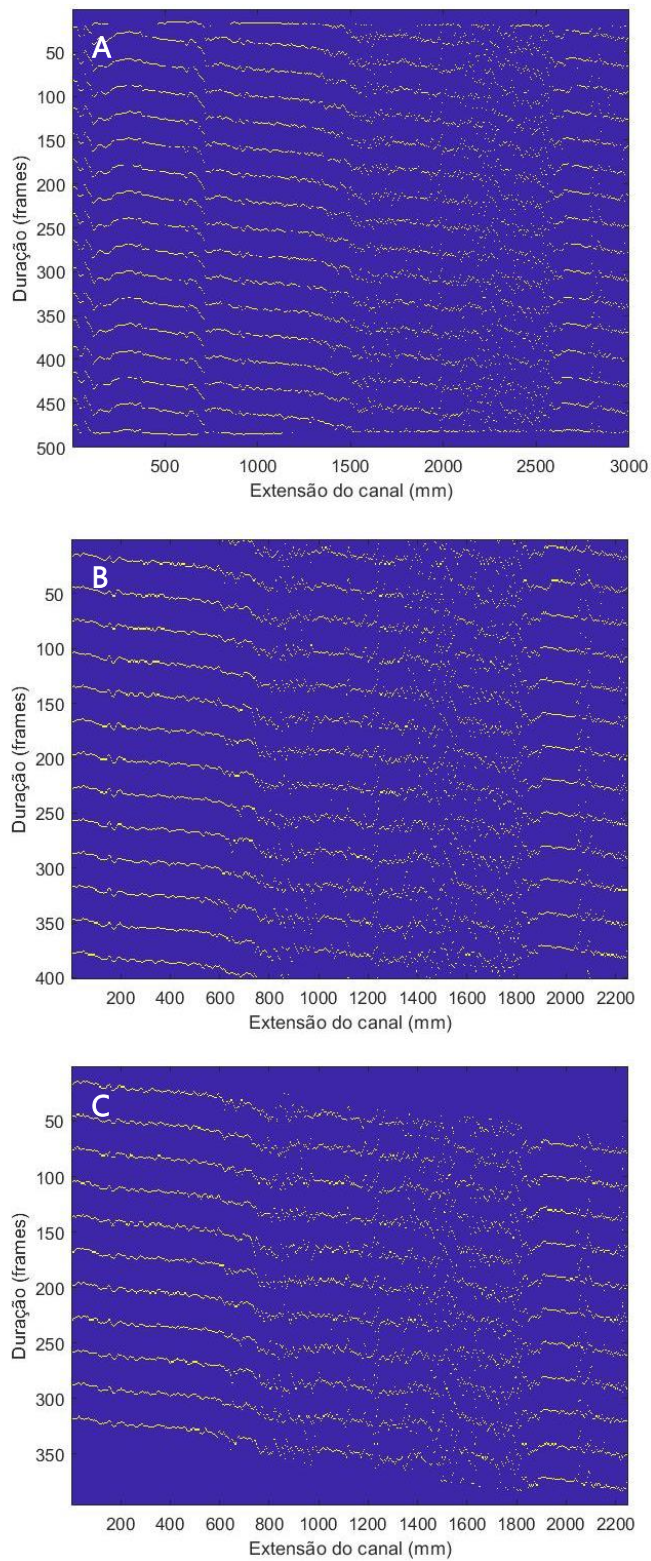


Figura 4.16- Exemplo de determinação das cristas das ondas (A) da *timestack*, (B) sem perturbações e (C) com a propagação visível do início ao fim da zona em análise.

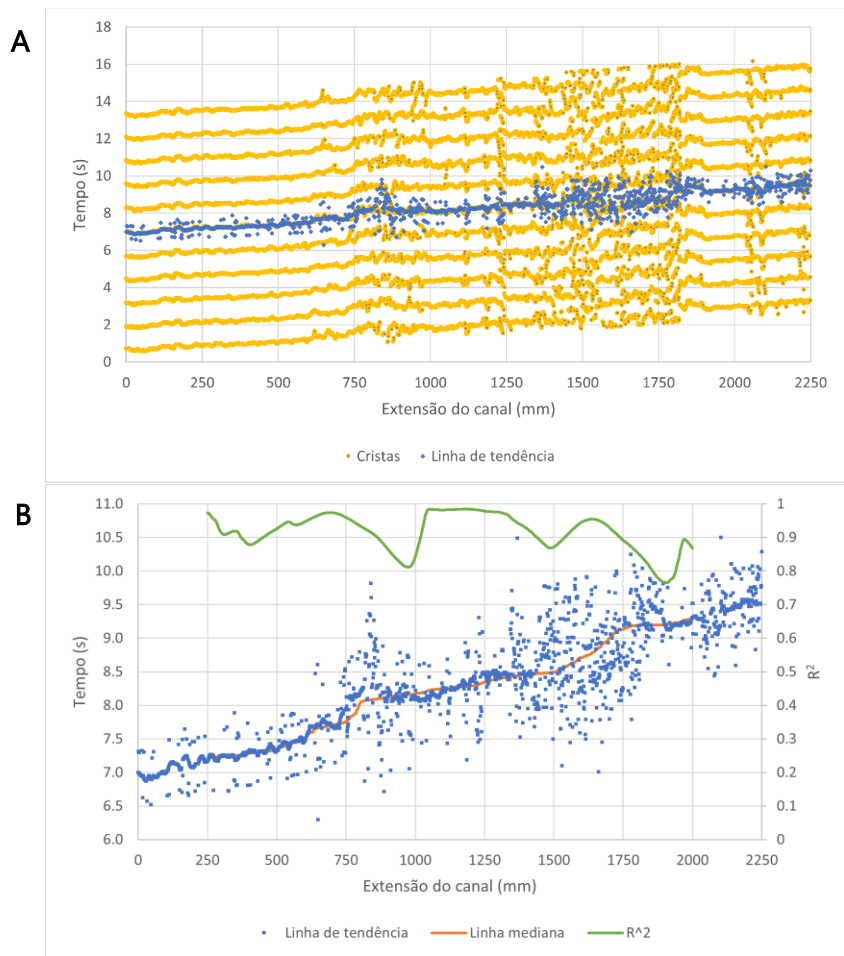


Figura 4.17- Exemplos de uma linha de tendência: (A) de todas as trajetórias das cristas; e (B) regularizada com uma linha mediana para um intervalo de 500 mm.

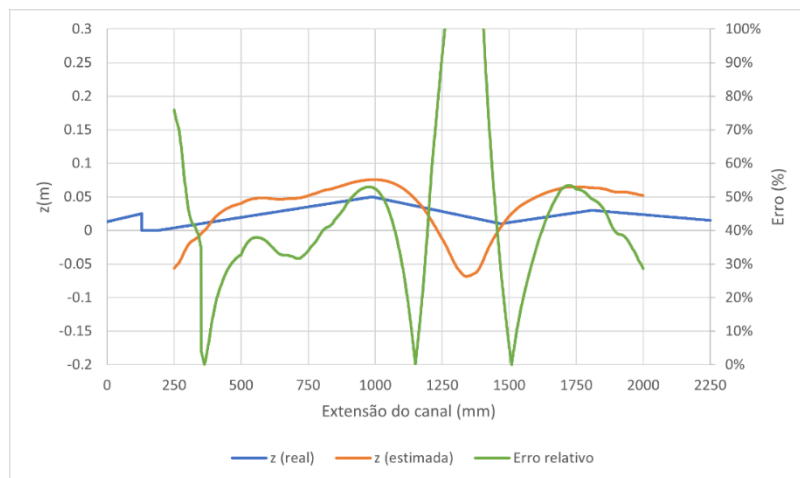


Figura 4.18- Exemplo de resultado de  $z$  para um ensaio com fundo móvel.

## 4.3 Estudo de sensibilidade à luz

Pretende-se neste subcapítulo apresentar a sensibilidade dos resultados à luz, permitindo concluir qual a melhor condição de luz a utilizar neste trabalho.

Os ensaios do estudo de sensibilidade à luz foram realizados todos com as mesmas características de onda. Para estes ensaios foi utilizada uma distância ao eixo de rotação do batedor de 3,5 cm, uma profundidade constante ( $h$ ) de 10,9 cm, uma altura de onda ( $H$ ) de 3,6 cm, um comprimento de onda ( $\lambda$ ) de aproximadamente 0,67 m e um período ( $T$ ) entre cristas de aproximadamente 0,75 s.

Foram analisadas diferentes condições de ensaio, no que se refere à luz, incluindo luz natural e/ou luz artificial ou ausência de ambas, como se descreve nos seguintes pontos.

### 4.3.1 Ausência de luz natural e artificial tipo 1

Neste ensaio deixou-se que a luz natural incidisse apenas numa zona do canal, deixando a cortina mais próxima da câmara aberta e as restantes fechadas. Isso possibilita a simulação de uma situação intermédia entre a ausência e a presença de luz natural.

Na Figura 4.19 apresenta-se a *timestack* obtida para este ensaio, com uma duração de ensaio de 298 frames, ou seja, 12,4 s. Da Figura 4.20 à Figura 4.22, apresentam-se os resultados obtidos relativos ao período, comprimento de onda e cota de ensaio para toda a extensão do canal.

Como se pode observar na Figura 4.20, os valores estimados de  $T$  variam ligeiramente relativamente ao valor esperado de 0,75 s, com erros relativos maioritariamente abaixo dos 3 %. Contudo, considerando um período constante para o cálculo das cotas ao longo do canal, obtido a partir da mediana das estimativas de  $T$ , obtém-se praticamente 0,75 s, indo de encontro ao valor esperado.

Na Figura 4.21, o valor mediano de  $\lambda$  é de 0,70 m, sendo um pouco superior ao valor esperado de 0,67 m. No entanto, o erro relativo dos valores estimados ao longo do canal são sempre inferiores a 15 % face ao espectável. Observa-se que, nas extremidades do canal (nos intervalos de [0, 650] e [2600, 3500] mm), o valor estimado é sempre inferior ao valor esperado com um erro relativo sempre inferior a 5 % e, na zona intermédia ([650, 2600] mm), esse valor é sempre superior ao valor esperado, com um erro relativo máximo de 15% aos 1500 mm.

Da obtenção de  $T$  e da variação de  $\lambda$  ao longo do canal, apresentam-se os resultados das cotas de ensaio na Figura 4.22. À semelhança da flutuação de  $\lambda$ , pode observar-se que os

valores de  $z$  na zona central do canal ([550, 2850] mm) são sempre superiores ao valor real, com um erro relativo máximo de 50 % aos 1500 mm de extensão do canal. Nas extremidades do canal ([0, 550] e [2850, 3500] mm), verifica-se o oposto com erros relativos quase sempre abaixo dos 10 %.

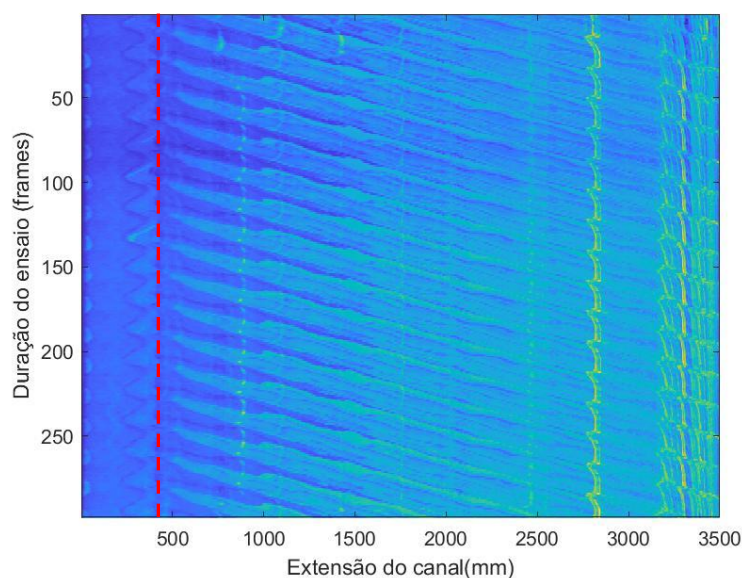


Figura 4.19- *Timestack* para o ensaio de ausência de luz natural e artificial tipo 1.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do baterdor.

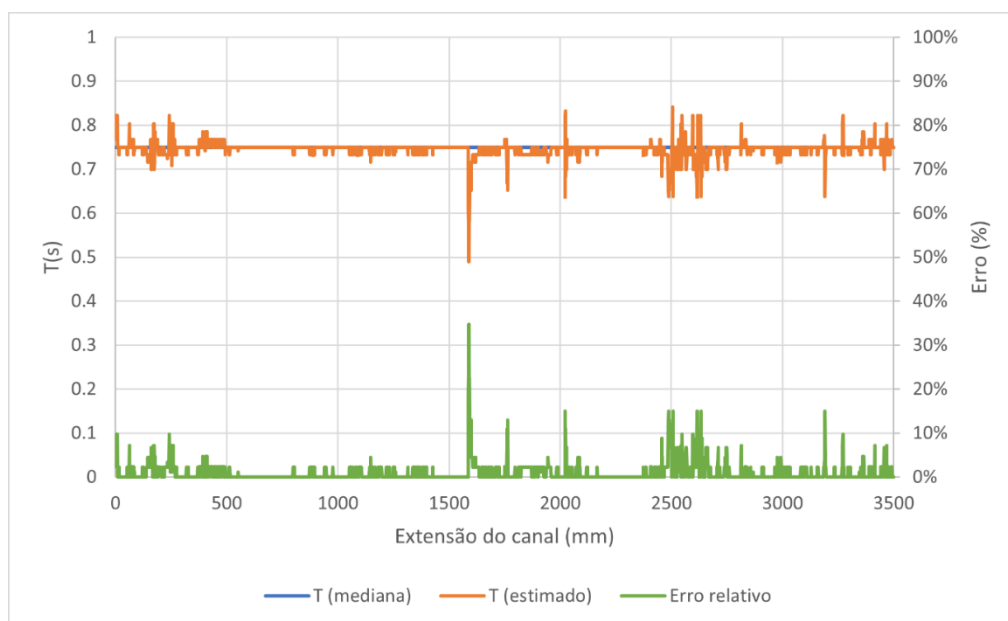


Figura 4.20- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 1.

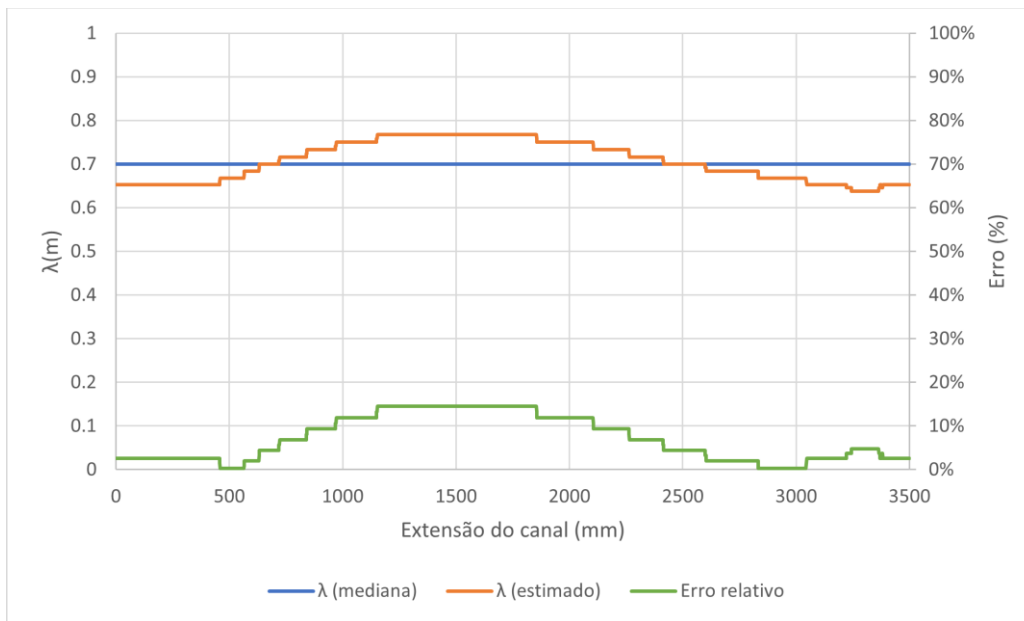


Figura 4.21- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 1.

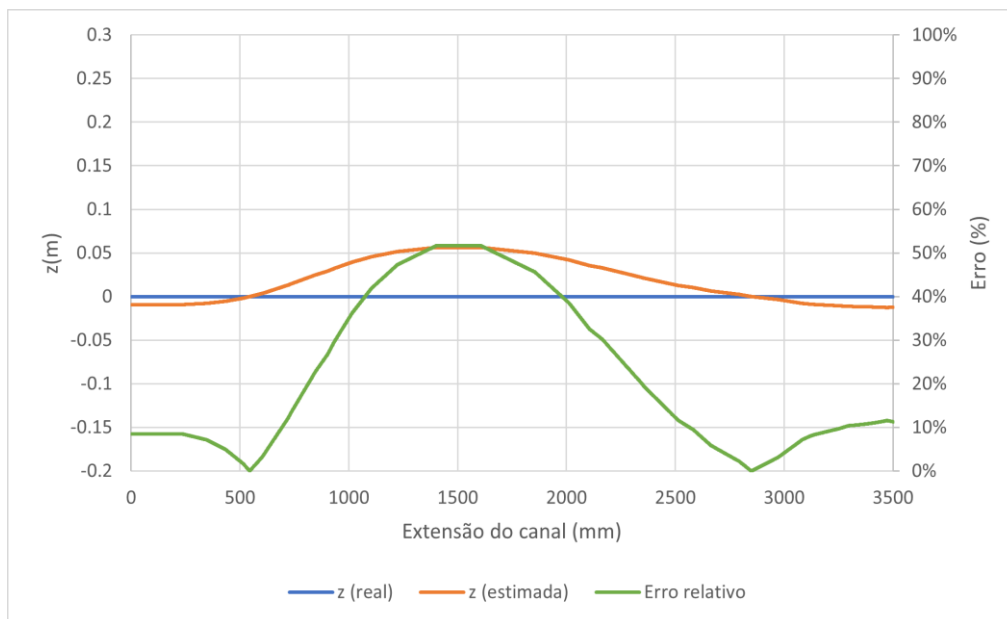


Figura 4.22- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 1.

### 4.3.2 Ausência de luz natural e artificial tipo 2

Neste ensaio não existiu a presença de luz natural a incidir diretamente sobre o canal, vinda do vão adjacente a este, nem foi considerada luz artificial incidente direta sobre o mesmo.

Na Figura 4.23 apresenta-se a *timestack* resultante deste ensaio. No eixo vertical apresenta-se uma duração do ensaio de 7,2 s (173 *frames*). O tempo de gravação deste ensaio para além de ter sido o mais curto para o estudo de sensibilidade à luz, tem nos segundos iniciais a onda ainda pouco desenvolvida. Nas Figura 4.24 a Figura 4.26, apresentam-se os resultados das características das ondas para este ensaio.

Relativamente aos resultados de  $T$ , pode observar-se na Figura 4.24, que o valor mediano de 0,73 s é ligeiramente inferior ao esperado. Os valores estimados, até praticamente aos 1500 mm iniciais da extensão do canal, têm maioritariamente um erro inferior a 5 %, piorando pontualmente até aos 2900 mm de canal com erros relativos a chegarem aos 40 %. Na extremidade final [2900, 3500] mm, os valores de  $T$  estão totalmente fora dos valores esperados, coincidindo com a interferência da coloração na *timestack* nessa zona.

Na Figura 4.25, estão presentes os resultados dos valores de  $\lambda$ , com um valor mediano de 0,62 m (5 cm de diferença para o  $\lambda$  esperado), e valores estimados com erros abaixo dos 10 % em todo o canal, à exceção do troço central entre os 850 e os 2200 mm com erros relativos médios de 30 %.

Nos resultados de  $z$  (Figura 4.26), pode observar-se que os valores estimados estão todos abaixo do nível de referência com uma diferença média de 2 cm entre a cota real (erro relativo de 20 %), à exceção do troço central (dos 1200 aos 1600 mm) com um erro relativo de 10 %.

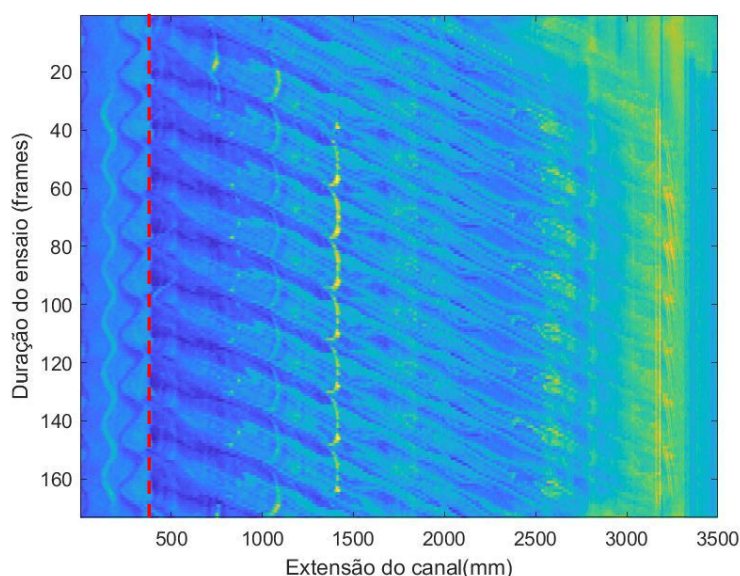


Figura 4.23- *Timestack* para o ensaio de ausência de luz natural e artificial tipo 2.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

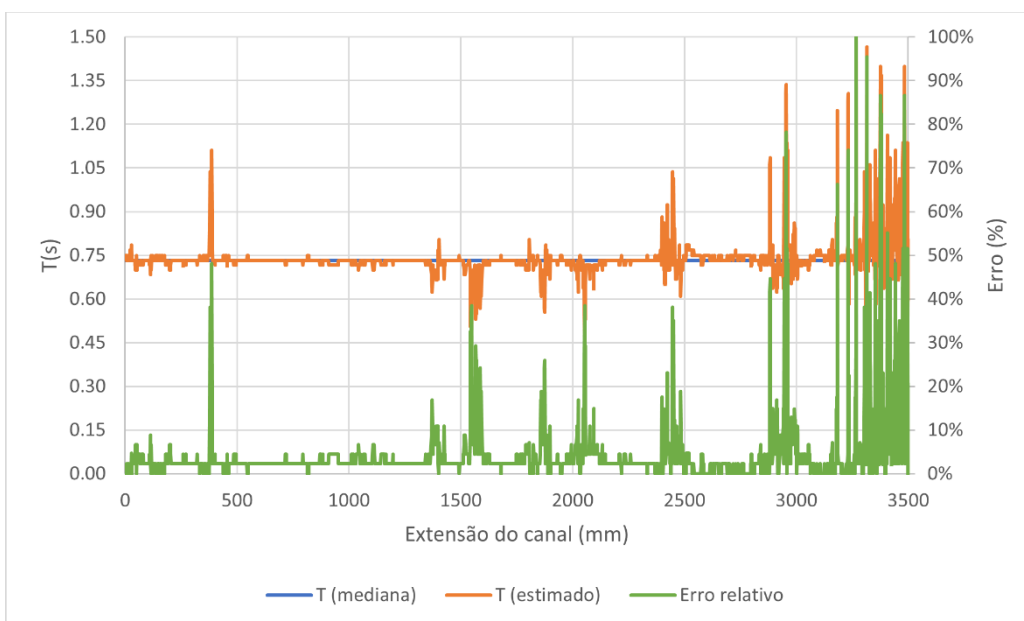


Figura 4.24- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 2.

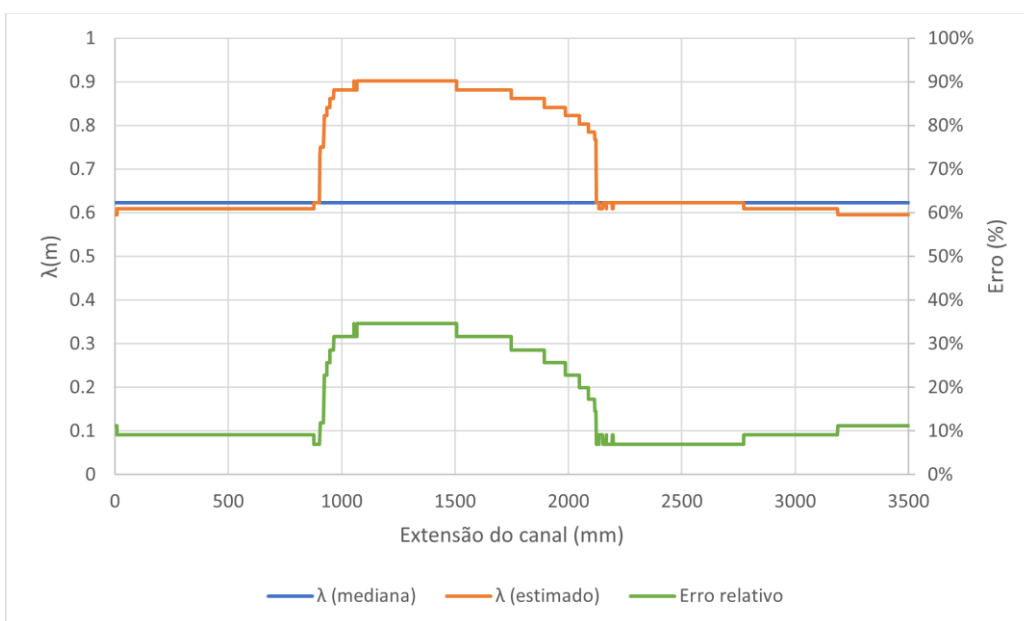


Figura 4.25- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 2.

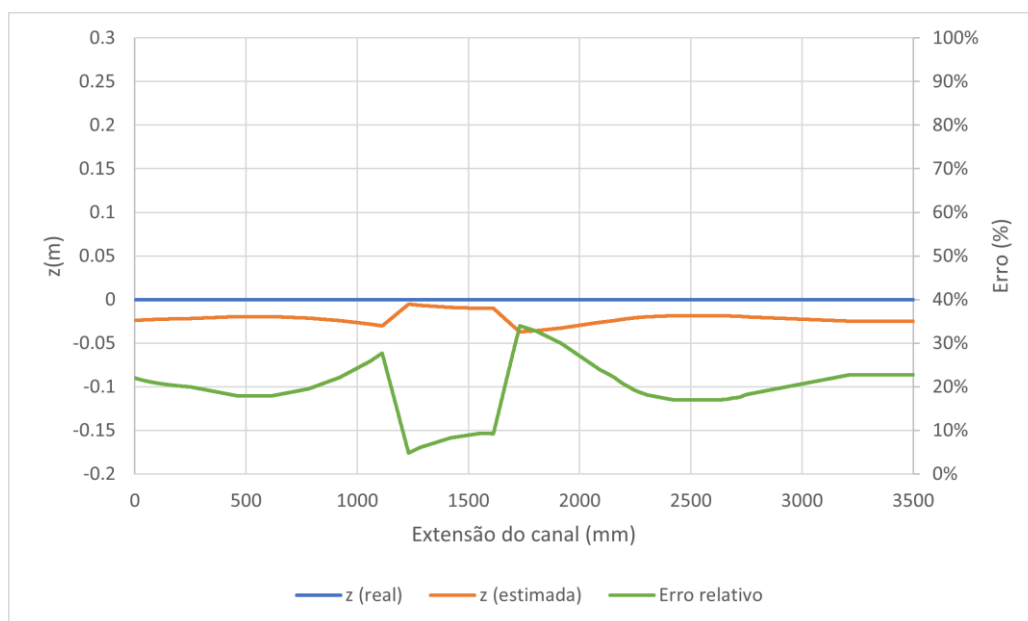


Figura 4.26- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio com ausência de luz natural e artificial tipo 2.

### 4.3.3 Presença de luz natural

Neste ensaio todas as cortinas estavam abertas, permitindo a incidência de luz natural sobre o canal, não contando neste ensaio com a presença de luz artificial.

Na Figura 4.27 apresenta-se a *timestack* para este ensaio, que teve uma duração total de 8,2 s (197 frames). Da Figura 4.28 à Figura 4.30, apresentam-se os resultados das características das ondas provenientes da análise dessa *timestack*.

No que diz respeito às estimativas dos valores de  $T$ , pode observar-se na Figura 4.28 que, novamente, a grande maioria dos valores não ultrapassa os 3 % de erro, exceto pontualmente em algumas zonas do canal. No entanto, o valor mediano (0,73 s) é um pouco inferior ao valor esperado.

Para os resultados de  $\lambda$ , pode observar-se que em grande parte os valores de  $\lambda$  nunca ultrapassam os 5 % de erro, sendo este erro unicamente superior a esse valor no trecho dos 400 aos 1800 mm da extensão de canal, mas nunca ultrapassando os 15 %. O valor mediano de  $\lambda$  é para este ensaio igual a 0,68 m (Figura 4.29).

Analisando os valores de  $z$  da Figura 4.30, compreende-se que na extremidade final do canal a qualidade dos resultados obtidos sejam muito precisos, com erros relativos perto de 0 % entre os 2500 e os 3200 mm e inferiores a 5 % nos últimos 1200 mm de canal. No entanto, nas restantes zonas do canal a cota observada nunca toma erros de valores inferiores a 10 %

e esse valor tende a aumentar nos primeiros 1100 mm atingindo uma diferença máxima de 8 cm (erro de 74 %).

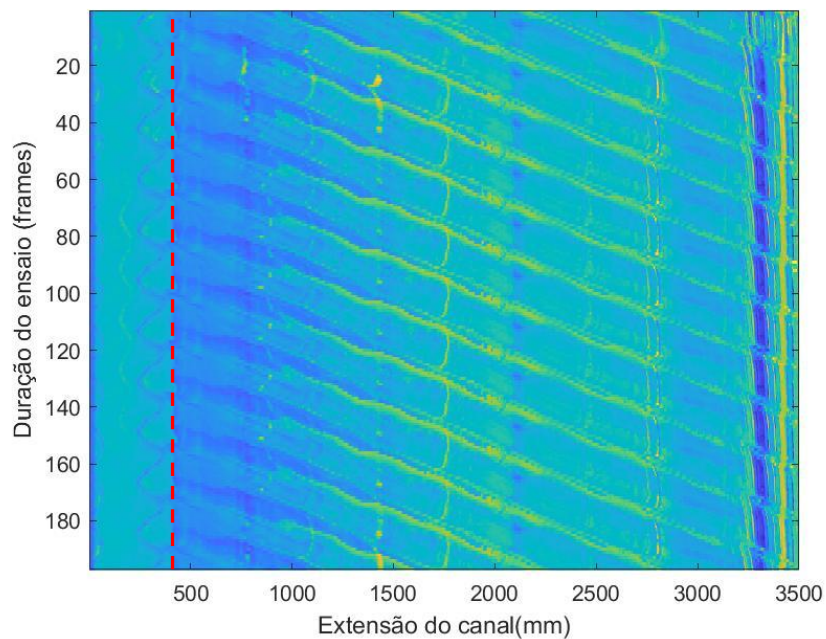


Figura 4.27- *Timestack* para o ensaio de presença de luz natural. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

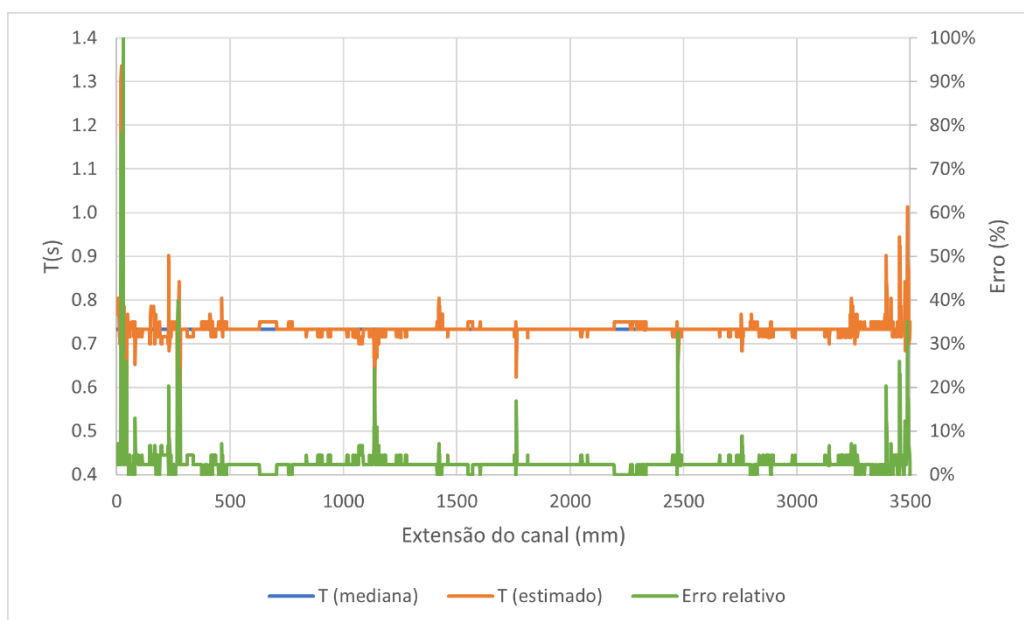


Figura 4.28- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio presença de luz natural.

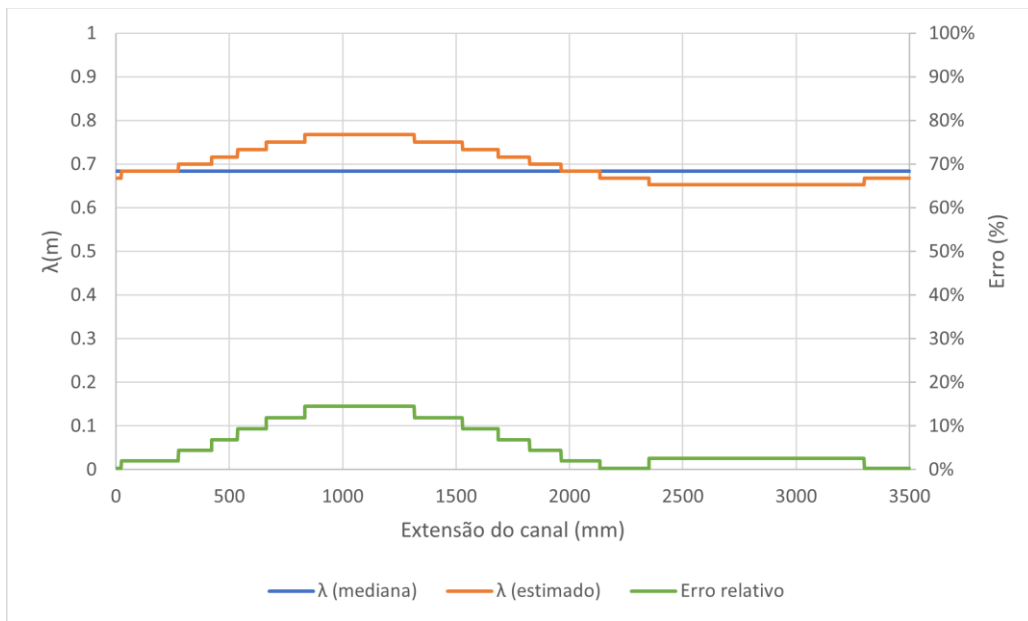


Figura 4.29- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural.

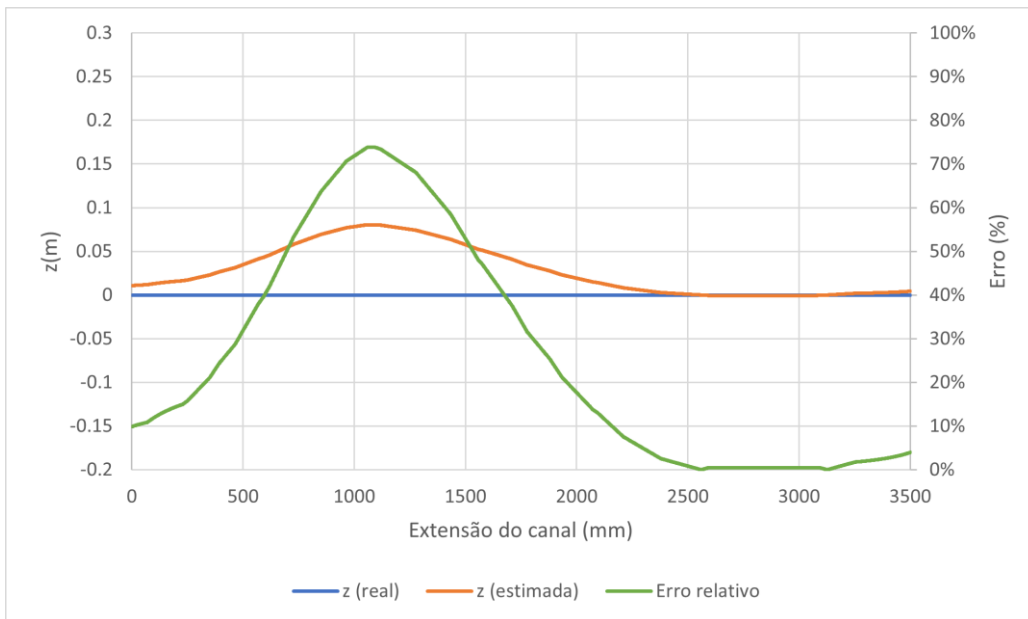


Figura 4.30- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural.

#### 4.3.4 Presença de luz artificial

Neste ensaio somente a luz artificial foi considerada, mantendo todas as cortinas adjacentes ao canal fechadas, garantindo somente a incidência de luz artificial sobre o canal.

Na Figura 4.31 apresenta-se a *timestack* resultante deste ensaio. Nela pode observar-se que a gravação do ensaio teve uma duração total de 14,0 s (335 *frames*), sendo o ensaio com

maior duração de gravação. Já nas restantes figuras (Figura 4.32 a Figura 4.34), apresentam-se os resultados associados às características das ondas, à semelhança dos ensaios anteriores.

Neste ensaio, o valor mediano de  $T$  (Figura 4.32) tem, também à semelhança com o primeiro ensaio aqui apresentado, um valor equivalente ao de  $T$  esperado (0,75 s). Os erros associados aos períodos estimados tomam também valores quase sempre inferiores a 3 %, exceto zonas pontuais.

Relativamente aos valores de  $\lambda$ , os resultados presentes na Figura 4.33 apresentam ser também aceitáveis, com erros sempre inferiores a 5 % em toda a extensão do canal, exceto na zona central (entre os primeiros 750 e os 2300 mm), à semelhança com os valores de  $\lambda$  apresentados no primeiro ensaio. Nessa zona central, o erro relativo tende para um máximo pouco inferior a 15 % localizado na posição 1500 deste canal. O valor mediano de  $\lambda$  é também igual a 0,68 m, à semelhança com o ensaio anterior, valor que é muito próximo do  $\lambda$  esperado para este ensaio.

Já na Figura 4.34, observa-se na extremidade do canal mais próxima da câmara um erro relativo próximo dos 10 % (entre os 2300 e os 3500 mm) e, na extremidade oposta, erros relativos nunca superiores a 2 % nos primeiros 500 mm de extensão do canal. Na restante extensão do canal, a diferença entre a cota real e a cota estimada tende a aumentar para um máximo de 5 cm (erro equivalente a 50 %) nos primeiros 1500 mm.

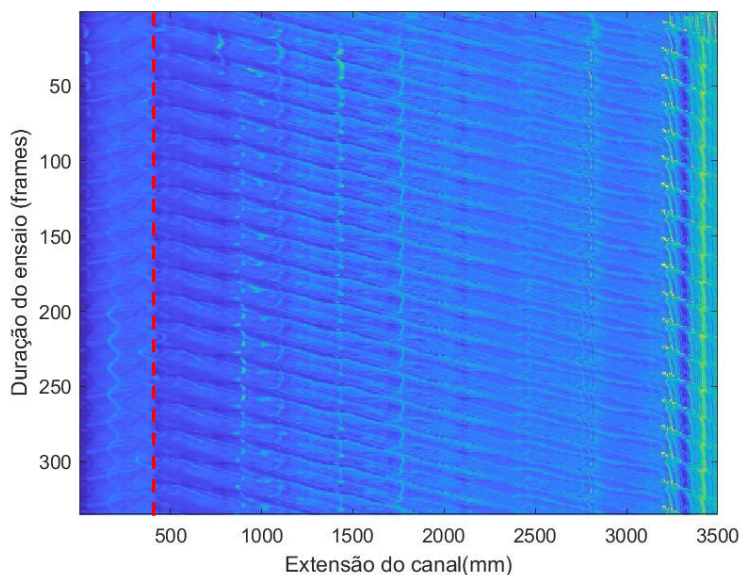


Figura 4.31- *Timestack* para a presença de luz artificial.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bater.

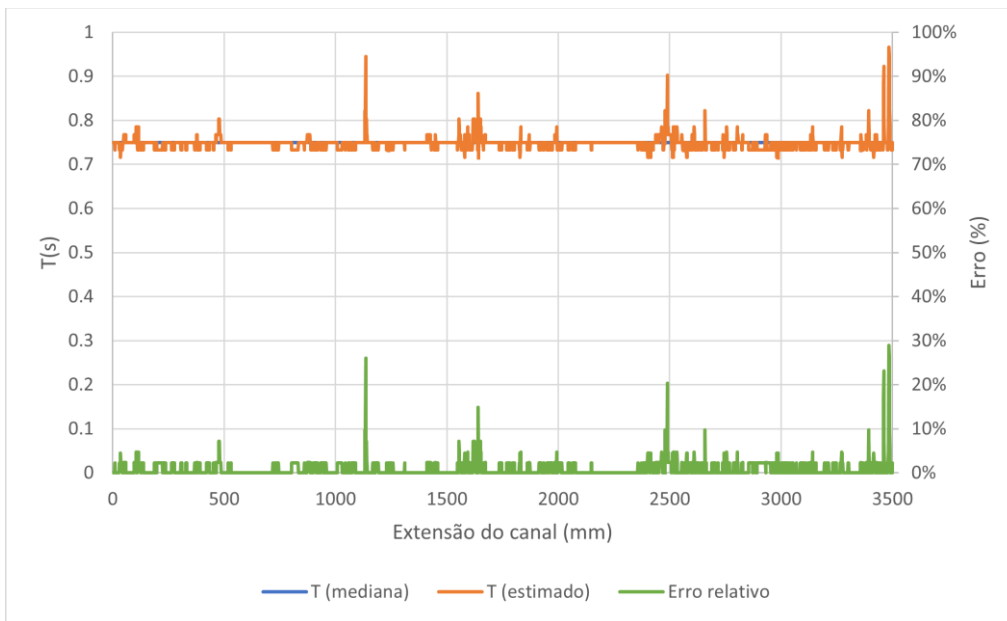


Figura 4.32- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio presença de luz artificial.

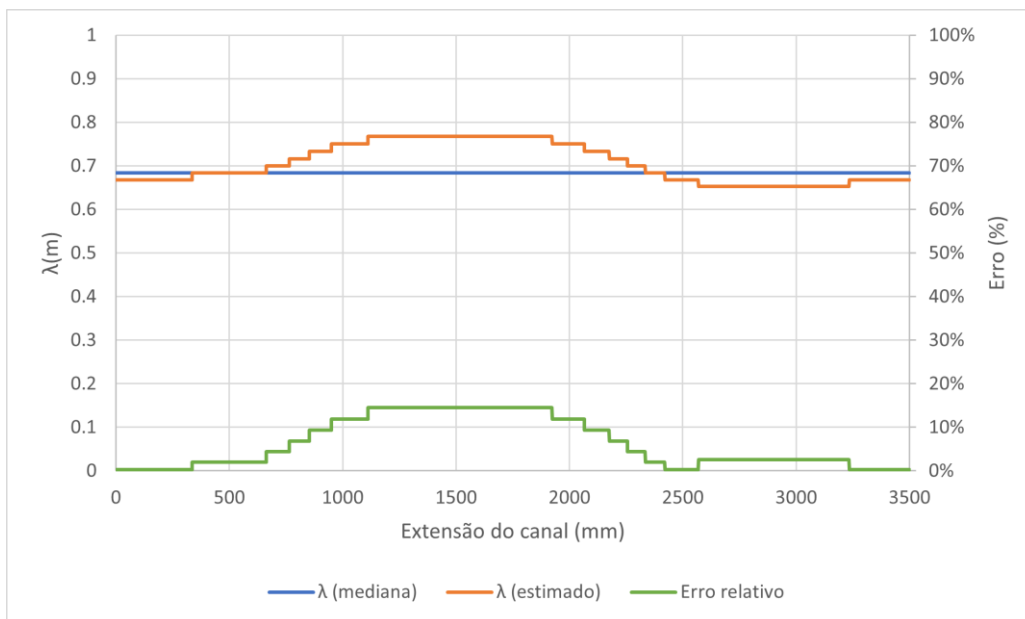


Figura 4.33- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio com presença de luz artificial.

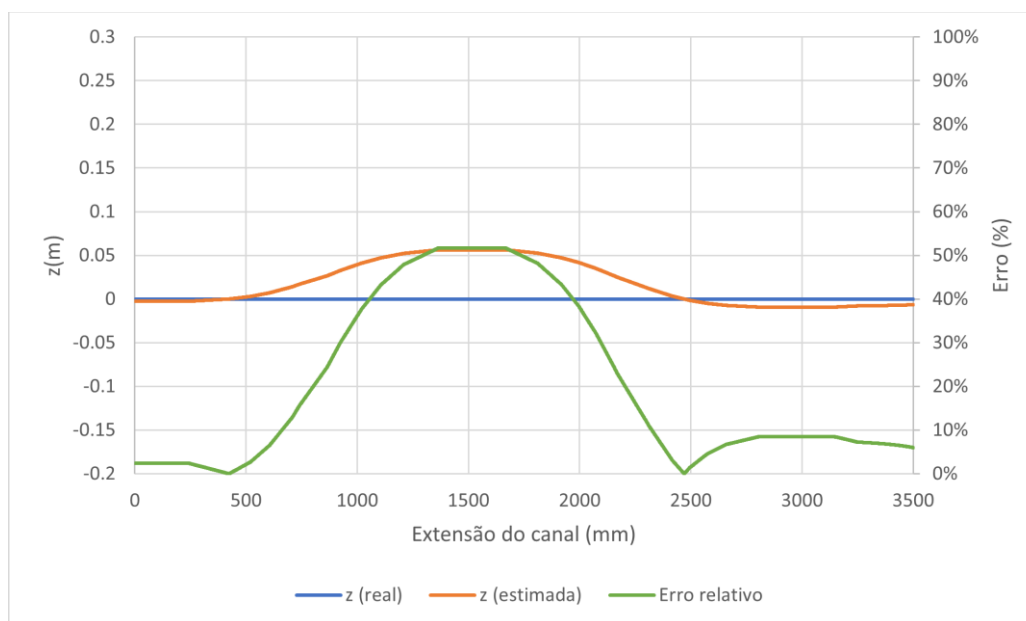


Figura 4.34- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio com presença de luz artificial.

### 4.3.5 Presença de luz natural e artificial

Neste ensaio a presença conjunta de luz natural e artificial foi tida em conta, sendo este ensaio o que tem maior nível de luminosidade possível a incidir sobre o canal.

Na Figura 4.35 apresenta-se a *timestack* resultante deste ensaio, que teve neste caso uma duração de gravação de 13,3 s (319 *frames*). Nas restantes figuras deste subcapítulo (Figura 4.36 a Figura 4.38), apresentam-se os resultados obtidos para as características das ondas neste ensaio.

À semelhança do primeiro e penúltimo ensaio apresentados para o estudo de sensibilidade à luz, neste ensaio também se consegue observar na Figura 4.36 que o valor mediano de  $T$  corresponde na prática ao valor esperado de 0,75 s, obtido na observação das imagens laterais do ensaio. Os valores estimados têm na sua maioria um erro associado inferior a 3 %.

Relativamente aos resultados de  $\lambda$ , estes também têm à semelhança com quase todos os resultados de  $\lambda$  apresentados nos subcapítulos anteriores, valores de  $\lambda$  estimados com um erro inferior a 5 % em quase toda a extensão do canal, à exceção do intervalo entre os primeiros 400 e os 1750 mm de canal. Aí, a diferença entre o valor esperado e o valor estimado tende a aumentar perto dos primeiros 1000 mm, com um erro associado inferior a 15 %. O valor mediano de  $\lambda$  (0,68 m) neste ensaio tem também uma diferença de 1 cm face ao valor esperado, equiparando-se aos resultados dos últimos dois ensaios apresentados.

Na última figura deste ensaio (Figura 4.38), estão presentes os resultados de  $z$ , onde se consegue observar que na zona do canal se encontram as maiores diferenças entre o valor real de  $z$  e o valor estimado, coincidindo com a zona de maiores erros observados sobre os resultados de  $\lambda$  (entre os primeiros 400 e os 1800 mm de canal). Nessa zona, as diferenças entre a cota real e a cota estimada tendem a aumentar até um máximo de 5 cm (erro pouco superior a 45 %), novamente perto dos primeiros 1000 mm de extensão do canal. Já nas extremidades do canal ([0, 400] e [1800, 3500] mm) o valor de  $z$  nunca assume erros superiores a 10 %.

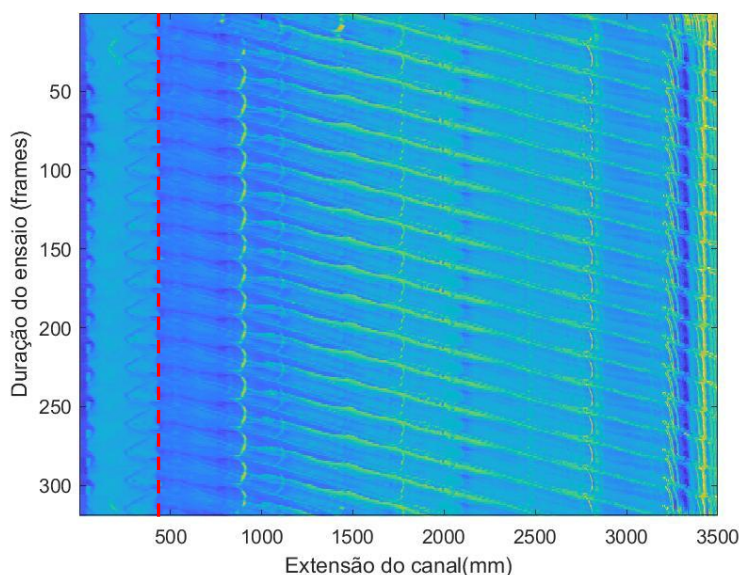


Figura 4.35- *Timestack* para o ensaio de presença de luz natural e artificial. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

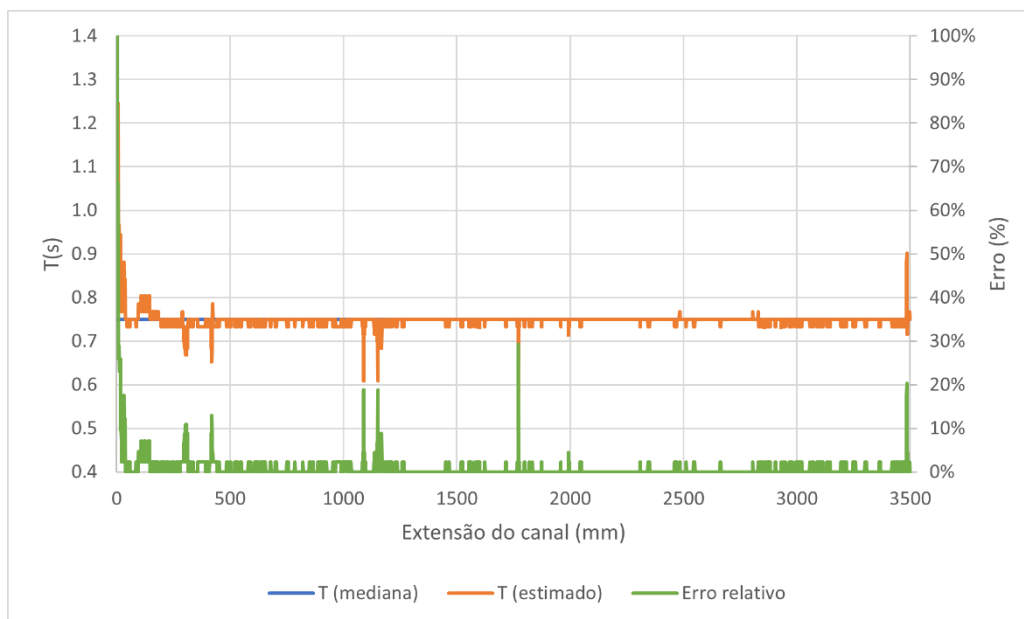


Figura 4.36- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio presença de luz natural e artificial.

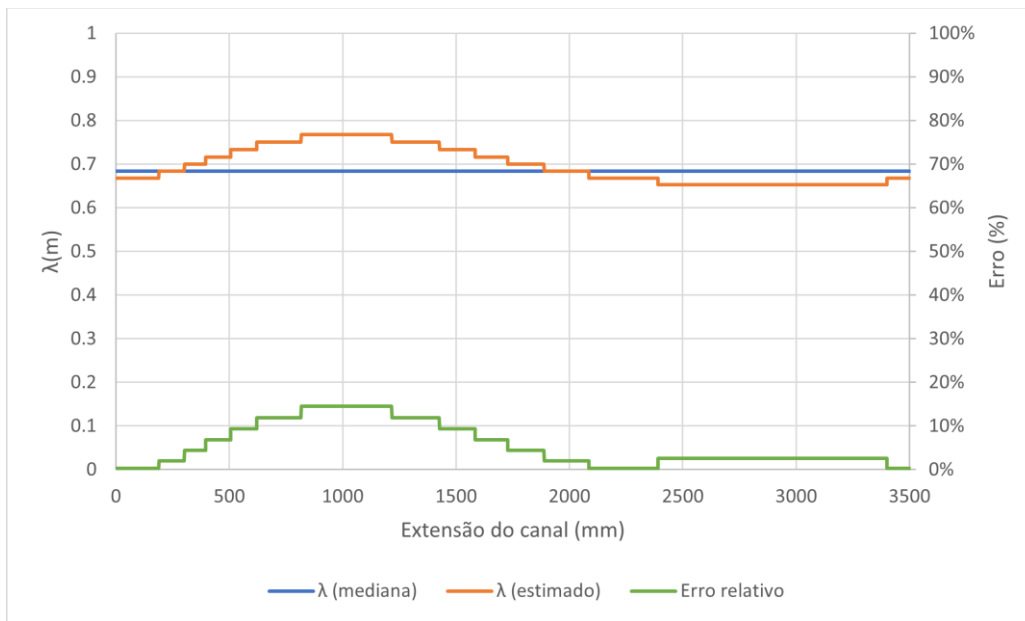


Figura 4.37- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural e artificial.

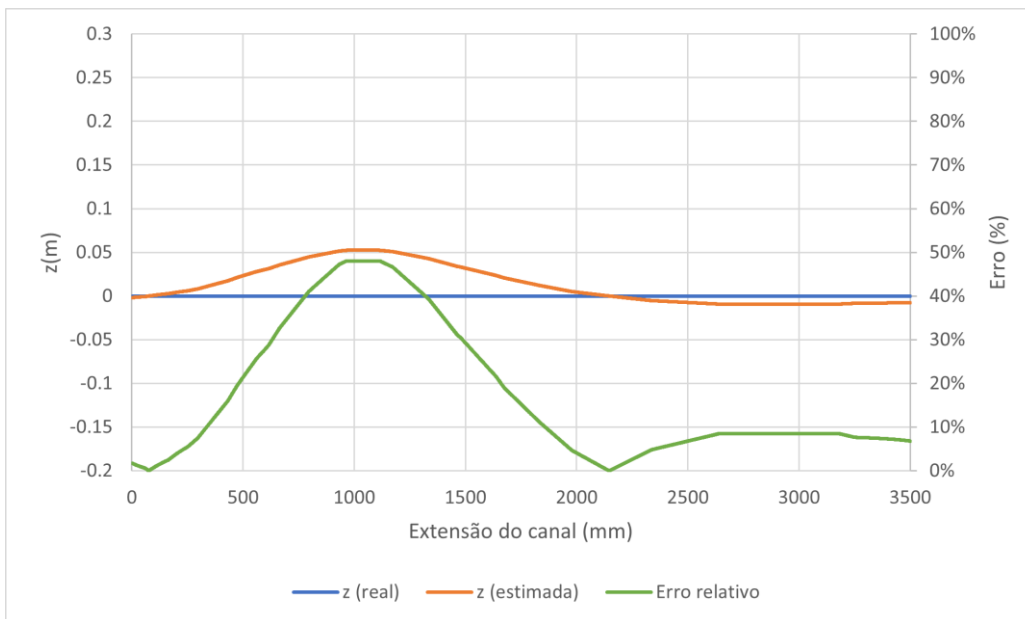


Figura 4.38- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio com presença de luz natural e artificial.

### 4.3.6 Súmula dos resultados obtidos

Tendo em consideração todos os resultados obtidos neste estudo de sensibilidade à luz e sintetizados na Tabela 4.1, pode observar-se que, para os valores esperados de  $T$  de 0,75 s e  $\lambda$  de 0,67 m, os ensaios com melhores resultados são os com presença de luz artificial e natural incidentes diretamente sobre o canal. No entanto, sendo o objetivo deste trabalho a detecção

da batimetria, é do maior interesse que o ensaio que apresente as melhores estimativas da batimetria real neste estudo de sensibilidade à luz, seja considerado o que tem as melhores condições de luminosidade. Entre todos os ensaios apresentados anteriormente, seria correto concluir que a melhor condição de luminosidade seria a apresentada no ensaio de presença de luz natural, graças ao reduzido erro encontrado na zona mais próxima à câmara (entre os 2500 e os 3500 mm). No entanto, o ensaio da presença de luz natural e artificial é o que, em termos globais, apresenta melhores estimativas da cota real e com um erro máximo de  $z$  inferior em 20 % quando comparado com o ensaio de presença de luz natural. Acresce ainda o facto de que o período  $T$  estimado no último ensaio corresponde, na prática, ao período esperado, o que não acontece no ensaio de presença de luz natural. No entanto, uma questão que não foi tida em conta neste trabalho foi o facto de a duração de gravação entre ensaios poder influenciar ou não a melhoria de resultados, na medida em que, existindo um maior número de dados disponíveis, possivelmente se poderia chegar ou não a uma melhor aproximação dos resultados esperados. Apesar desta última nota, pode-se concluir que a **presença de luz natural e artificial** correspondeu à melhor condição de luminosidade possível no laboratório, sendo esta a condição de iluminação usada em todos os ensaios que serão aqui apresentados.

Quaisquer outras informações sobre o ensaio podem ser consultadas na ficha de ensaios presente no Anexo 2.

Tabela 4.1- Síntese dos resultados do estudo de sensibilidade à luz.

Ensaio	$T$ (s) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo de $T$ (-)	$\lambda$ (m) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo de $\lambda$ (-)	$\Sigma$ erro relativo de $z$ (-)	Duração do ensaio (s)
Ausência de luz natural e artificial tipo 1	0,75	33,53	0,70	245,14	779,61	12,4
Ausência de luz natural e artificial tipo 2	0,73	150,72	0,62	567,39	690,42	7,2
Presença de luz natural	0,73	96,13	0,68	206,72	877,77	8,2
Presença de luz artificial	0,75	28,89	0,68	220,94	728,27	14,0
Presença de luz natural e artificial	0,75	<b>31,77</b>	0,68	<b>194,78</b>	<b>607,39</b>	13,3

A negrito assinalam-se os menores erros acumulados.

## 4.4 Ensaios de fundo fixo

Definida a melhor condição de luz (presença de luz natural e artificial), pretende-se agora avaliar a capacidade da metodologia adotada em Santos *et al.* (2022b) em detetar as variações das características das ondas através de vários ensaios mantendo a batimetria original do canal (fundo plano e fixo). Entre esses ensaios, pretende-se estudar nos subcapítulos que se seguem:

- A influência da variação do período da onda;
- A influência da variação da profundidade;
- A influência da variação da altura de onda.

### 4.4.1 Influência do período de onda

Neste subcapítulo pretende-se avaliar a capacidade, do algoritmo utilizado, em detetar as variações do período das ondas impostas pela variação da frequência do batedor em todos os ensaios. Permaneceram constantes em cada ensaio as seguintes condições: profundidade ( $h$ ) de 13,3 cm e uma distância ao eixo de rotação do batedor de 3,5 cm.

Em simultâneo, pretende-se definir qual o período,  $T$ , que cada frequência do batedor produz, verificando se a frequência do batedor corresponde à frequência em Hz ou rad/s.

#### 4.4.1.1 Período de 0,79 s

Os ensaios iniciaram-se pela frequência do batedor mais elevada que, neste caso, correspondeu a um período de onda ( $T$ ) de 0,79 s e um comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 0,79 m.

Na Figura 4.39 apresenta-se a *timestack* obtida, onde se demonstra que este ensaio teve uma duração de 9,4 s (*i.e.*, 226 *frames*). Na Figura 4.40 à Figura 4.42, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas.

Pode observar-se na Figura 4.40, que o  $T$  estimado toma na sua grande maioria erros relativos da ordem dos 2 %, exceto em algumas zonas pontuais. O valor mediano de  $T$  corresponde na prática ao  $T$  observado nas imagens laterais (0,79 s).

Na Figura 4.41, apresentam-se os resultados de  $\lambda$ , onde o valor mediano de 0,86 m se afasta em 7 cm do valor esperado. Os resultados demonstram que mesmo assim na extensão do canal o erro relativo nunca toma valores superiores a 20 % e a 10 % nos últimos 2000 mm (aproximadamente) de extensão do canal.

Já na Figura 4.42, como se pode verificar, as cotas não demonstram resultados aceitáveis na maioria da extensão do canal, com erros relativos que podem chegar a 160 %. Só no troço entre os 1800 e os 2900 mm é que o erro relativo toma valores inferiores a 20 %.

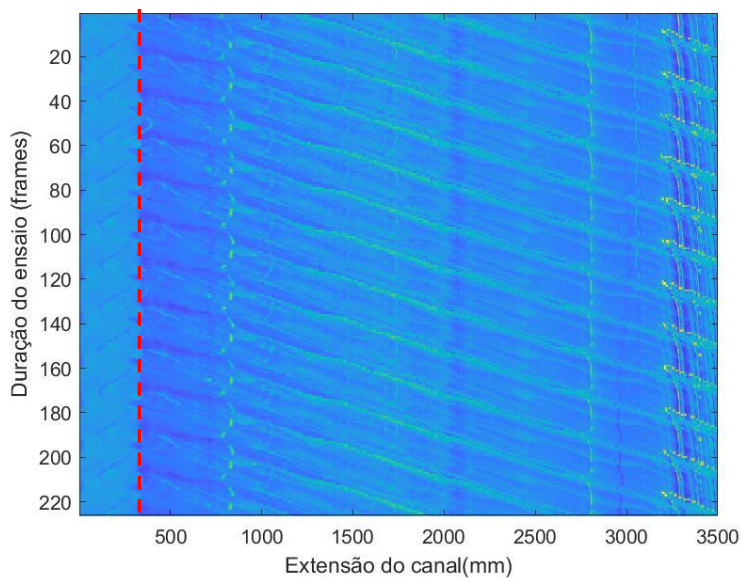


Figura 4.39- *Timestack* para o ensaio de período de 0,79 s.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

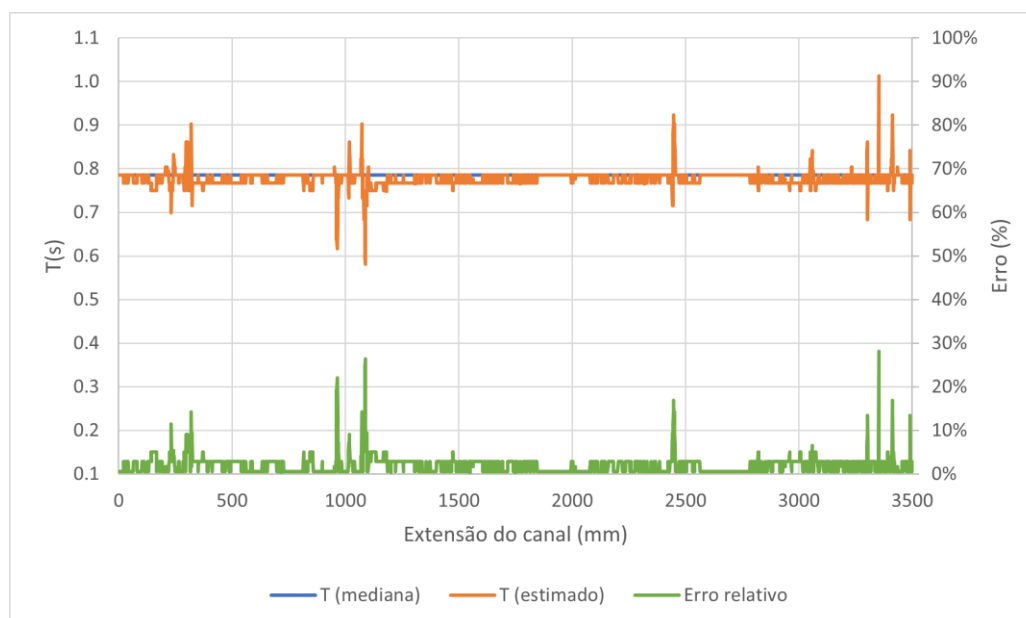


Figura 4.40- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de período de 0,79 s.

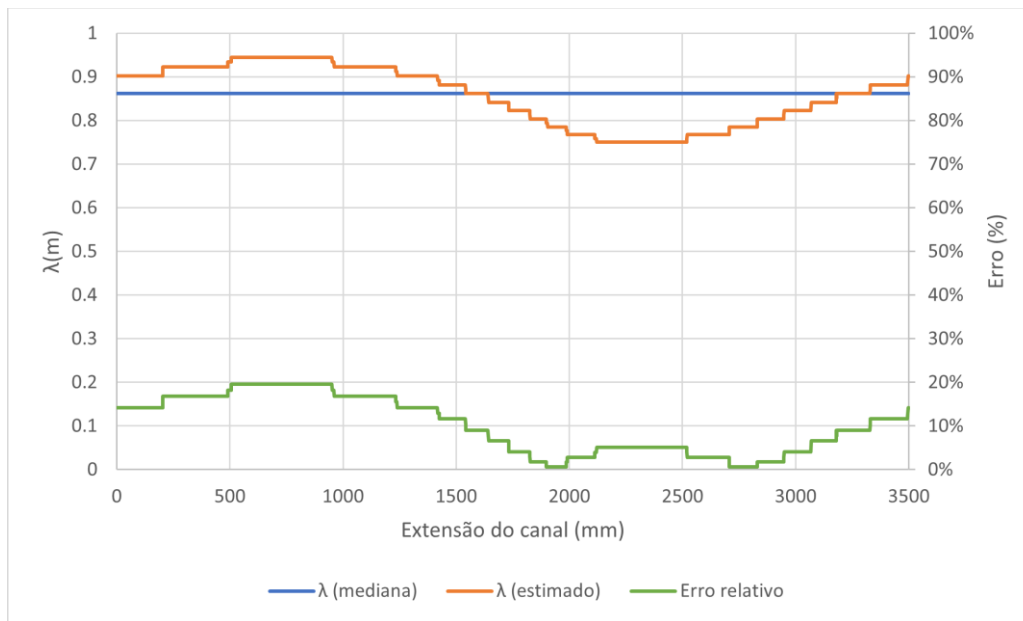


Figura 4.41- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de período de 0,79 s.

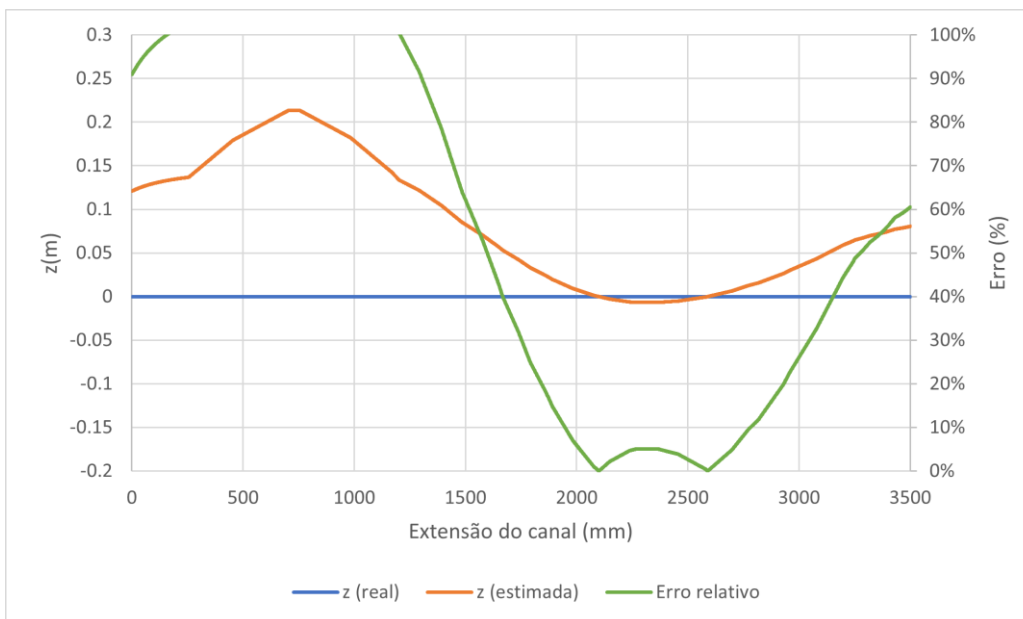


Figura 4.42- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de período de 0,79 s.

#### 4.4.1.2 Período de 0,88 s

Na Figura 4.43 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 10,0 s (241 *frames*). Nas Figura 4.44 a Figura 4.46, estão representados os resultados das características das ondas ao longo do canal para este ensaio. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados neste caso são, respetivamente, 0,88 s e 0,85 m.

Como se pode observar na Figura 4.44, os resultados de  $T$  tomam na sua maioria valores com erros da ordem dos 5 %. O valor mediano de  $T$  (0,84 s) difere em 4 s do valor esperado.

Na Figura 4.45, apresentam-se os resultados de  $\lambda$ . Pode observar-se que o valor mediano de  $\lambda$  (0,88 m) está um pouco acima do valor esperado. No entanto, os valores de  $\lambda$  estimados demonstram ter bons resultados em quase toda a extensão do canal com erros quase sempre na ordem dos 10 %. Excetuam-se os primeiros 700 mm onde  $\lambda$  estimado tende para valores sucessivamente maiores, relativamente ao aumento da distância à câmara.

Na Figura 4.46, as cotas observadas demonstram ter melhores resultados na extremidade mais próxima da câmara. Ainda assim, os erros máximos nessa zona do canal (últimos 1800 mm) são da ordem dos 16 % (abaixo de 3 cm de erro). Em termos globais, nos primeiros 1100 mm, o valor de  $z$  estimado pode diferir da cota real até cerca de 6 cm (erro de aproximadamente 45 %).

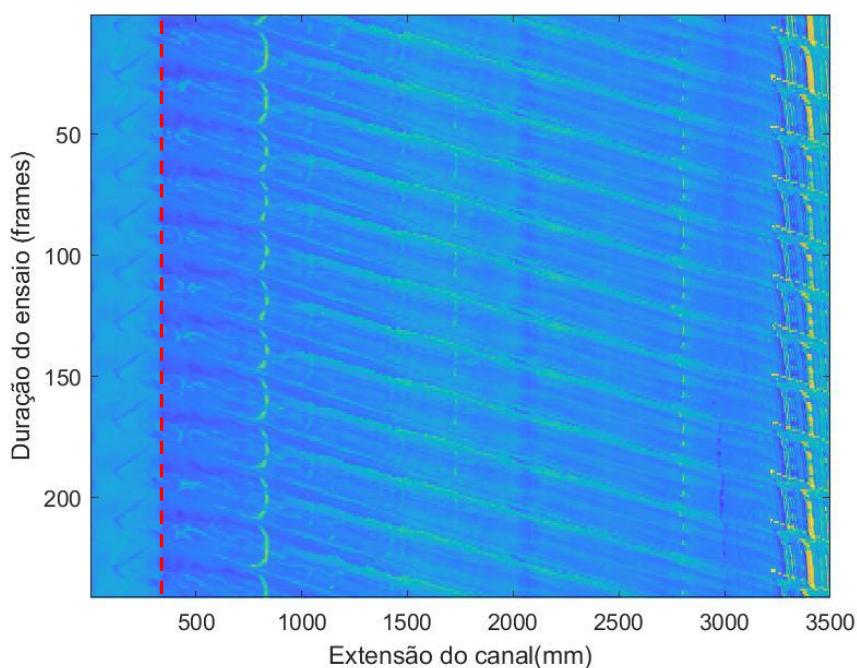


Figura 4.43- *Timestack* para o ensaio de período de 0,88 s.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bateror.

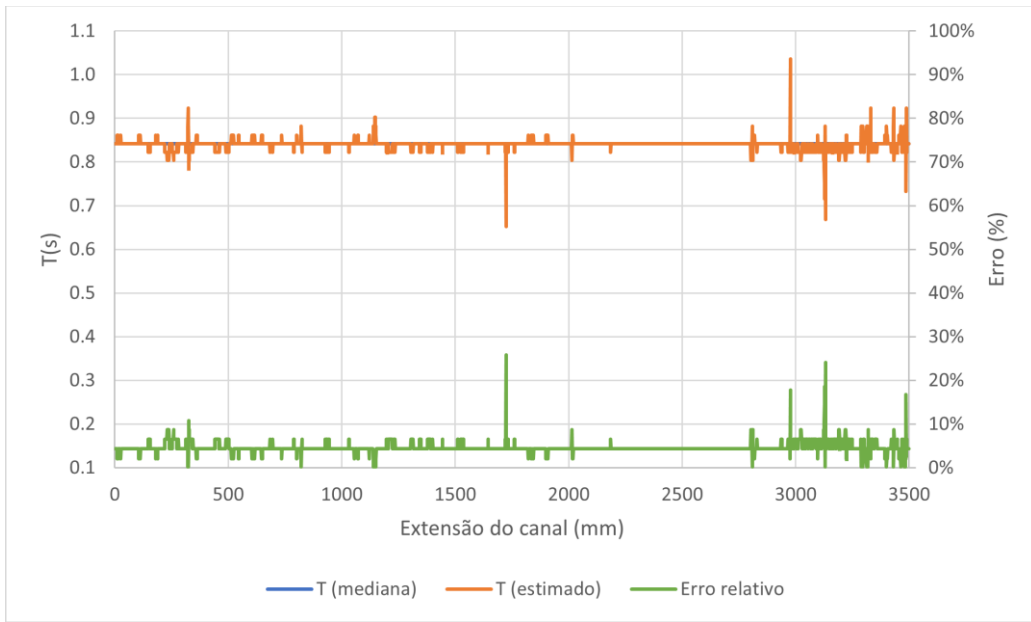


Figura 4.44- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de período de 0,88 s.

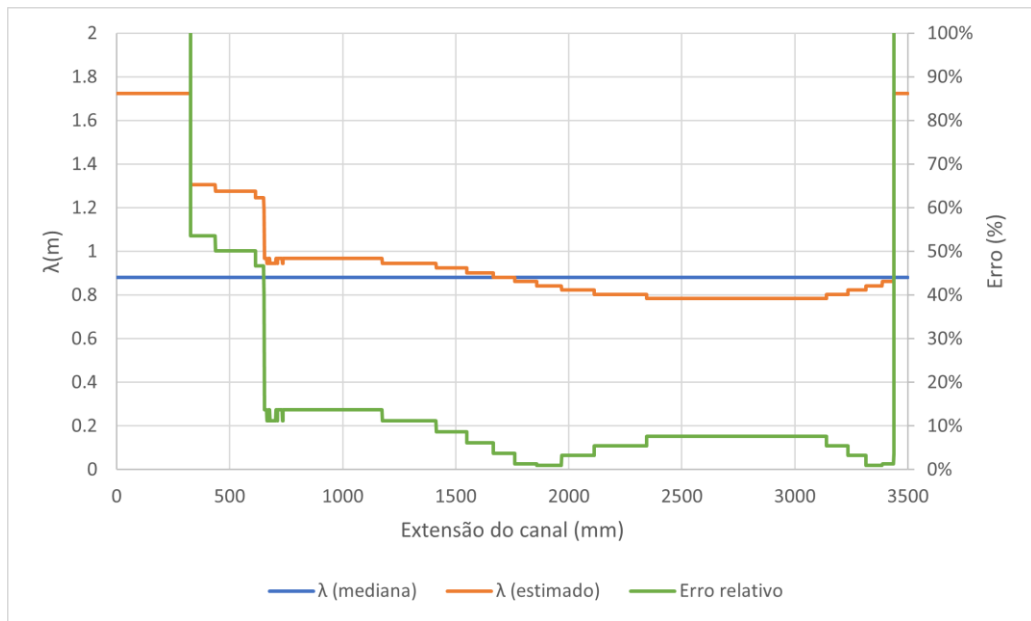


Figura 4.45- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de período de 0,88 s.

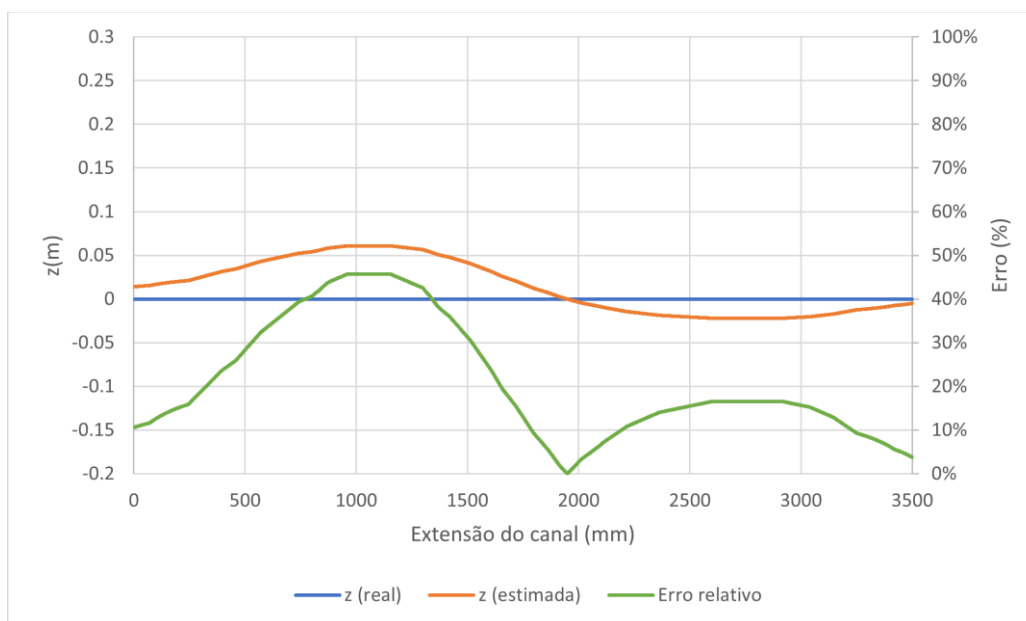


Figura 4.46- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de período de 0,88 s.

#### 4.4.1.3 Período de 1,00 s

Na Figura 4.47 apresenta-se a *timestack* para este ensaio, com uma duração total de gravação de 9,8 s (235 *frames*). Da Figura 4.48 à Figura 4.50 apresentam-se os resultados das características das ondas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 1,00 s e 0,98 m.

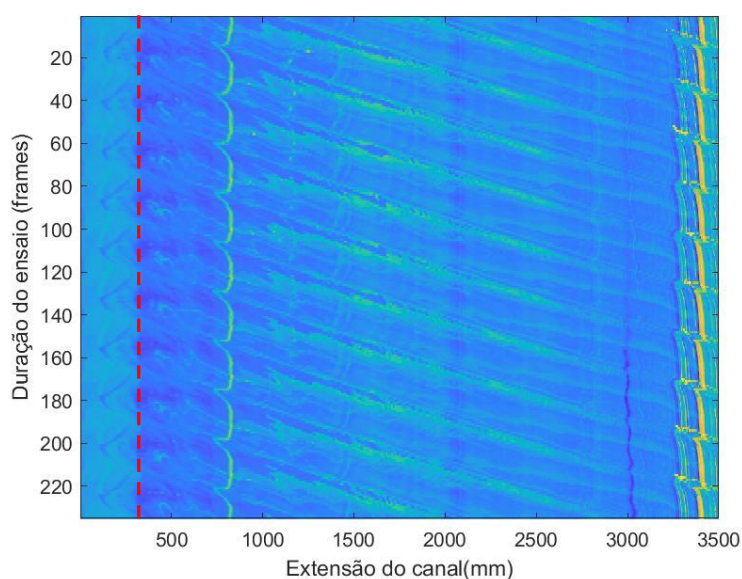


Figura 4.47- *Timestack* para o ensaio de período de 1,00 s. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

Na apresentação de resultados da Figura 4.48, pode observar-se que o  $T$  esperado toma na sua maioria valores de erro da ordem dos 6%, exceto casos pontuais, com um  $T$  mediano dos valores esperados de aproximadamente 0,94 s.

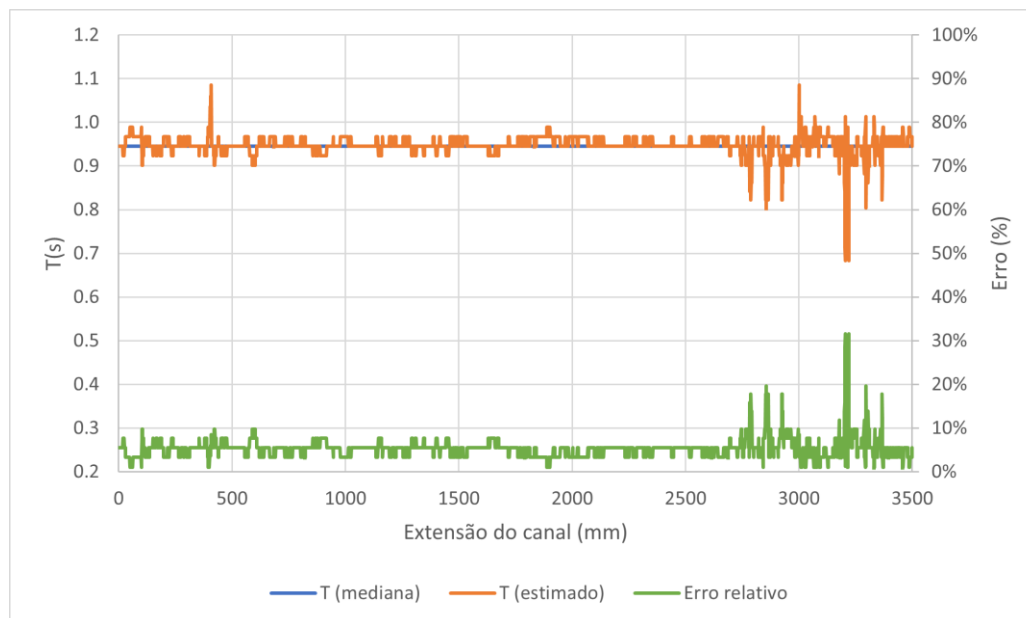


Figura 4.48- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,00 s.

Já na Figura 4.49, pode observar-se que, entre os 1600 e os 3200 mm de extensão do canal, o valor estimado de  $\lambda$  demonstra ter erros da ordem dos 10 %, aumentando para os 20 % nos últimos 300 mm. Na extremidade oposta, os erros são maiores, mas nunca superiores a 30 %. O valor mediano de  $\lambda$  para este caso é de 1,11 m.

Quanto aos resultados de  $z$ , na Figura 4.50 pode-se reparar que, novamente na zona mais próxima do canal à câmara (últimos 1900 mm), os valores estimados de  $z$  têm melhores resultados. Ainda assim, com um erro relativo da ordem dos 20 %. Nos primeiros 1600 mm de extensão do canal os resultados de  $z$  não são aceitáveis, pois apresentam uma diferença da ordem dos 10 cm relativamente ao valor real de 13,3 cm.

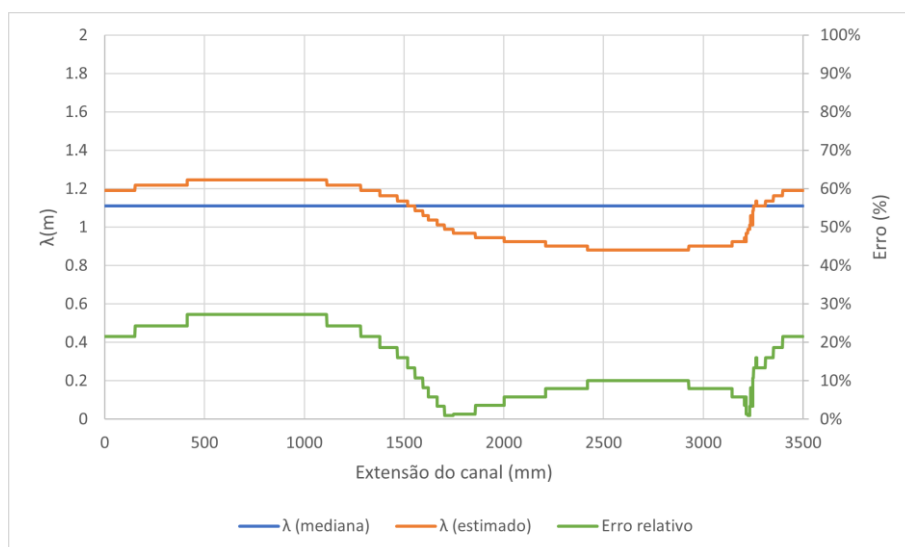


Figura 4.49- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,00 s.

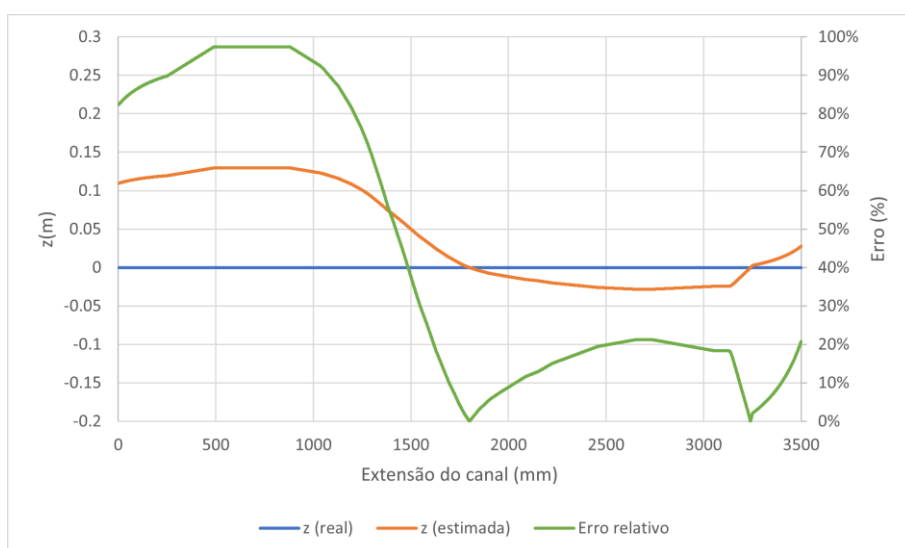


Figura 4.50- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,00 s.

#### 4.4.1.4 Período de 1,13 s

Na Figura 4.51 apresenta-se a *timestack* referente a este ensaio que teve uma duração de 10,3 s (246 *frames*). Nas figuras seguintes deste subcapítulo estão presentes as estimativas das características das ondas ensaiadas para um  $T$  e  $\lambda$  esperados de 1,13 s e 1,10 m, respectivamente (Figura 4.52 à Figura 4.54).

No que diz respeito à apresentação dos resultados de  $T$ , pode observar-se que sua grande maioria de valores estimados têm um erro de cerca de 4 % relativamente ao  $T$  esperado ( $T$  mediano de 1,09 s). Exceto na extremidade mais próxima à câmara, onde se observa uma

maior dispersão de resultados com um máximo de 40 % de erro aos 2750 mm de extensão de canal.

Relativamente aos resultados de  $\lambda$ , pode observar-se que os resultados estimados aparentam ser bastante regulares em praticamente toda a extensão do canal (primeiros 3250 mm), coincidindo na sua maioria com um  $\lambda$  mediano de 1,76 m. No entanto, apresentam uma diferença de cerca de 0,66 m para o valor esperado e, conseqüentemente, com erros da ordem dos 60 %.

Analisando os resultados de  $z$ , pode observar-se que estes tomam valores totalmente irrealistas comparativamente à cota real. Os valores estimados de  $z$  são sempre positivos e com uma diferença da ordem de 34 cm relativamente à cota real (13,3 cm).

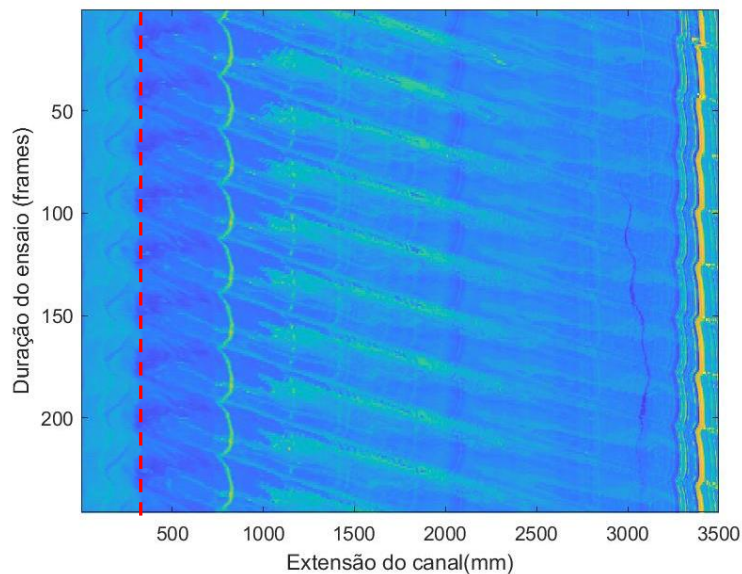


Figura 4.51- *Timestack* para o ensaio de período de 1,13 s.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

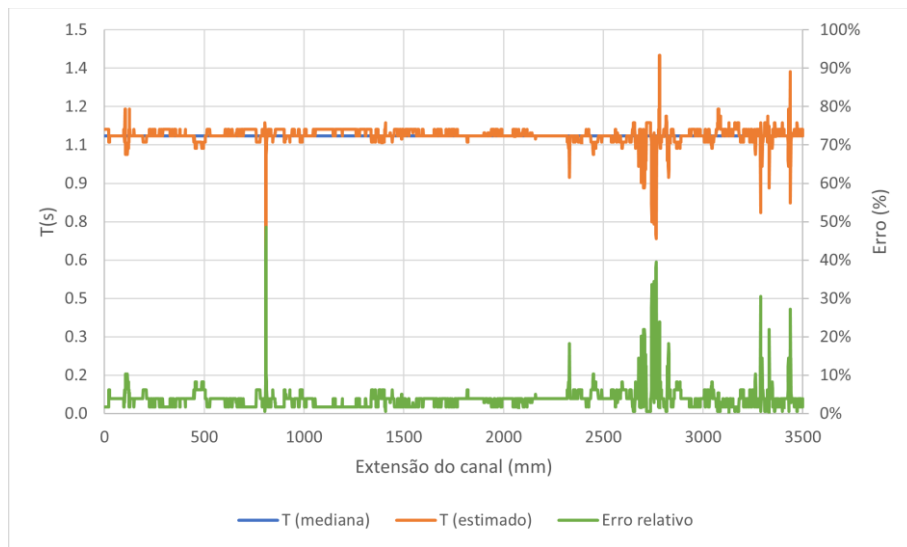


Figura 4.52- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,13 s.

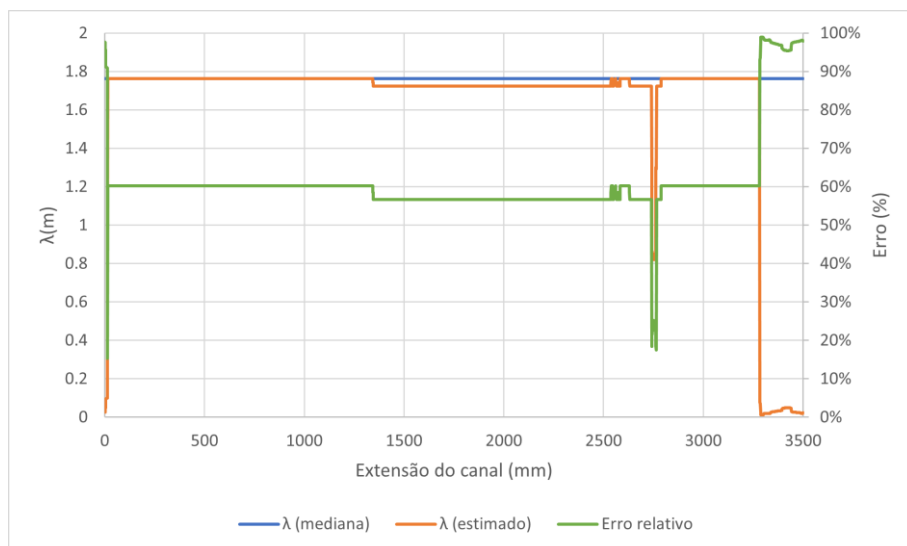


Figura 4.53- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,13 s.

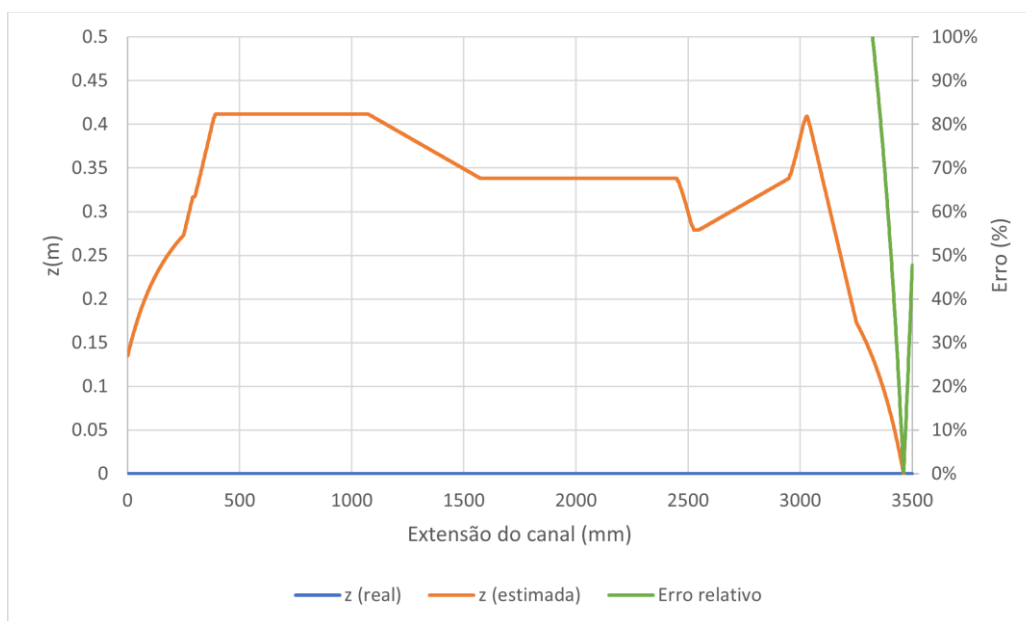


Figura 4.54- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,13 s.

#### 4.4.1.5 Período de 1,29 s

Na Figura 4.55 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração de gravação foi de 9,6 s (231 *frames*). Nas restantes figuras aqui apresentadas (da Figura 4.56 à Figura 4.58), estão representados os valores de  $T$  e  $\lambda$ . Os valores esperados para  $T$  e  $\lambda$  são respetivamente 1,29 s e 1,30 m.

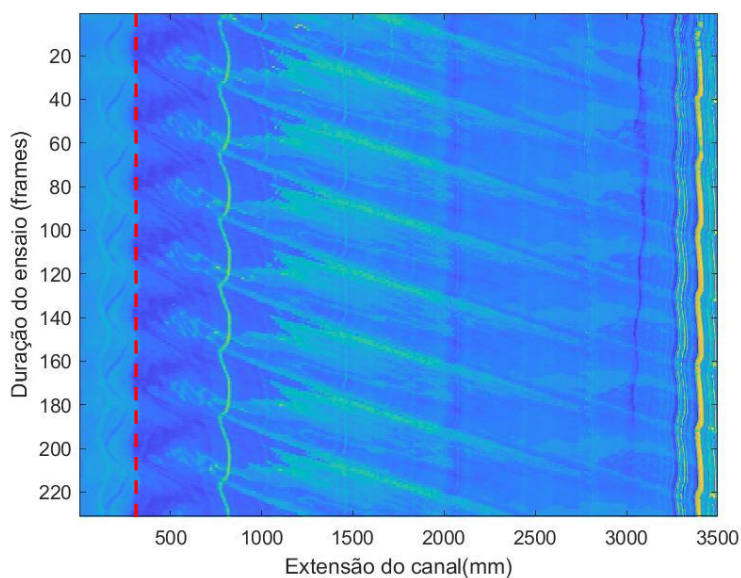


Figura 4.55- *Timestack* para o ensaio de período de 1,29 s. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bateror.

Na Figura 4.56, pode observar-se que na grande maioria dos resultados de  $T$ , as diferenças registadas entre os valores estimados e esperados têm associados erros na ordem dos 6 %, exceto na extremidade final do canal ou em casos pontuais. O valor mediano de  $T$  é de 1,22 s.

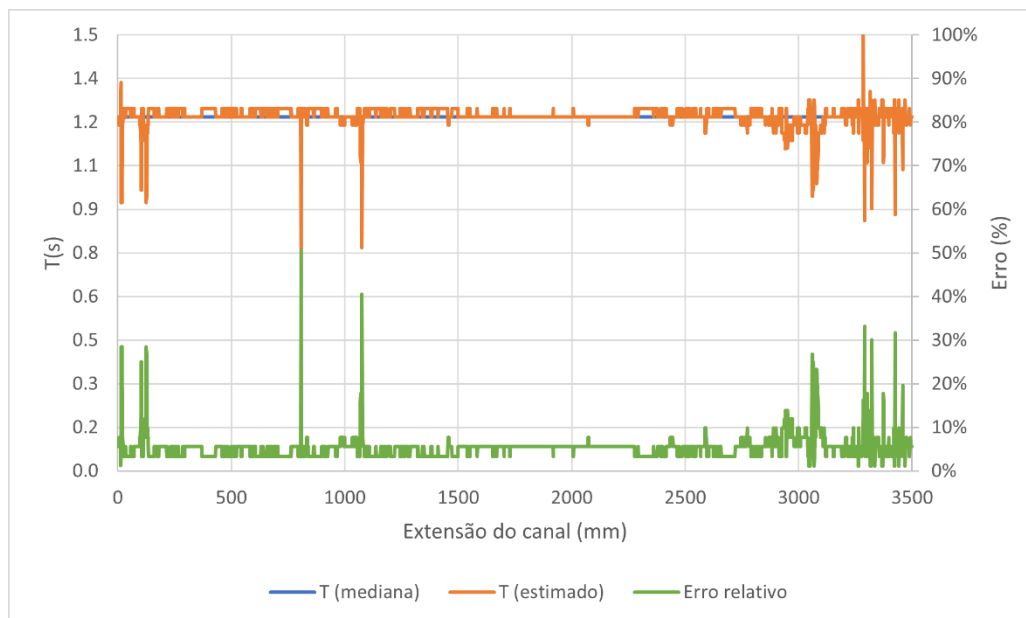


Figura 4.56- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,29 s.

Analisando os resultados de  $\lambda$  da Figura 4.57, pode ver-se que a dimensão do comprimento de onda estimado, pela metodologia de Santos *et al.* (2022b), é sempre constante e um pouco superior à dimensão total da zona de estudo do canal de 3,5 m. O comprimento esperado é mais de duas vezes e meia inferior (valor mediano de 3,53 m), face ao valor estimado (1,30 m). Por essa razão não aparecem na escala vertical apresentada nessa Figura. Conclui-se, portanto, que os resultados de  $\lambda$  para este ensaio são totalmente irrealistas.

À semelhança com os resultados de  $\lambda$ , como se pode observar na Figura 4.58, os resultados de  $z$  também não apresentam boas aproximações das cotas  $z$  reais. Na realidade, os resultados de  $z$  que aqui se apresentam não correspondem aos resultados obtidos com os valores de  $\lambda$  aqui exposto. Ou seja, os resultados  $\lambda$  e  $T$  aqui obtidos, conjugados, não reproduzem valores de  $z$  válidos pela relação de dispersão, por haver incompatibilidade no domínio da função  $\text{atanh}(x)$ , neste caso, porque os valores de  $\lambda$  são muito elevados. No entanto, as figuras aqui representadas são relativas aos valores medianos estimados de cada variável, para cada posição  $x$  de extensão do canal. Pelo que, os resultados de  $z$  expostos na Figura 4.58 têm em conta os valores de  $\lambda$  compatíveis com o domínio de  $\text{atanh}(x)$ .

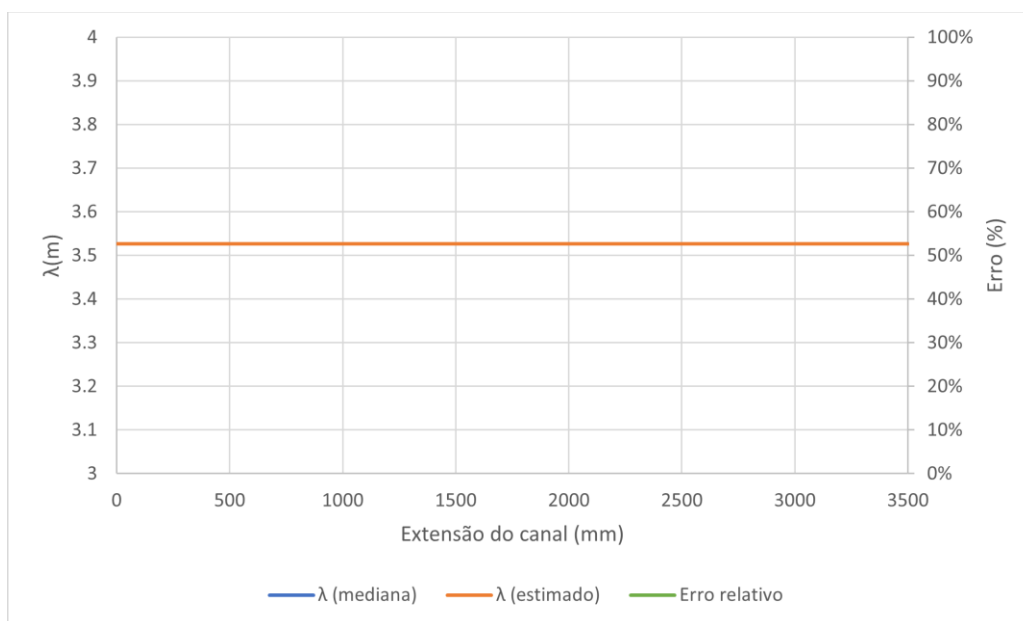


Figura 4.57- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,29 s.

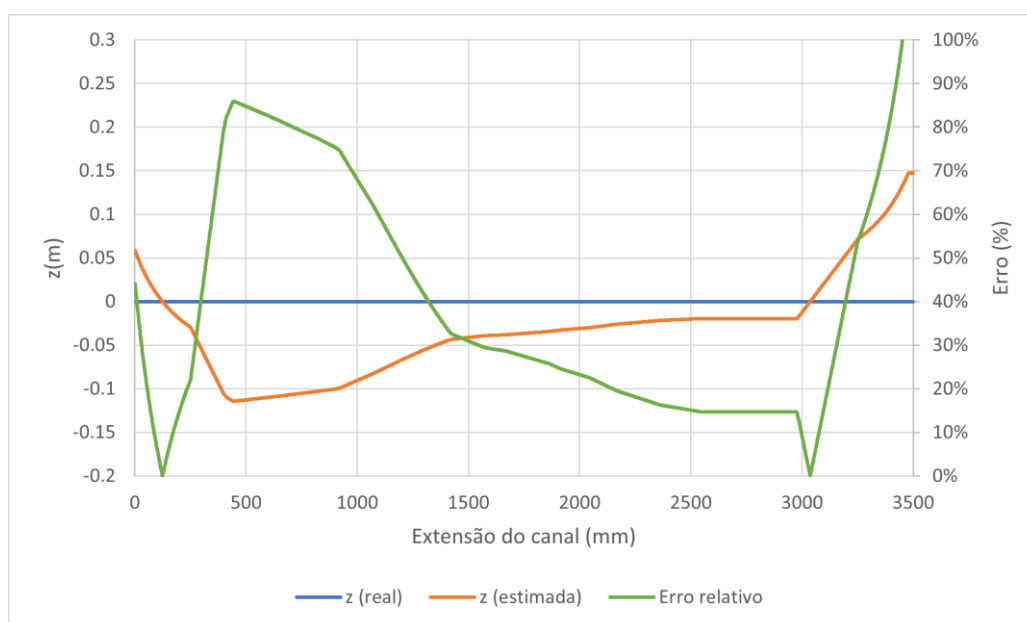


Figura 4.58- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,29 s.

#### 4.4.1.6 Período de 1,79 s

Neste ensaio, a altura de onda ( $H$ ) de 1,3 cm era pouco significativa face ao comprimento de onda de ordem superior a 100 vezes o valor de  $H$ . Assim, decidiu-se que não seria útil fazer ensaios com frequências do batedor inferiores a este, sendo o último ensaio no estudo de influência do período da onda. O valor esperado de  $T$  é de 1,79 s para este ensaio. O valor do comprimento de onda não foi possível ser determinado visualmente devido à pequena

amplitude da imagem lateral. No entanto, pela teoria de ondas de Airy, espera-se um valor de cerca de 2,0 m.

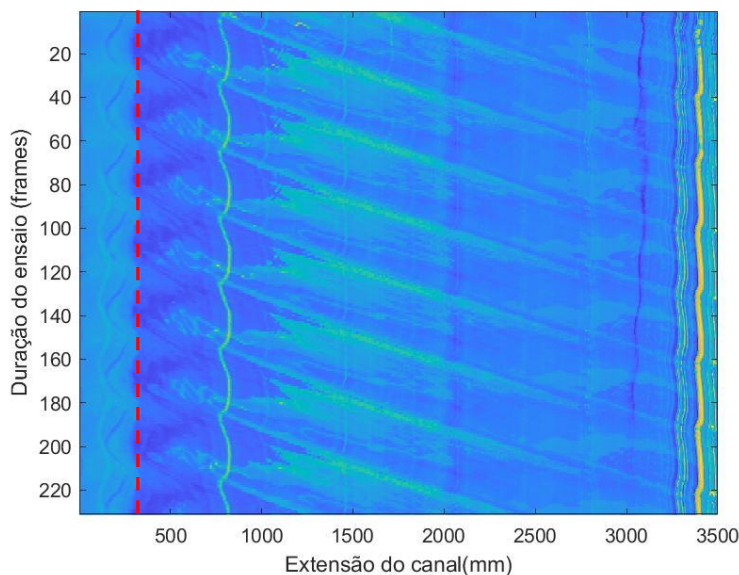


Figura 4.59- *Timestack* para o ensaio de período de 1,79 s.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bateror.

Na Figura 4.59, apresenta-se a *timestack* obtida neste ensaio, com uma duração de gravação de 9,8 s (236 *frames*). Nas restantes figuras apresentam-se os resultados obtidos para as características das ondas aqui ensaiadas (Figura 4.60 à Figura 4.62).

Na Figura 4.60 apresentam-se os valores de  $T$ , verificando-se que os valores estimados tomam, ao contrário dos ensaios anteriores, erros da ordem dos 10 % em toda a extensão do canal. Esta diferença, comparativamente ao valor esperado, pode estar relacionada com a diminuição da altura de onda, dificultando a diferenciação/contraste na coloração dos pixels entre as cristas e cavas da onda. O valor mediano de  $T$  para este ensaio é de 1,61 s.

Relativamente aos valores de  $\lambda$  apresentados na Figura 4.61 pode observar-se que até aos 2200 mm de extensão do canal, o valor de  $\lambda$  nunca assume valores superiores a 1,20 m (erros da ordem dos 50%). Apenas nos restantes 1300 mm o valor estimado de  $\lambda$  assume quase sempre valores da ordem de 1,76 m (erros da ordem dos 10%), aproximando-se um pouco mais do valor esperado de 2,0 m. O valor mediano de  $\lambda$  para este ensaio é de 1,14 m.

Quanto ao valor estimado de  $z$  para este ensaio (Figura 4.62), pode observar-se que nos primeiros 2000 mm de extensão do canal, os resultados são totalmente irrealistas com erros na ordem dos 70 %. Já na extremidade final do canal, esses resultados tendem a melhorar para valores com erros na ordem de 1% no troço de 2400 até 3100 mm de extensão do canal.

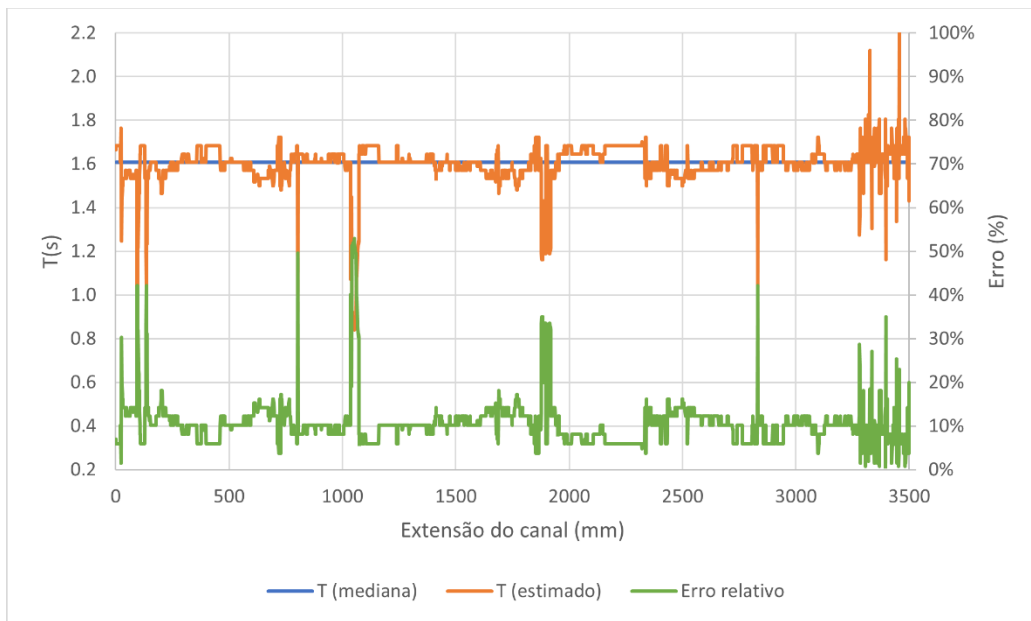


Figura 4.60- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,79 s.

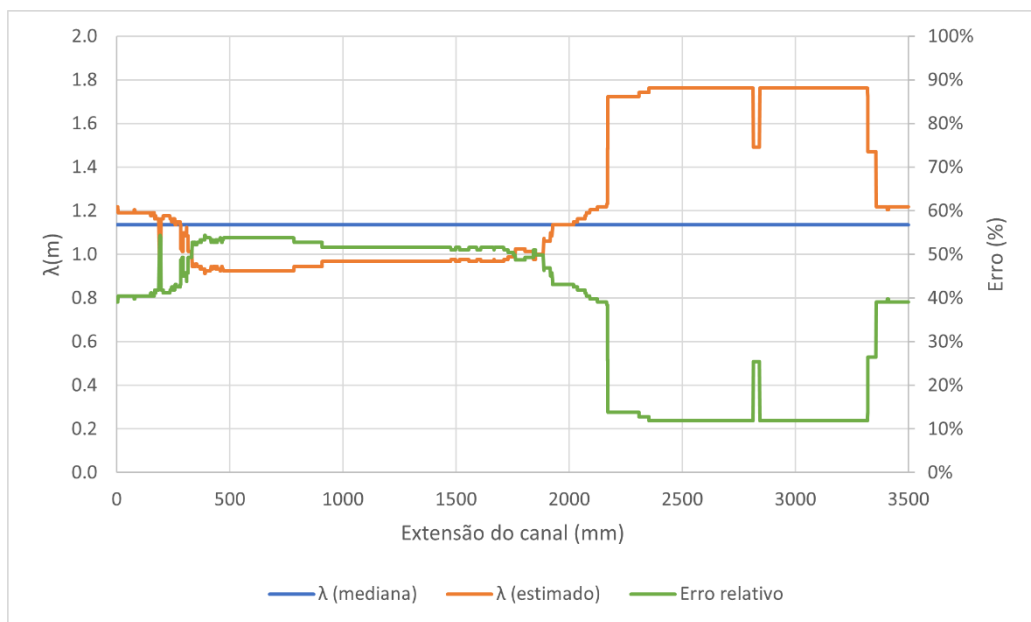


Figura 4.61- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,79 s.

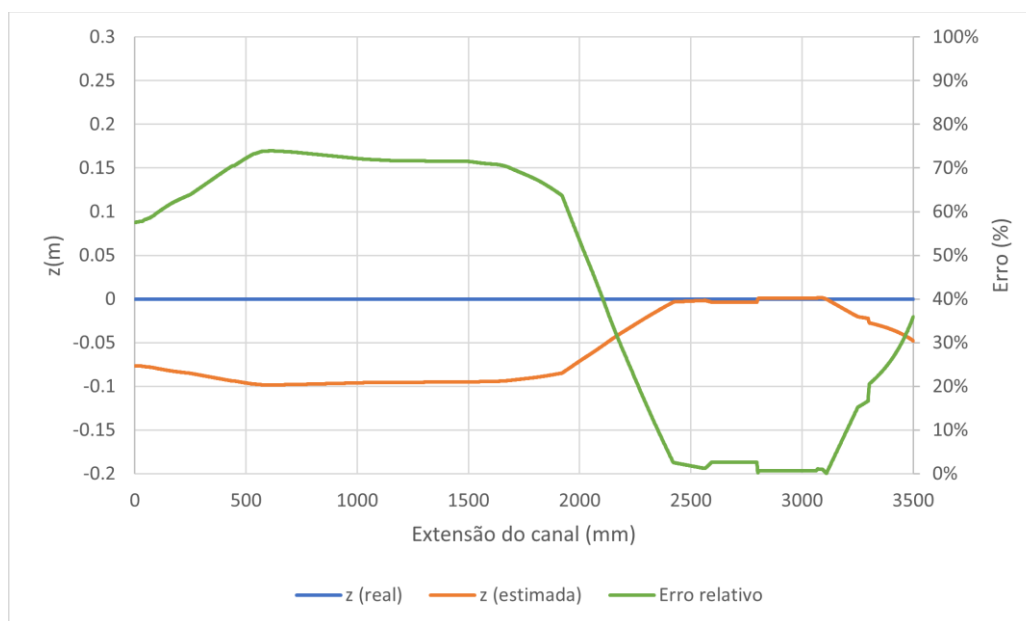


Figura 4.62- Valores médios e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de período de 1,79 s.

#### 4.4.1.7 Súmula dos resultados obtidos

Na Tabela 4.2, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos no estudo da influência do período da onda. Como se pode observar, as frequências indicadas no mostrador do batedor de ondas não correspondem na realidade a frequências lineares (Hz) ou a frequências angulares (rad/s). Ainda assim, o programa *MATLAB* utilizado teve a capacidade em detetar as variações dos períodos das ondas impostas pelas variações na frequência do batedor de ondas com pequenos erros. Nota-se também que no primeiro ensaio deste estudo o período estimado de 0,79 s corresponde precisamente ao período de onda observado pelas imagens laterais. Seria, no entanto, de esperar um período de onda igual a 0,75 s, uma vez que as condições deste ensaio só diferiram em 2,4 cm de profundidade relativamente aos ensaios do estudo de sensibilidade à luz. Uma possível razão para esta diferença pode estar relacionada com a diferença da resistência que a água fez sentir no batedor entre os dois ensaios. Os períodos observados pelas imagens laterais, presentes na primeira coluna da Tabela 4.2, serão considerados nos ensaios que se seguem como correspondentes às várias frequências do batedor, à exceção do primeiro ensaio, que será considerado um  $T=0,75$  s pela razão enunciada atrás.

Os ensaios deste estudo foram realizados na parte da tarde, altura do dia em que existe uma menor quantidade de luz natural disponível no laboratório, pois os vãos envidraçados do laboratório estão voltados para Este. Esta situação poderá justificar uma menor qualidade de resultados globais de  $z$ , comparativamente com a ordem grandeza do somatório dos erros relativos obtido no estudo da sensibilidade à luz para a mesma condição de iluminação. O

facto de que, em quase todos os ensaios deste estudo se ter agora uma maior dispersão de valores entre o  $T$  estimado e o  $T$  mediano, relativamente ao resultado do subcapítulo 4.3.5, pode também estar relacionado com a pequena incidência de luz natural sobre o canal.

Tabela 4.2- Síntese dos resultados do estudo da influência do período da onda.

Ensaio	Frequência do batedor			$T$ (s) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo de $T$ (-)	$\lambda$ (m) (esperado)	$\lambda$ (m) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo de $\lambda$ (-)	$\Sigma$ erro relativo de $z$ (-)
	Mostrador (-)	Real (Hz)	Real (rad/s)						
$T=0,79$ s	10	1,26	7,93	0,79	<b>67,46</b>	0,79	0,86	<b>354,36</b>	2240,44
$T=0,88$ s	9	1,14	7,18	0,84	159,28	0,85	0,88	774,19	<b>744,82</b>
$T=1,00$ s	8	1,00	6,28	0,94	184,73	0,98	1,11	542,64	1591,42
$T=1,13$ s	7	0,89	5,58	1,09	135,52	1,10	1,76	2135,76	8564,94
$T=1,29$ s	6	0,77	4,86	1,22	186,18	1,30	3,53	5996,93	1387,59
$T=1,79$ s	5	0,56	3,50	1,61	370,02	2,00	1,14	1278,45	1579,35

A negrito assinalam-se os menores erros acumulados

Como se pode observar na Tabela 4.2, à medida que o período e o comprimento de onda vão aumentando, a qualidade dos valores de  $\lambda$  estimados vão diminuindo, o que pode estar relacionado, neste caso, com a diminuição da declividade da onda ( $H/\lambda$ ). A Tabela 4.2 mostra que para o teste  $T=0,79$  s obtiveram-se menores erros para  $T$  e  $\lambda$ . Decidiu-se também que, devido à baixa declividade presente no último ensaio, não seria viável ensaiar ondas com alturas inferiores a 1,3 cm, devido ao fraco contraste entre a coloração dos pixels das cristas e cavas da onda. Relativamente ao resultado do somatório dos erros relativos de  $\lambda$ , no último ensaio, este foi determinado considerando o  $\lambda$  obtido pela teoria de Airy, uma vez que a amplitude da câmara não conseguiu captar com clareza o valor  $\lambda$ , observado nas imagens laterais.

Quaisquer outras informações sobre as características das ondas ensaiadas podem ser consultadas na 2ª ficha de ensaio presente no Anexo 3.

#### 4.4.2 Influência da profundidade

Neste subcapítulo pretende-se estudar a influência da profundidade nos resultados, garantindo como constantes: a geometria do fundo original do canal; a frequência do batedor; e a distância ao eixo do disco do batedor. Em cada ensaio, verifica-se se cada ensaio se enquadra perante a presença de grandes, médias ou pequenas profundidades. Também, com a diminuição da profundidade em cada ensaio, avalia-se a possibilidade em replicar uma diminuição do

comprimento de onda com a passagem de maiores profundidades de ensaio para menores profundidades. Em simultâneo, verifica-se se o algoritmo utilizado tem a capacidade de detetar as características das ondas estudadas.

Nos subcapítulos que se seguem, apresentam-se os resultados obtidos tendo em consideração um período constante no batedor de 0,75 s, uma distância constante ao eixo do disco do batedor de 3,5 cm e uma profundidade variável no canal, desde 15,2 cm a 6,8 cm.

#### 4.4.2.1 Profundidade de 15,2 cm

Na Figura 4.63 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 8,8 s (210 *frames*). Na Figura 4.64 à Figura 4.66, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,75 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 15,2 cm neste ensaio pode-se concluir, através do quociente  $\lambda/h=4,9$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

Analisando agora a Figura 4.64, pode observar-se que  $T$  estimado é na sua maioria bastante próximo de  $T$  observado nas imagens laterais (0,79 s). Obteve-se um  $T$  mediano, de 0,79 s, coincidente com aquele valor resultando em erros inferiores a 1 %, exceto em alguns casos pontuais.

Relativamente à Figura 4.65, pode observar-se uma qualidade de resultados aceitável, com erros relativos na ordem dos 10 % para os troços de [0, 400] mm e de [2400, 3500] mm na extremidade do canal. Nos restantes 2000 mm da zona central do canal,  $\lambda$  estimado tende para erros da ordem dos 20 %. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,84 m.

Quanto aos resultados de  $z$  presentes na Figura 4.66, pode-se observar, que à semelhança dos resultados de  $\lambda$ , as melhores estimativas de  $z$  encontram-se nos extremos do canal de [0, 500] mm e na zona mais próxima da câmara, *i.e.*, de [2250, 3500] mm com erros nunca superiores a 20 %. Já na zona central do canal, os resultados de  $z$  afastam-se mais dos valores reais.

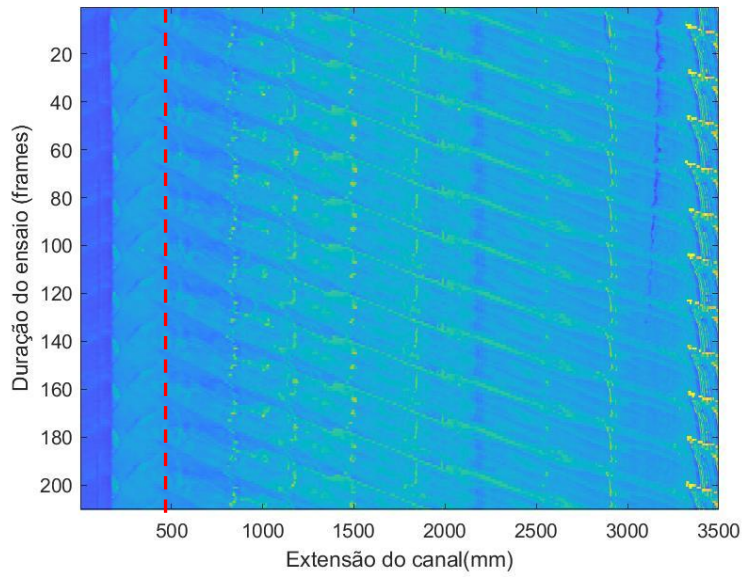


Figura 4.63- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 15,2 cm.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.



Figura 4.64- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 15,2 cm.

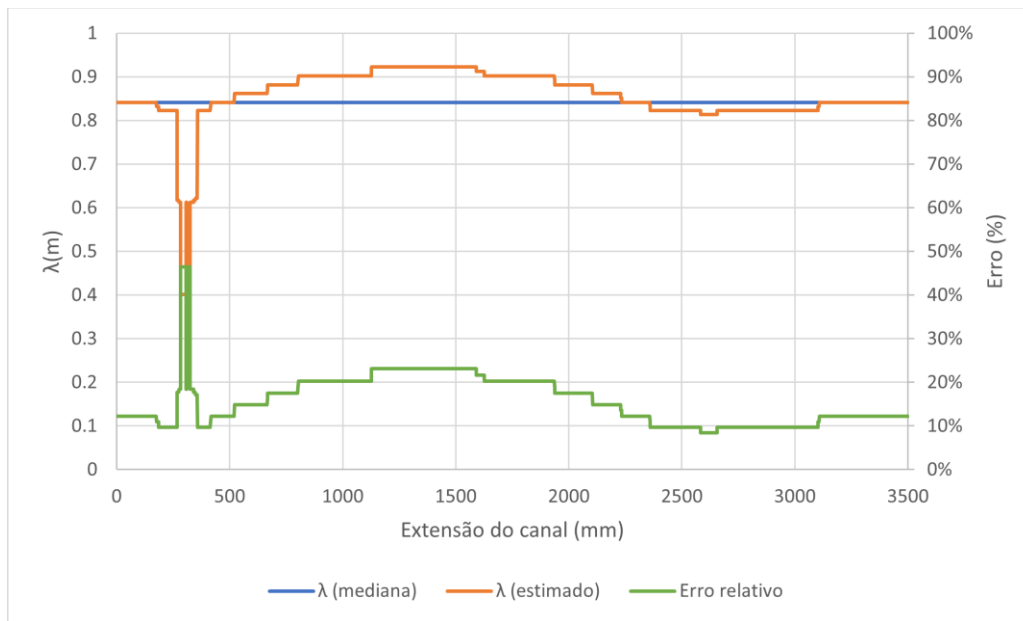


Figura 4.65- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 15,2 cm.

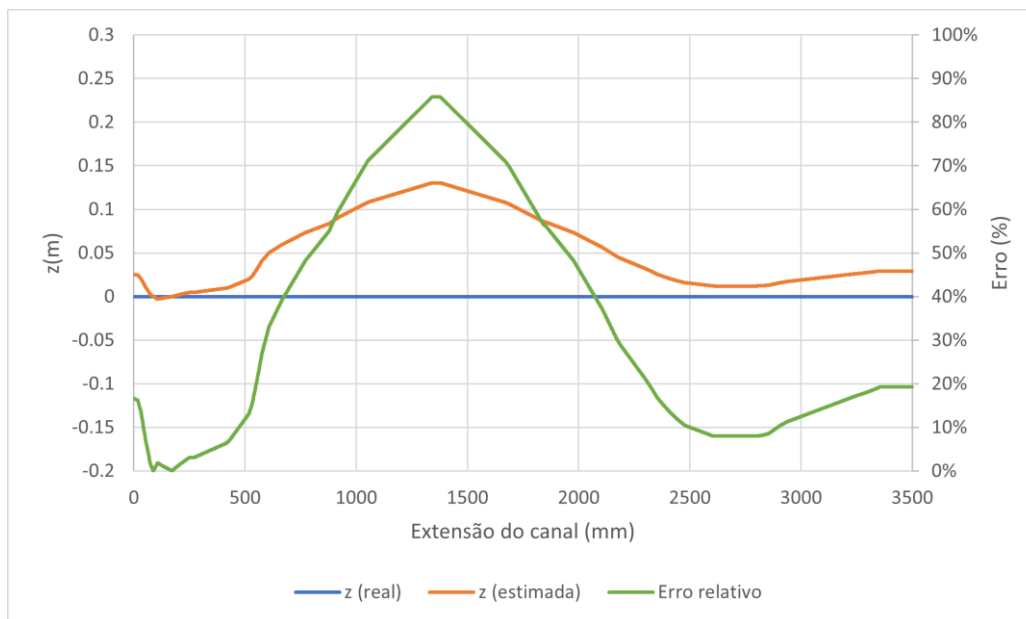


Figura 4.66- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 15,2 cm.

#### 4.4.2.2 Profundidade de 13,3 cm

Na Figura 4.67 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 16,3 s (390 *frames*). Na Figura 4.68 à Figura 4.70, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,72 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 13,3 cm neste ensaio pode-se

concluir, através do quociente  $\lambda/h=5,4$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

Analisando a Figura 4.68, observa-se que o  $T$  mediano de 0,75 s corresponde ao  $T$  esperado. Os resultados aqui apresentados tomam na totalidade do canal erros da ordem de 2 %, exceto em zonas muito pontuais.

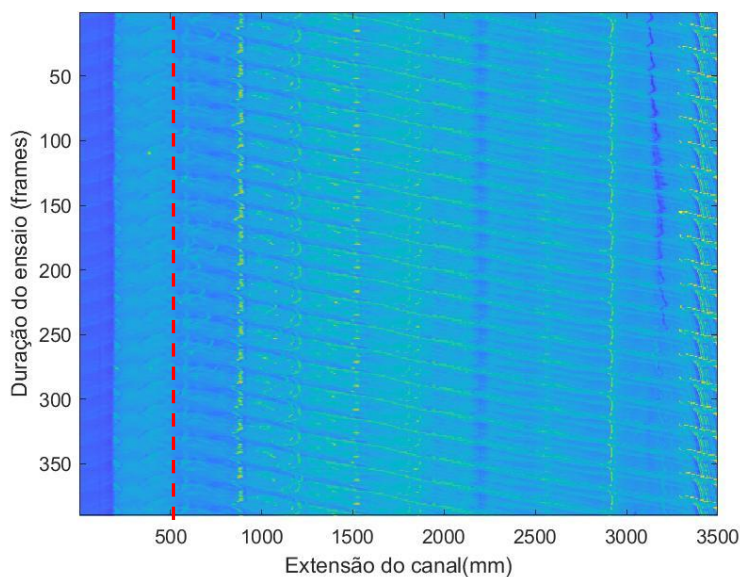


Figura 4.67- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 13,3 cm. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bateror.

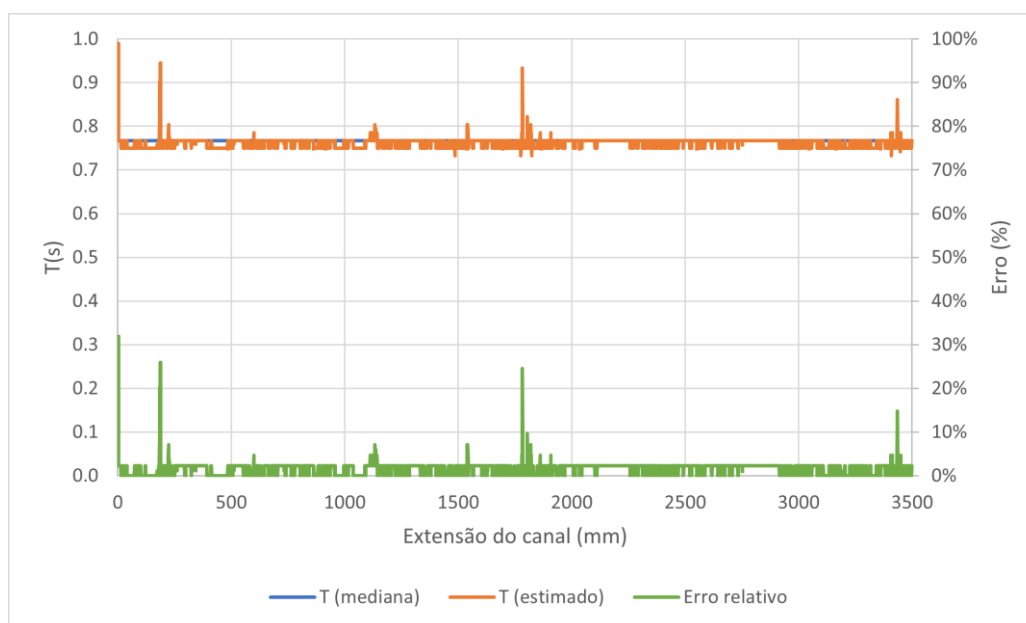


Figura 4.68- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.

Relativamente à Figura 4.69, a estimativa de  $\lambda$  conduz a um valor mediano constante e igual a 3,53 m, não correspondendo de todo ao valor esperado de 0,72 m.

Quanto aos resultados de  $z$  presentes na Figura 4.70, ao contrário do que seria de esperar, devido aos resultados de  $\lambda$ , pode observar-se que os valores de  $z$  apresentam resultados aceitáveis com erros da ordem dos 20 %. Novamente, os resultados de  $z$  que aqui se apresentam não correspondem aos resultados obtidos com os valores de  $\lambda$  aqui exposto pela razão que já se explicou anteriormente no subcapítulo 4.4.1.5.

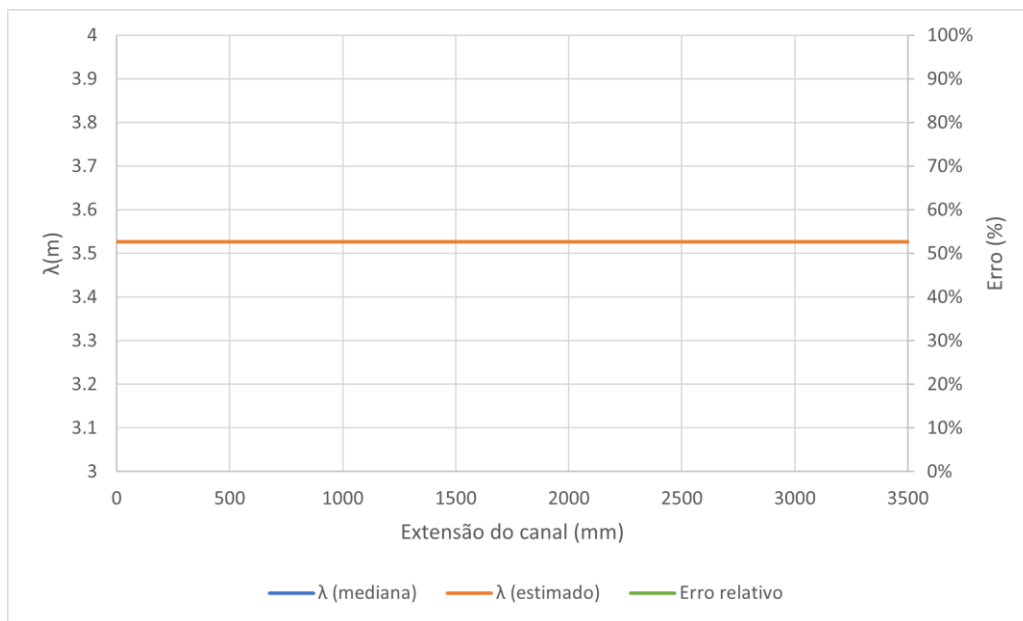


Figura 4.69- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.

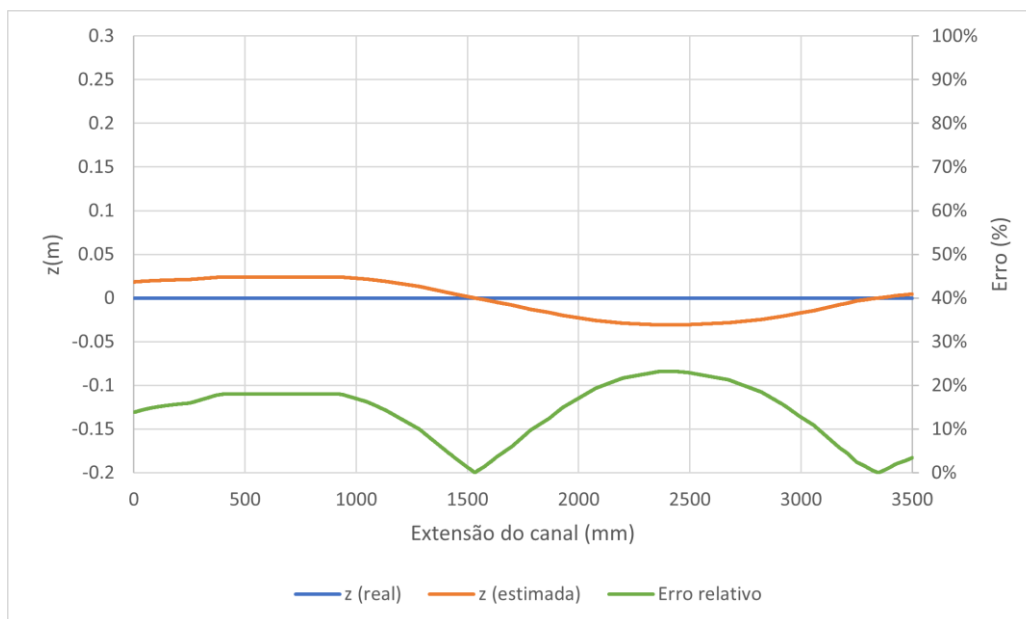


Figura 4.70- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 13,3 cm.

### 4.4.2.3 Profundidade de 12,3 cm

Na Figura 4.71 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 8,4 s (202 frames). Na Figura 4.72 à Figura 4.74, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,68 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 12,3 cm, pode-se concluir, através do quociente  $\lambda/h=5,5$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

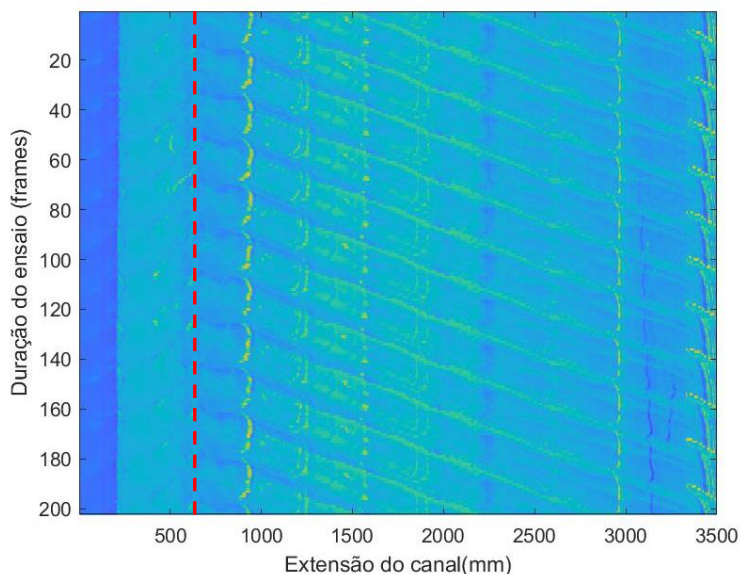


Figura 4.71- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

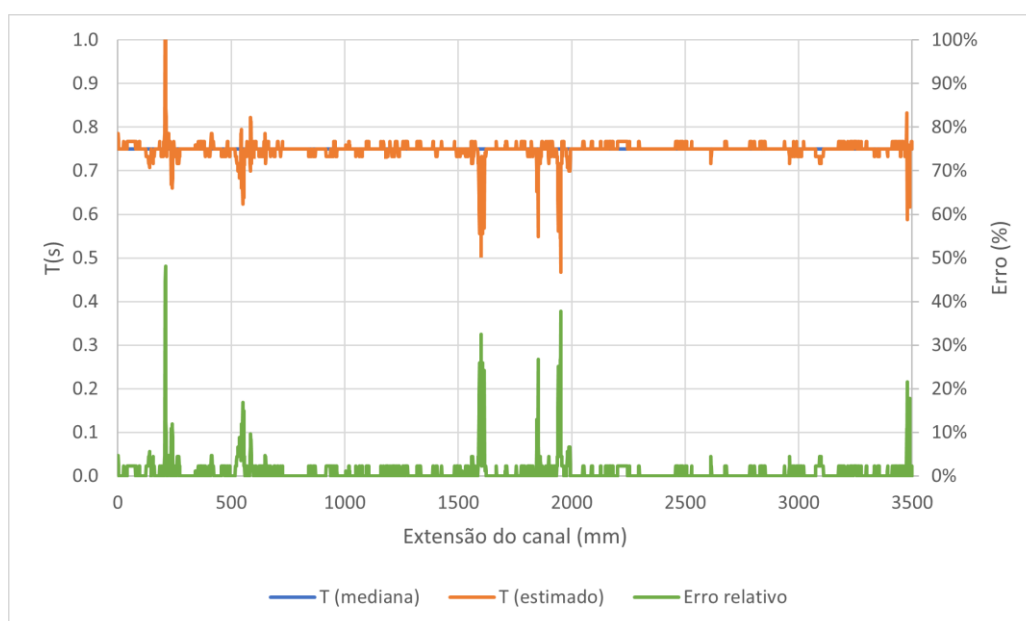


Figura 4.72- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.

Na Figura 4.72, pode observar-se que novamente, os resultados de  $T$  tomam valores muito próximos dos esperados. Com  $T$  mediano de 0,75 s, equivalente ao valor esperado e erros na ordem dos 2 % em toda a extensão do canal, exceto em zonas pontuais.

Analisando a Figura 4.73, pode observar-se que na extremidade mais próxima da câmara,  $\lambda$  estimado toma valores bastante próximos do estimado com erros da ordem dos 0,5 % nos últimos 1000 mm de extensão do canal. À medida que a distância à câmara aumenta, os resultados vão piorando. No troço de [1000, 2500] mm o erro estimado é de 20 % e nos restantes 1000 mm iniciais o erro aumenta para o dobro. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,77 m.

Finalmente, na Figura 4.74 pode observar-se que à semelhança dos resultados de  $z$ , nos últimos 1000 mm de extensão do canal, *i.e.*, próximo da câmara, é onde se tem a melhor estimativa, com erros na ordem dos 10 %. Enquanto nos primeiros 1000 mm iniciais, os erros estimados são da ordem dos 20 % e na zona central os valores de  $z$  tendem a aumentar para um máximo de 47 %, ainda assim com uma diferença de 5 cm para o nível de referência.

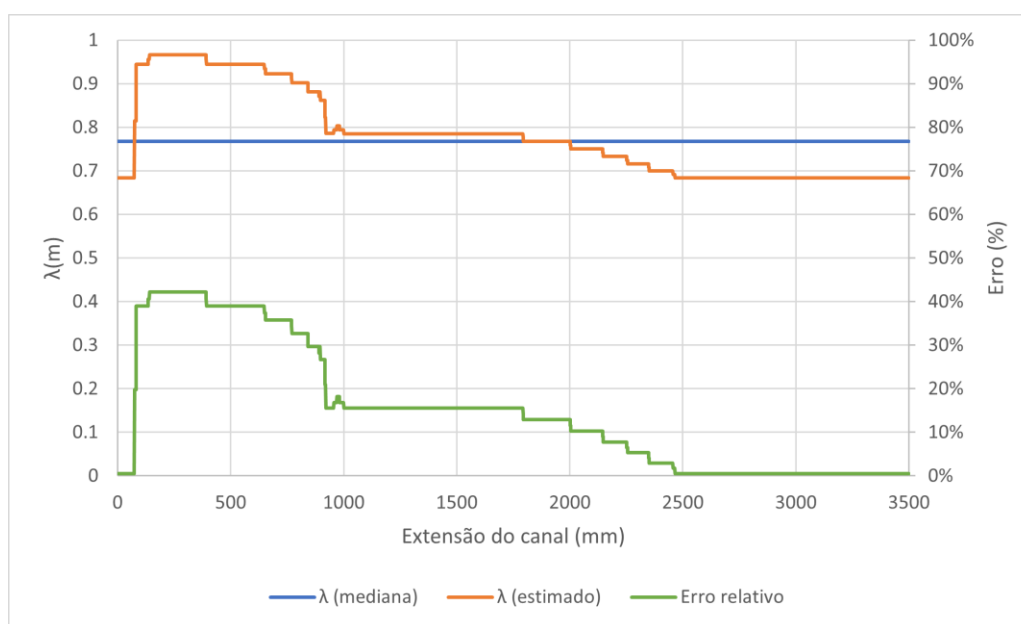


Figura 4.73- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.

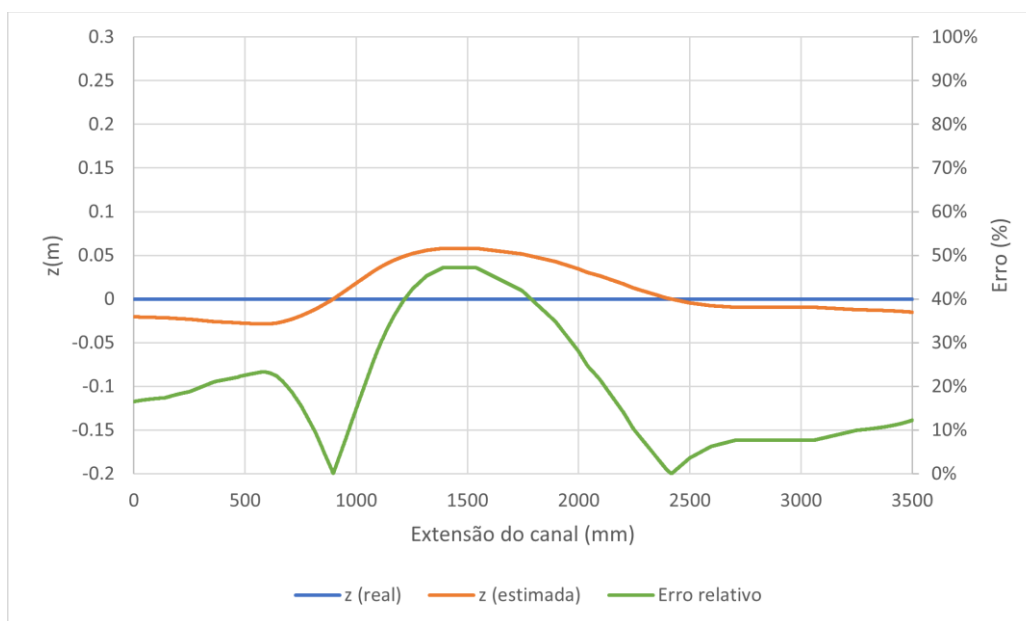


Figura 4.74- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 12,3 cm.

#### 4.4.2.4 Profundidade de 11,3 cm

Na Figura 4.75 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 8,9 s (213 *frames*). Na Figura 4.76 à Figura 4.78, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,66 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 11,3 cm neste ensaio pode-se concluir, através do quociente  $\lambda/h=5,8$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

Na Figura 4.76, pode observar-se novamente uma tendência dos valores de  $T$  bastante coerente com  $T$  esperado. Com erros na ordem dos 2 % e valor mediano de 0,75 s a corresponder ao valor esperado

Analisando agora a Figura 4.77, pode observar-se que nas extremidades do canal [0, 750] e [2500, 3500] mm, o valor de  $\lambda$  nunca toma valores superiores a 4 % e na zona central a diferença de valores observada tende a aumentar para um valor máximo de 20 %. Com um  $\lambda$  mediano de 0,68 m, bastante próximo do valor esperado.

Quanto à Figura 4.78, pode observar-se novamente que à semelhança com o que aconteceu para os valores de  $\lambda$  e no ensaio anterior, os valores de  $z$  demonstram ter uma melhor qualidade de resultados nas extremidades. Neste caso, nos últimos 1000 mm de extensão do canal, os erros de  $z$  são da ordem dos 5 % e na extremidade oposta da ordem dos 10 % nos

1000 mm iniciais. Ainda assim na zona central, os resultados obtidos demonstram que a diferença relativa entre valor estimado e esperado tomam um máximo de cerca de 45 %.

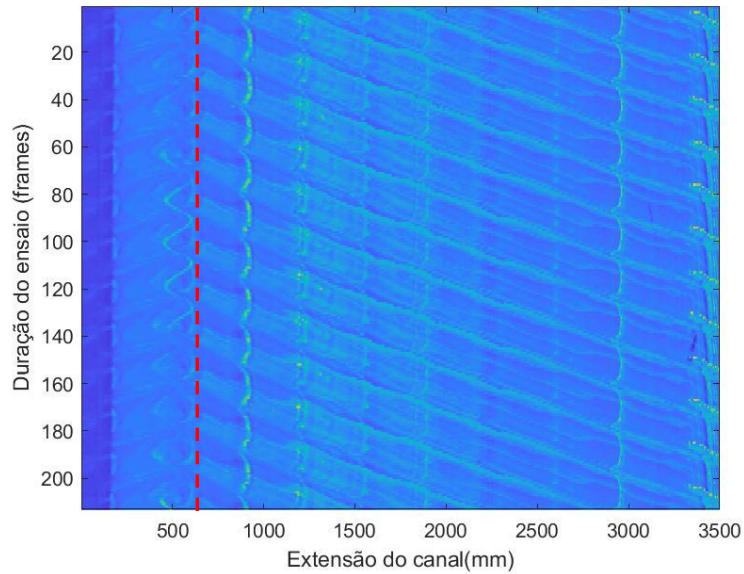


Figura 4.75- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 11,3 cm. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bateror.

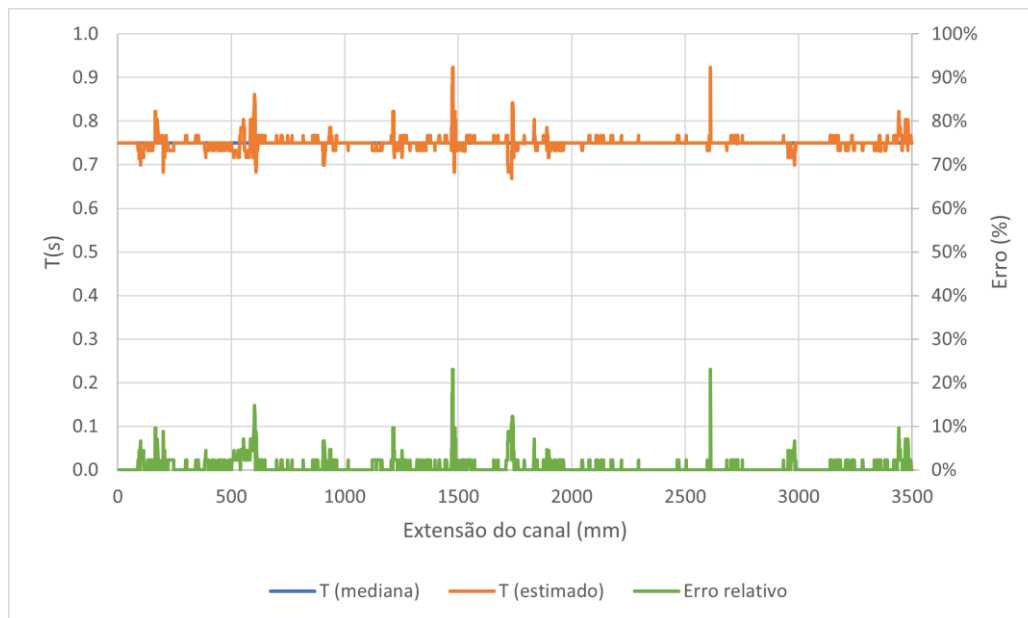


Figura 4.76- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.

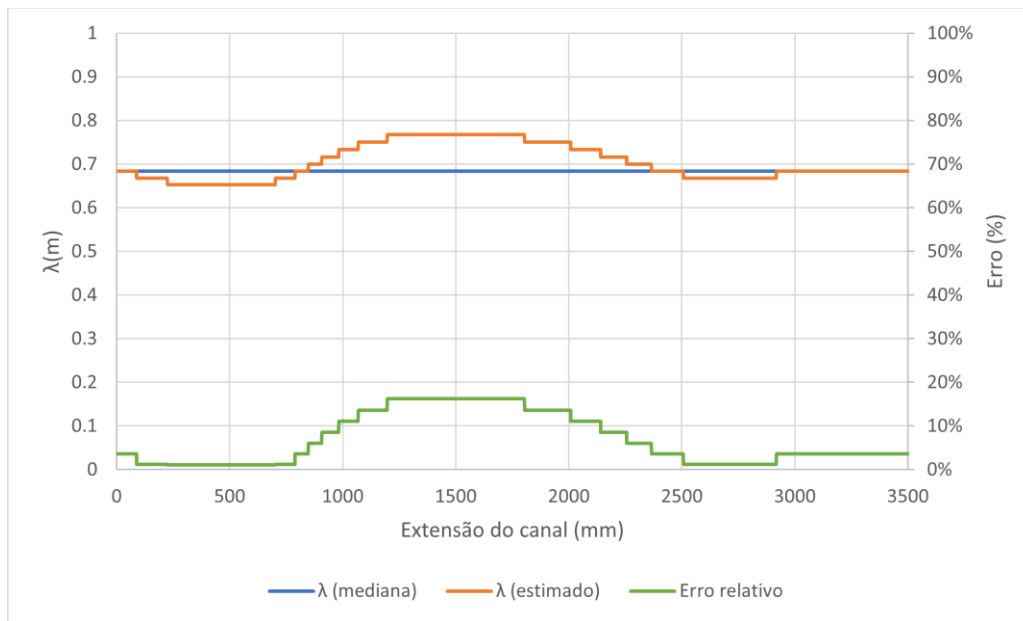


Figura 4.77- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.

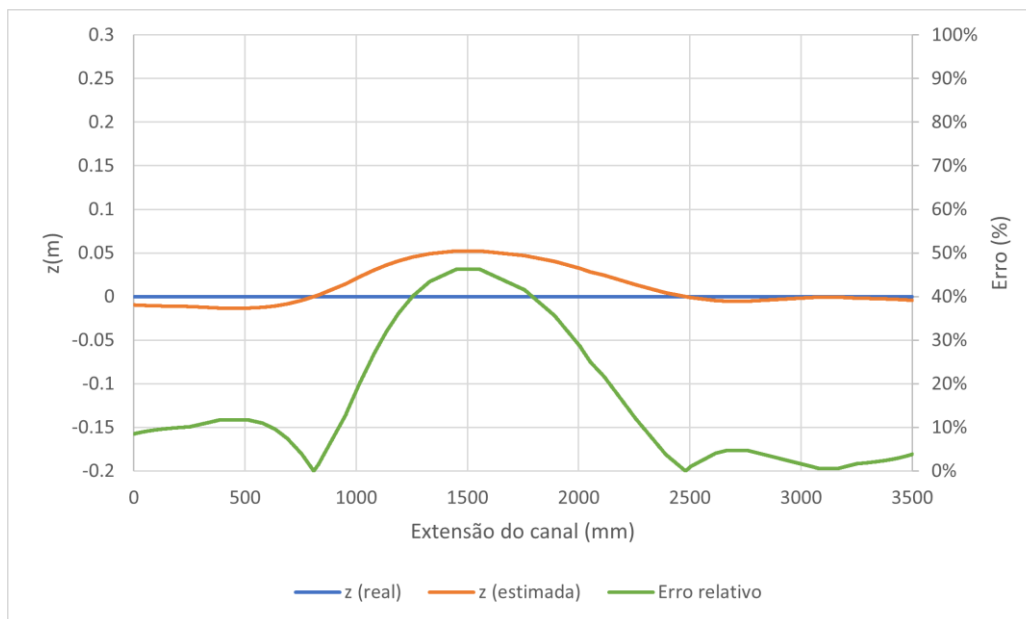


Figura 4.78- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 11,3 cm.

#### 4.4.2.5 Profundidade de 10,1 cm

Na Figura 4.79 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 8,0 s (193 *frames*). Na Figura 4.80 à Figura 4.82, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,64 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 10,1 cm neste ensaio pode-se concluir,

através do quociente  $\lambda/h=6,3$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

Analisando a Figura 4.80, pode observar-se que o valor mediano  $T$  (0,77 s) não corresponde ao valor observado nas imagens laterais de 0,79 s. Em toda a extensão do canal os valores de  $T$  tomam, na sua maioria, diferenças relativas da ordem dos 5 %. Seria de esperar, no entanto, para este estudo um período constante e igual a 0,75 s em todos os ensaios, o que não acontece neste ensaio.

Relativamente à Figura 4.81, à semelhança com o ensaio anterior, nas extremidades o valor de  $\lambda$  toma melhores valores que na zona central, com diferença entre ambas as zonas de 10 %. Nas extremidades a diferença relativa é sempre inferior a 10 %. O valor mediano de  $\lambda$  é, neste caso, igual a 0,68 m.

Quanto à Figura 4.82, as zonas das extremidades voltam a verificar melhores resultados comparativamente à zona central do canal. No entanto, a extremidade inicial do canal apresenta, neste caso, melhores resultados que a extremidade final. No troço inicial o erro observado é da ordem dos 5 % e na extremidade oposta tem um valor mediano perto dos 10 %. Já na zona central do canal a diferença estimada tende a aumentar para um máximo de 40 %.

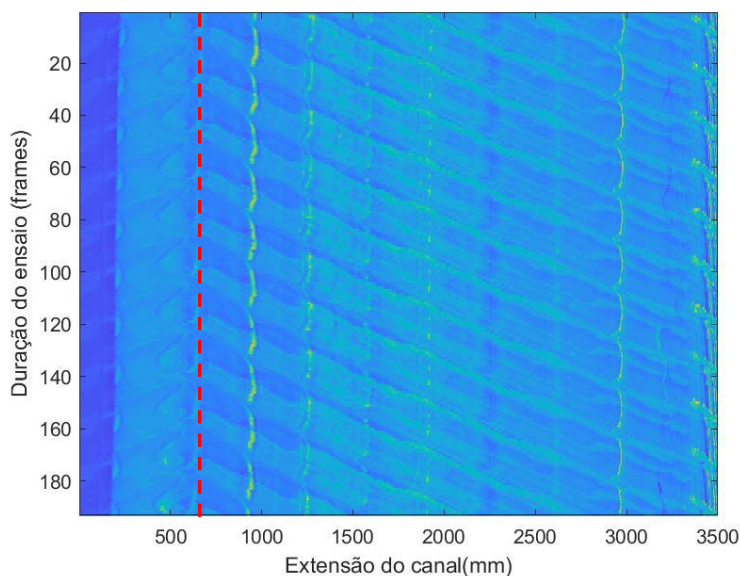


Figura 4.79- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bater.

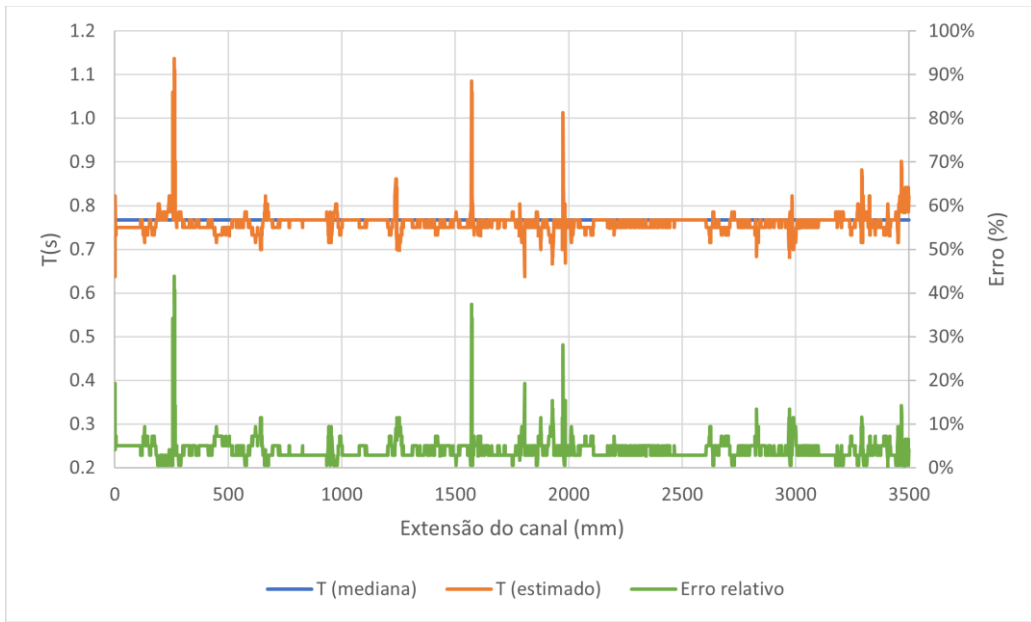


Figura 4.80- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.

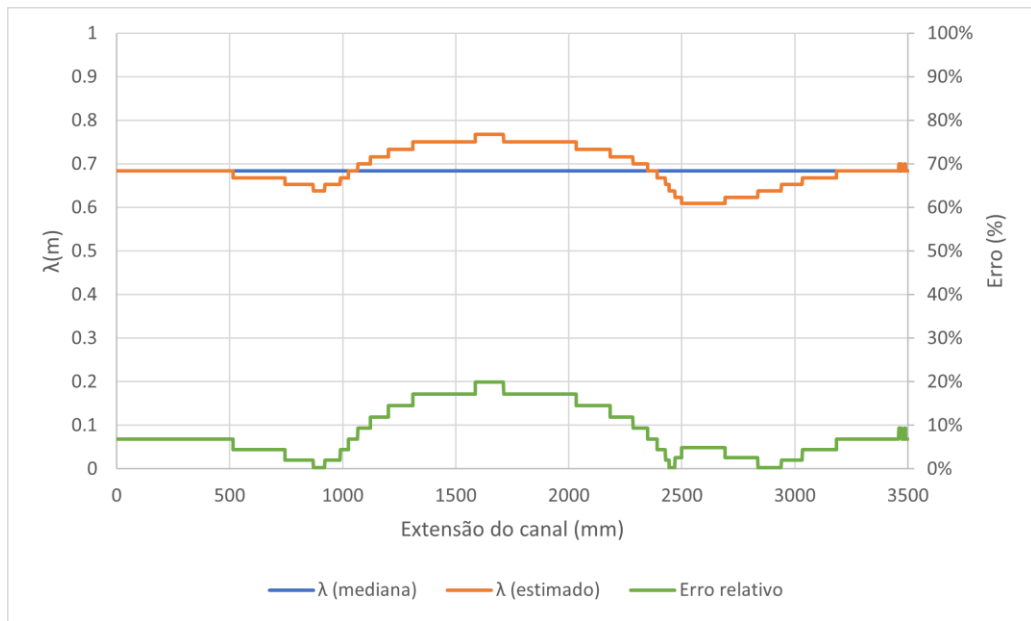


Figura 4.81- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.

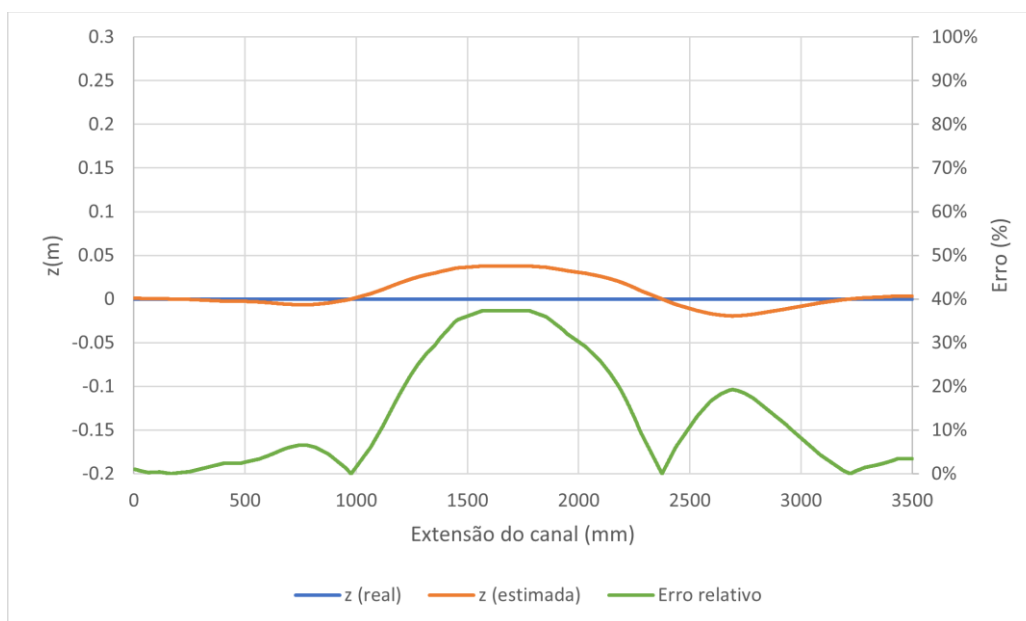


Figura 4.82- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 10,1 cm.

#### 4.4.2.6 Profundidade de 8,9 cm

Na Figura 4.83 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 6,2 s (148 *frames*). Na Figura 4.84 à Figura 4.86, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respectivamente, 0,75 s e 0,60 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 8,9 cm, pode-se concluir, através do quociente  $\lambda/h=6,7$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

Analisando a Figura 4.84, pode-se observar uma maior dispersão de resultados que nos ensaios anteriores. Ainda assim, o valor mediano corresponde ao valor esperado de 0,75 s. Os valores estimados têm erros associados na ordem dos 3 % na sua maioria.

Na Figura 4.85, os resultados de  $\lambda$  apresentam ser melhores na extremidade junto à câmara com erros a variarem entre 1 e 20 % nos últimos 1500 mm. Na extremidade oposta, as diferenças estimadas tendem a aumentar dos 20 para os 30 %. E na zona central, mais especificamente entre os 1600 e os 1800 mm, verificam-se erros na ordem dos 80 %. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,56 m.

Olhando agora para a Figura 4.86, regista-se o oposto do que acontece para os valores de  $\lambda$ . Curiosamente, a zona central do canal demonstra melhores resultados de  $z$  que nas extremidades do canal. Ainda assim, com erros na ordem dos 10 a 20 %.

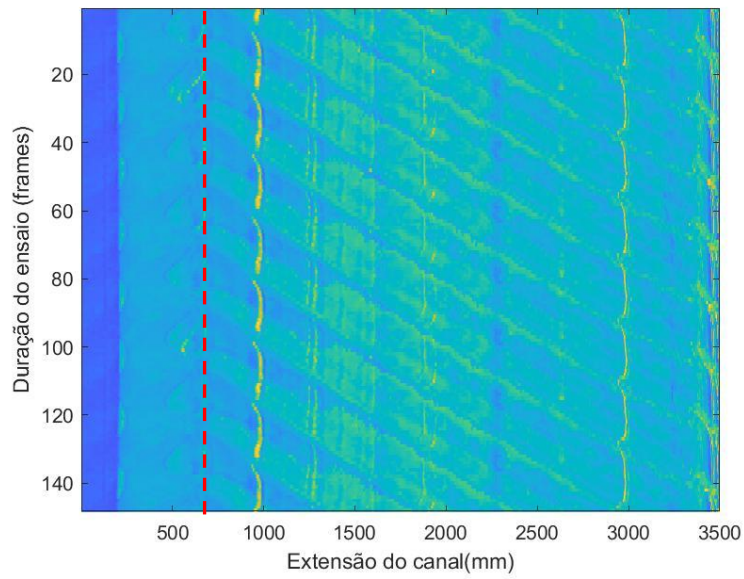


Figura 4.83- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 8,9 cm.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

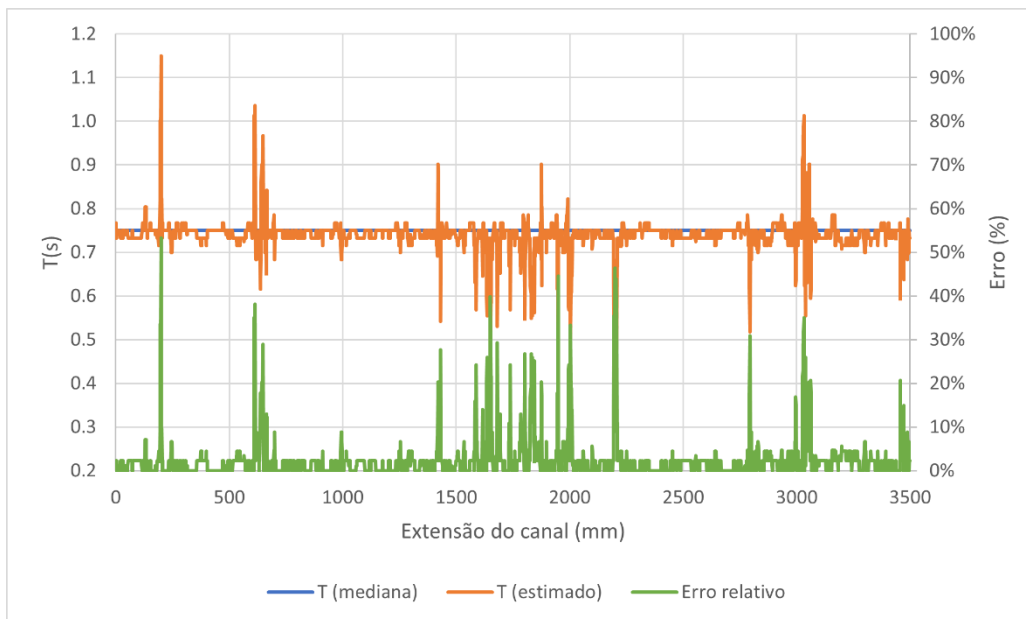


Figura 4.84- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 8,9 cm.

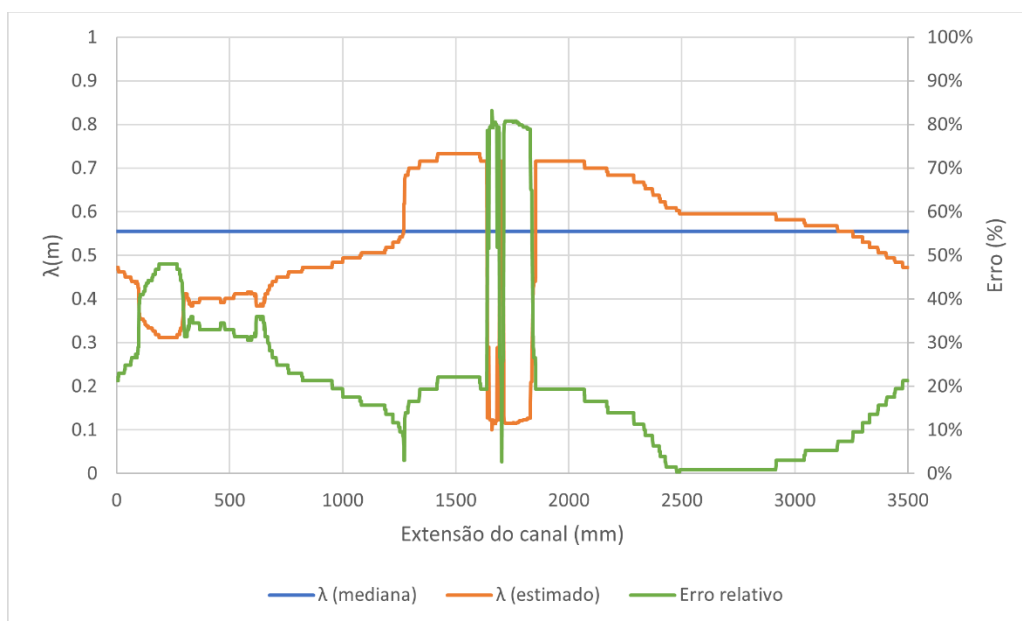


Figura 4.85- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 8,9 cm.

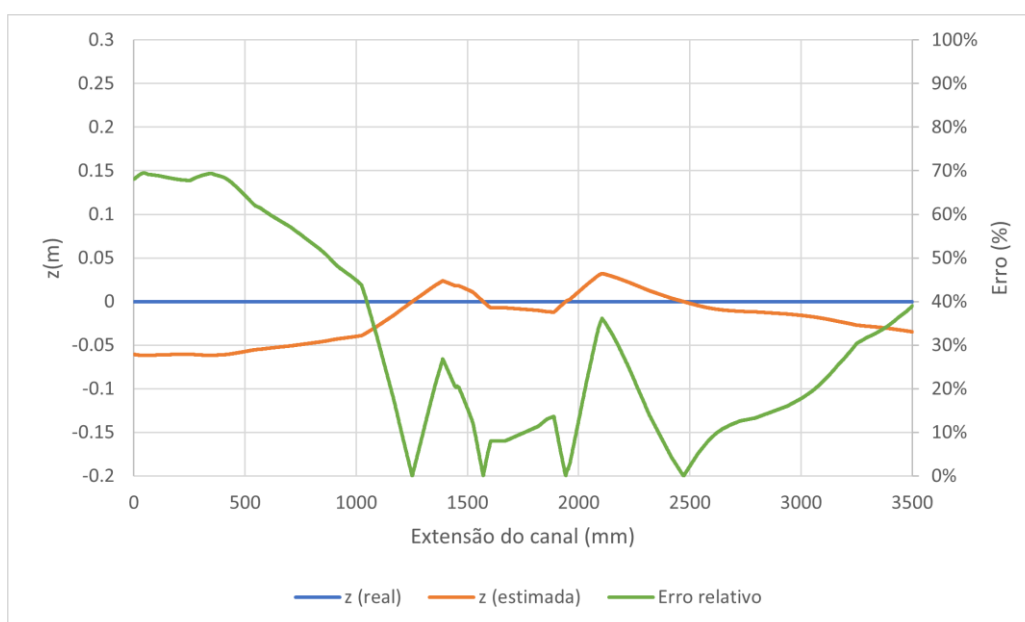


Figura 4.86- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 8,9 cm.

#### 4.4.2.7 Profundidade de 6,8 cm

Na Figura 4.87 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 10,6 s (254 *frames*). Na Figura 4.88 à Figura 4.90, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,56 m. Considerando que  $h$  é constante e igual a 6,8 cm pode-se concluir, através do quociente  $\lambda/h=8,2$ , que se está na presença de profundidades intermédias ( $2 > \lambda/h > 20$ ).

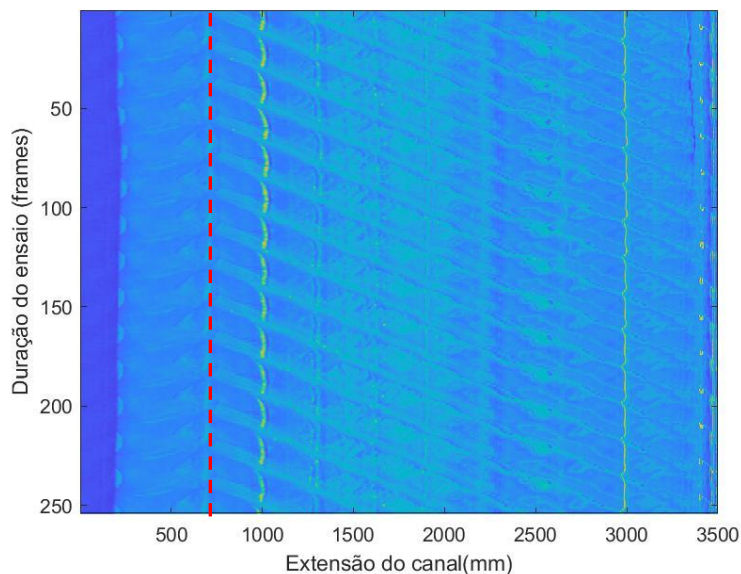


Figura 4.87- *Timestack* para o ensaio de profundidade de 6,8 cm.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

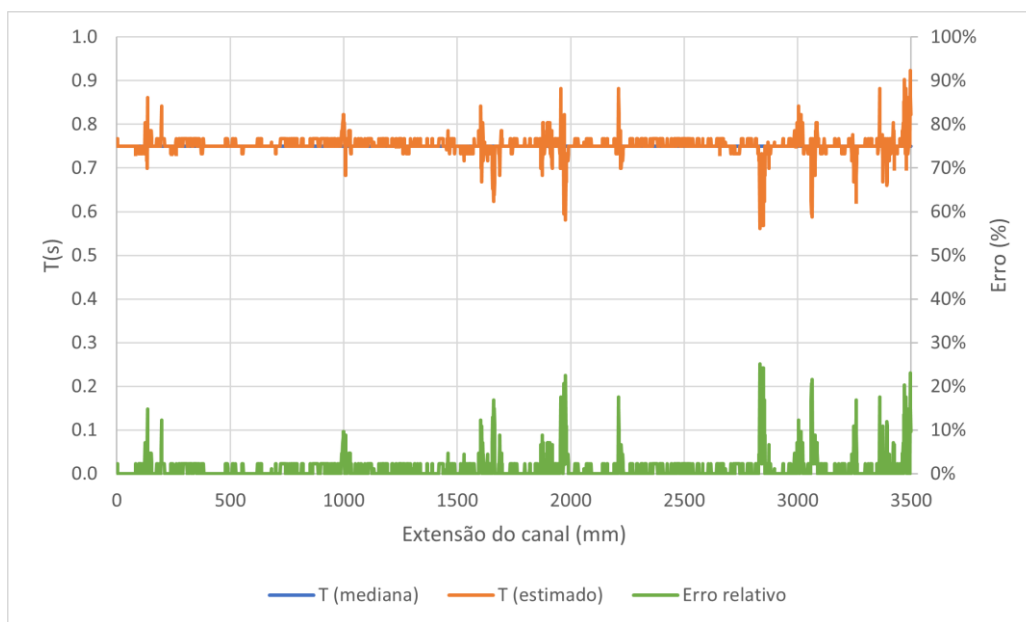


Figura 4.88- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 6,8 cm.

Na Figura 4.88, observa-se que o valor mediano de  $T$  corresponde ao valor esperado de 0,75 s. Na totalidade da extensão do canal obtêm-se erros da ordem de 2 %, exceto em zonas pontuais.

Analisando agora a Figura 4.89, verifica-se que somente as estimativas de  $\lambda$  na zona central do canal ([400, 3100] mm) apresentam resultados aceitáveis, na ordem dos 10 a 15 %. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,62 m.

Finalmente, os resultados de  $z$  na Figura 4.90 mostram que a diferença relativa estimada varia gradualmente desde valores da ordem de 20 %, na extremidade mais próxima à câmara, até valores da ordem dos 50 % na posição inicial do canal. A diferença de cotas em todo o canal nunca chega a ultrapassar os 4 cm de diferença entre o nível de referência e as cotas estimadas.

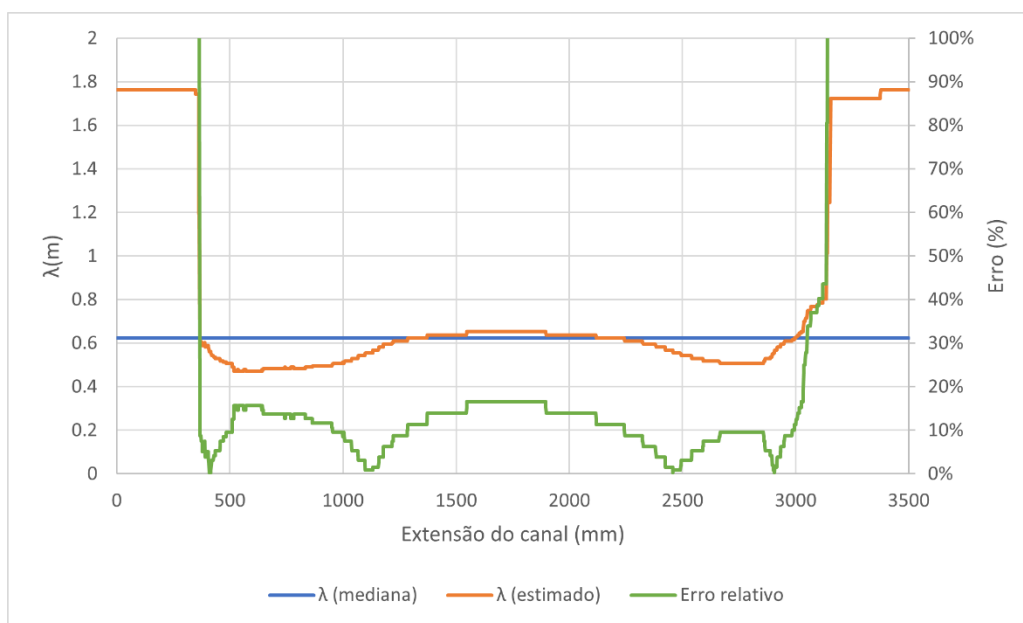


Figura 4.89- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 6,8 cm.

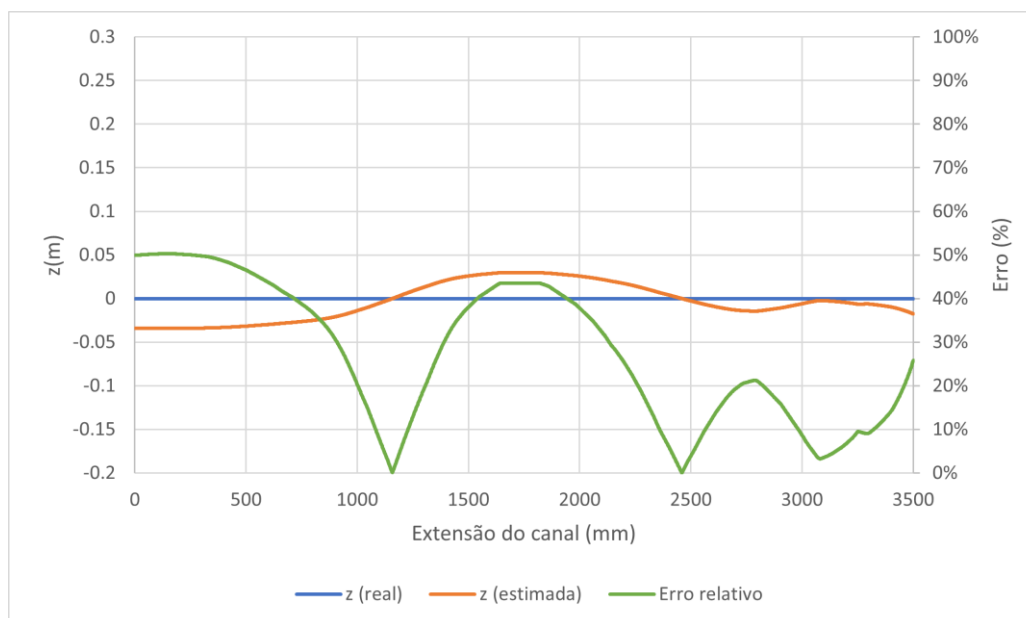


Figura 4.90- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio de profundidade de 6,8 cm.

#### 4.4.2.8 Súmula dos resultados obtidos

Na Tabela 4.3, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos no estudo da influência da profundidade. Como se pode observar nos resultados de  $\lambda$  esperados, através da diminuição sucessiva da profundidade em cada ensaio,  possível notar que o comprimento de onda tende a diminuir com a diminuição da profundidade. Este facto vai de encontro com a teoria de ondas, onde se sabe que desde que a onda começa a sentir o fundo, ou seja, na passagem de grandes profundidades para profundidades intermédias, a mesma onda (neste caso, simulada com o mesmo período em cada ensaio) tem tendência a diminuir o seu comprimento. Na última coluna da tabela, estão presentes os valores do quociente  $\lambda/h$ , que indica que em todos os ensaios se está perante condições de profundidades intermédias.

Relativamente aos períodos de onda esperados, na realidade, a frequência do batedor, ou seja, o período de onda, manteve-se praticamente constante para todos os ensaios deste estudo. No entanto, como se pode observar nos valores de  $T$  observados pelas imagens laterais, para  $h=15,2$  e  $10,1$  cm, o valor de  $T$  é igual a  $0,79$  s, e não de  $0,75$  s, como se esperava.

Tabela 4.3- Síntese dos resultados do estudo da influência da profundidade.

Ensaio $h$ (cm)	$T$ (s) (esperado)	$T$ (s) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo de $T$ (-)	$\lambda$ (m) (esperado)	$\lambda$ (m) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo de $\lambda$ (-)	$\Sigma$ erro relativo de $z$ (-)	$\lambda/h$ (esperado) (-)
15,2	0,75	0,79	51,04	0,75	0,84	549,15	1218,42	4,9
13,3	0,75	0,75	55,65	0,72	3,53	13641,83	490,20	5,4
12,3	0,75	0,75	46,11	0,68	0,77	520,45	702,72	5,5
11,3	0,75	0,75	<b>29,41</b>	0,66	0,68	<b>238,97</b>	570,55	5,8
10,1	0,75	0,77	143,17	0,64	0,68	301,04	<b>475,37</b>	6,3
8,9	0,75	0,75	85,88	0,60	0,56	720,34	1060,95	6,7
6,8	0,75	0,75	42,88	0,56	0,62	1848,42	958,91	8,2

A negrito assinalam-se os menores erros acumulados.

Quanto à capacidade de deteção das características das ondas por parte do algoritmo, é possível observar que nas estimativas de  $T$ , obtiveram-se muito boas aproximações dos valores esperados. Nos resultados de  $\lambda$ , o mesmo já não aconteceu. Essa diferença pode estar relacionada com o facto de o comprimento do canal ser pequeno, na medida em que na *timestack*, o número de cristas observadas ao longo do canal no mesmo instante do ensaio ser substancialmente menor que o número de cristas observadas ao longo do ensaio para a mesma posição no canal. Esta diferença não era significativa no artigo de Santos *et al.* (2022b) devido ao

elevado número de cristas encontradas em ambas as direções da *timestack* (Figura 2.2). Não obstante, numa perspetiva geral, o programa conseguiu (com alguns erros) detetar uma diminuição dos comprimentos de onda ao longo dos ensaios, tal como é demonstrado pelos valores medianos de  $\lambda$ . Relativamente à qualidade dos resultados, os valores estimados de  $T$  continuam a ser as características das ondas que menos erros produzem. O mesmo já não acontece com os valores de  $\lambda$  e  $h$ . A Tabela 4.3 mostra que para o teste  $h = 11,3$  cm obtiveram-se menores erros para  $T$  e  $\lambda$ .

Quaisquer outras informações sobre este ensaio podem ser consultadas na ficha de ensaio presente no Anexo 4.

### 4.4.3 Influência da altura de onda

Apresenta-se agora o estudo da variação da altura de onda,  $H$ , com a variação da amplitude de movimento do batedor. Simultaneamente, avalia-se a capacidade do algoritmo utilizado na deteção das características das ondas aqui ensaiadas.

Nos ensaios enunciados de seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios deste estudo, mantendo-se como constantes:  $h = 12,3$  cm; a geometria do fundo original do canal; e  $T = 0,75$  s. Fez-se variar, entre 1,5 e 3,5 cm, a distância ao eixo de rotação no disco do batedor para cinco posições possíveis, que conduziu a uma variação de  $H$  entre 1,7 e 4,0 cm.

#### 4.4.3.1 Distância ao eixo do disco de 1,5 cm ( $H = 1,7$ cm)

Na Figura 4.91 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 8,7 s (208 *frames*). Na Figura 4.92 à Figura 4.94, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,66 m.

Na Figura 4.92, os resultados obtidos para  $T$  estimado resultam em erros relativos da ordem de 1 % em quase toda a extensão do canal, exceto em zonas pontuais. O valor mediano de  $T$  é de 0,75 s.

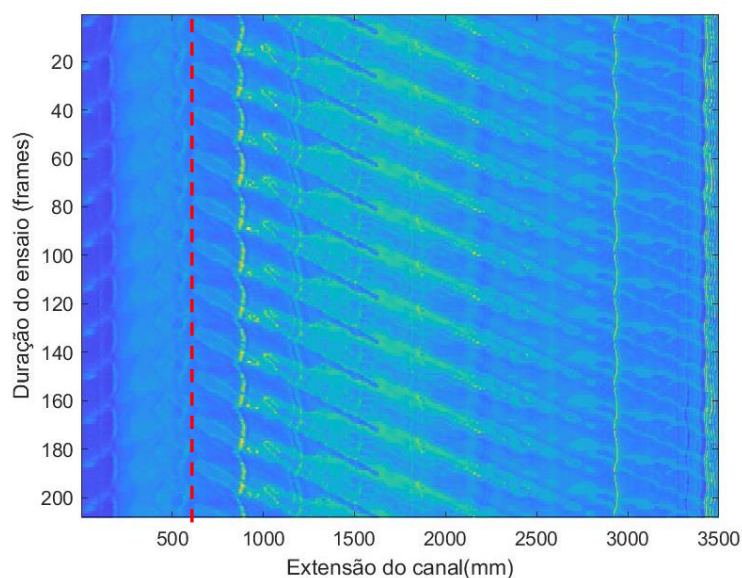


Figura 4.91- *Timestack* para o ensaio da altura de onda para uma distância de 1,5 cm ao eixo do disco.  
A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bateror.

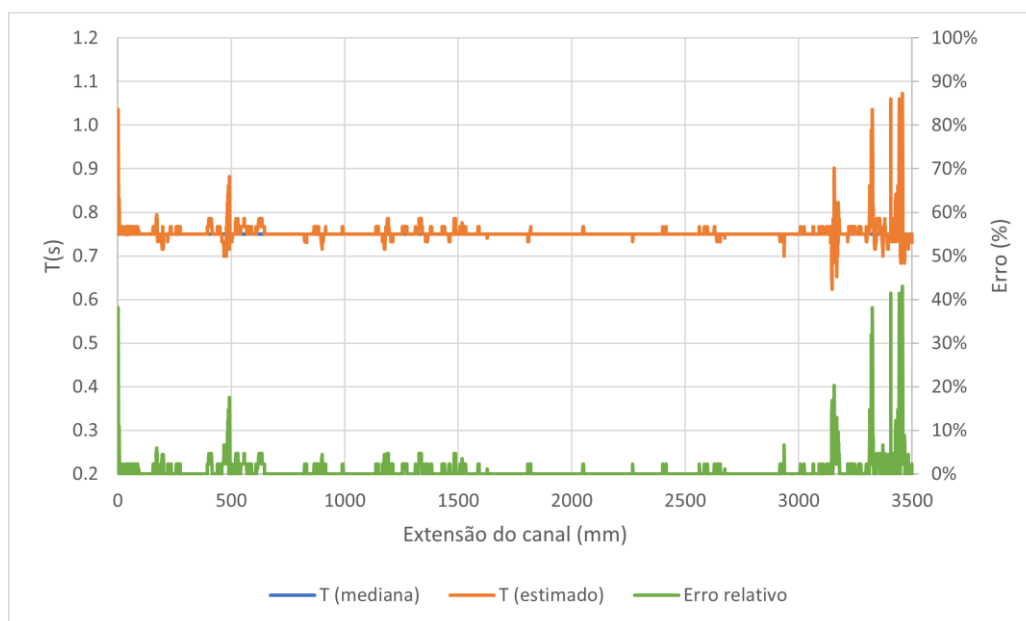


Figura 4.92- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 1,5 cm.

Relativamente à Figura 4.93, os valores de  $\lambda$  são pouco apreciáveis na medida em que tomam valores com erros associados na ordem dos 30 a 40 % ao longo de todo o canal. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,82 m.

Quanto à Figura 4.94, à semelhança dos valores de  $\lambda$ , os valores de  $z$  aqui apresentados são totalmente irrealistas, com valores de erro relativo superiores ou perto de 70 % na sua maioria.

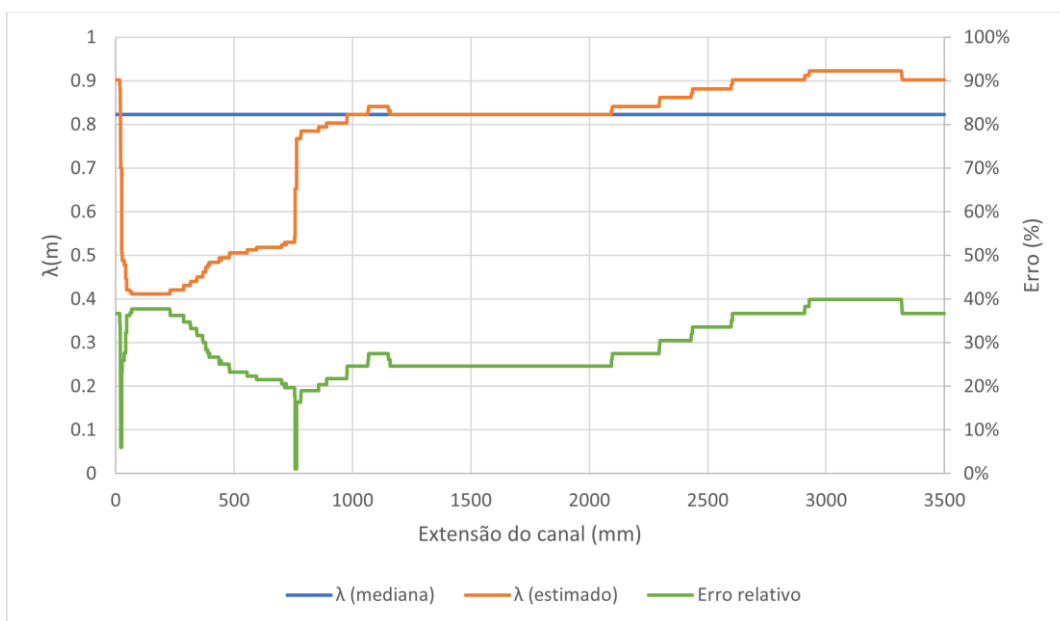


Figura 4.93- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 1,5 cm.

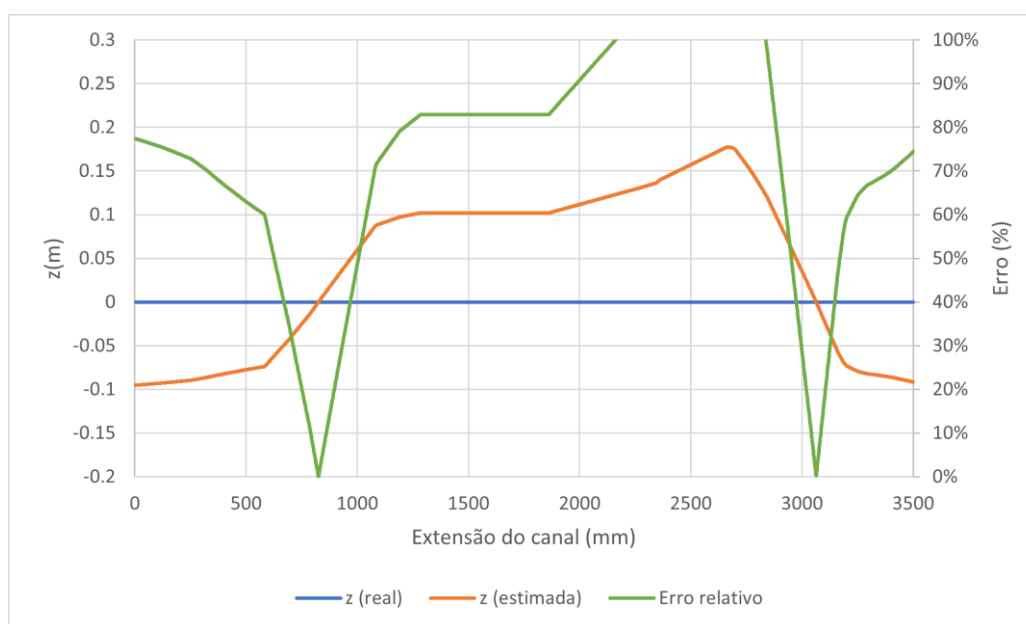


Figura 4.94- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 1,5 cm.

#### 4.4.3.2 Distância ao eixo do disco de 2,0 cm ( $H = 2,1$ cm)

Na Figura 4.95 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 8,3 s (199 *frames*). Na Figura 4.96 à Figura 4.98, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respectivamente, 0,75 s e 0,70 m.

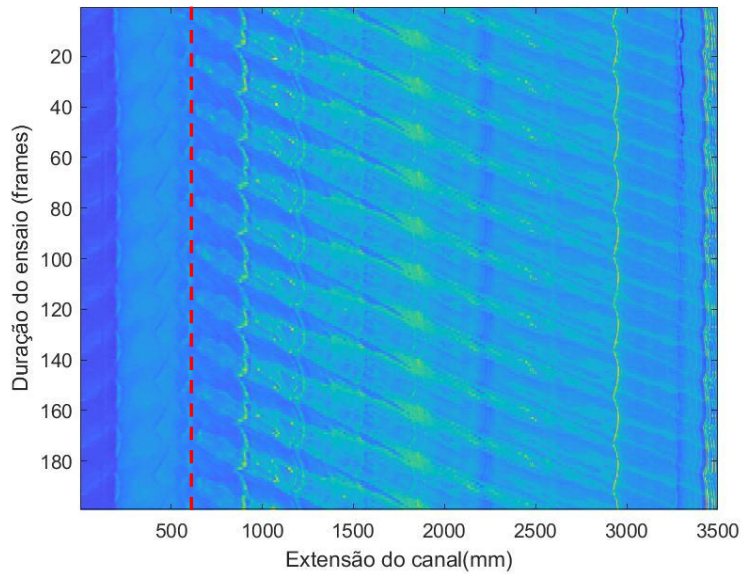


Figura 4.95- *Timestack* para o ensaio da altura de onda para uma distância de 2,0 cm ao eixo do disco. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do bater.

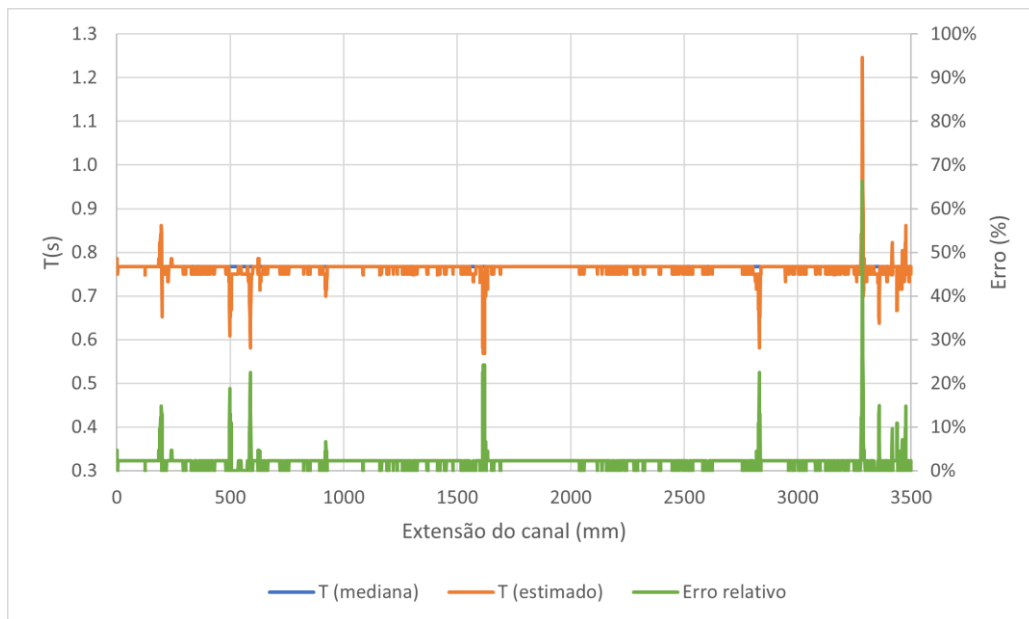


Figura 4.96- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,0 cm.

Na Figura 4.96, observa-se que os resultados dos erros relativos de  $T$  são da ordem dos 2 % na grande maioria da extensão do canal, exceto em zonas pontuais. O valor mediano de  $T$  é de 0,77 s.

Analisando agora a Figura 4.97, apenas na zona central do canal se obtêm melhores resultados de  $\lambda$ . Ainda assim, o valor do erro relativo nessa zona é da ordem dos 25 %. Nas extremidades as diferenças entre os valores estimados e esperados mantêm-se elevados. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,84 m.

Quanto à Figura 4.98, pode observar-se que à semelhança do ensaio anterior, que também não se obtêm resultados de qualidade aceitável (erros quase sempre superiores a 70 %).

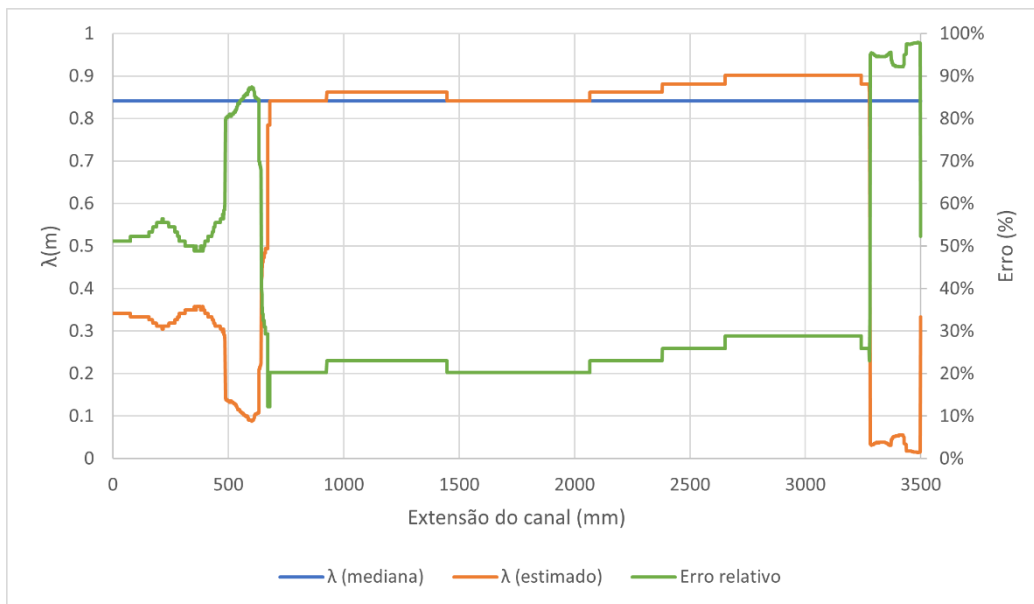


Figura 4.97- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,0 cm.

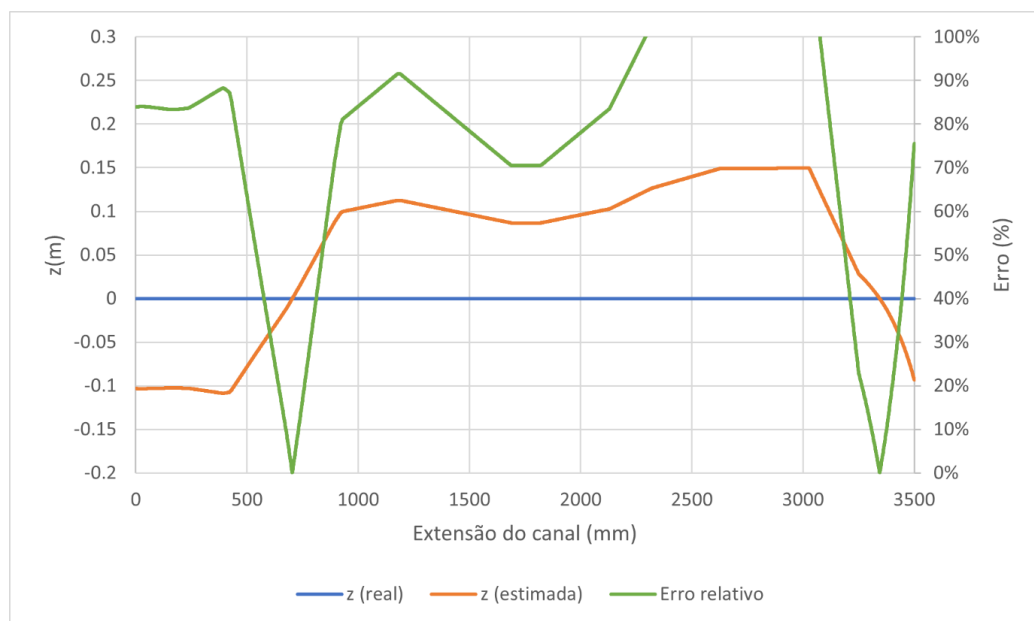


Figura 4.98- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,0 cm.

### 4.4.3.3 Distância ao eixo do disco de 2,5 cm ( $H = 2,8$ cm)

Na Figura 4.99 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 9,0 s (216 *frames*). Na Figura 4.100 à Figura 4.102, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,69 m.

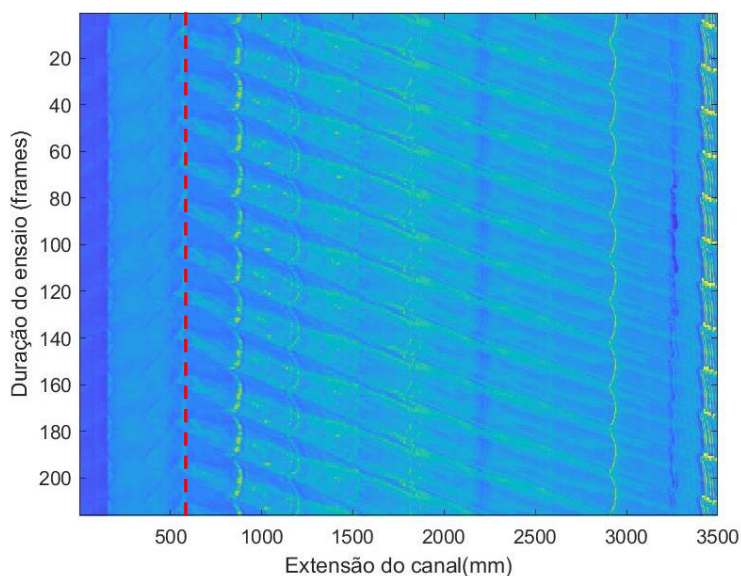


Figura 4.99- *Timestack* para o ensaio da altura de onda para uma distância de 2,5 cm ao eixo do disco. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

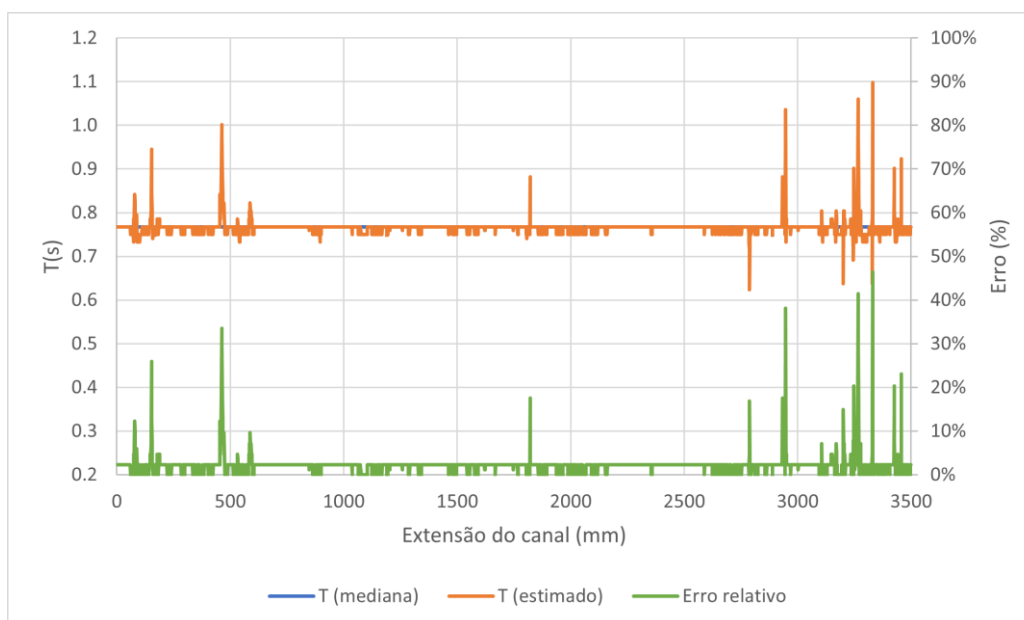


Figura 4.100- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,5 cm.

Relativamente à Figura 4.100, verificam-se resultados com erros da ordem dos 2 %, à semelhança com o ensaio anterior, na grande maioria da extensão do canal. O valor mediano de  $T$  é de 0,77 s.

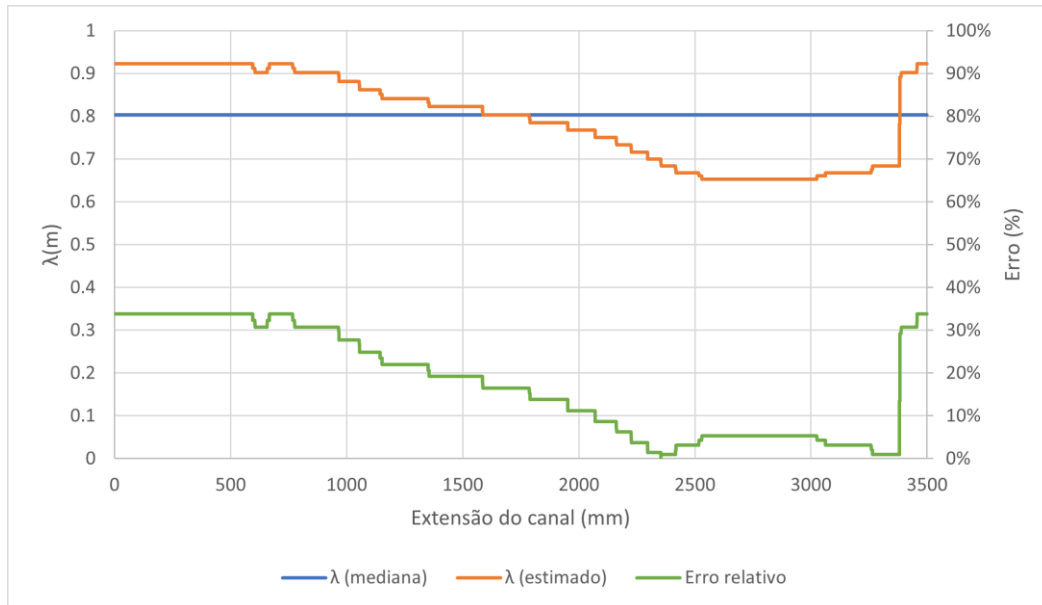


Figura 4.101- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,5 cm.

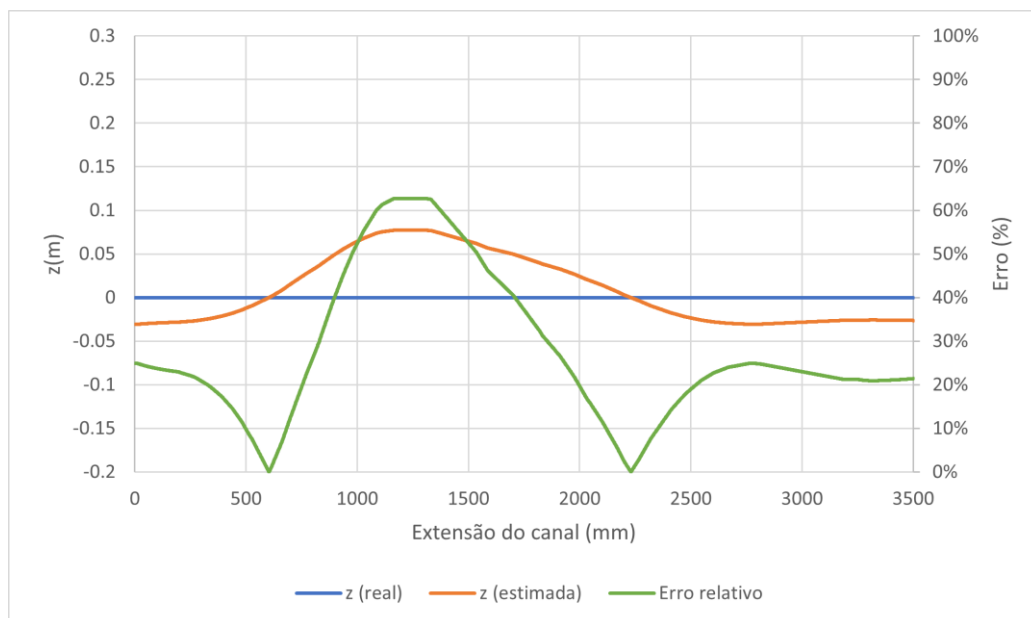


Figura 4.102- Valores medianos e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 2,5 cm.

Analisando agora a Figura 4.101, pode verificar-se que na extremidade mais próxima do canal, os valores estimados oferecem resultados aceitáveis na ordem dos 5 a 10 % nos últimos

1400 mm de extensão do canal. Isso não acontece na restante zona do canal, onde o erro tende a aumentar até estabilizar no patamar dos 32 % de erro. O valor mediano de  $\lambda$  é de 0,80 m.

Olhando para a Figura 4.102, é de notar que nas extremidades ([0, 750] e [2000, 3500] mm) a diferença percentual toma valores da ordem dos 20 % enquanto na zona central esse valor tende a aumentar até um valor máximo de 62 %.

#### 4.4.3.4 Distância ao eixo do disco de 3,0 cm ( $H = 3,3$ cm)

Na Figura 4.103 apresenta-se a *timestack* para este ensaio. A duração do ensaio foi de 7,0 s (168 *frames*). Na Figura 4.104 à Figura 4.106, apresentam-se os resultados das características das ondas obtidas. Os valores de  $T$  e  $\lambda$  esperados para este ensaio são, respetivamente, 0,75 s e 0,72 m.

Na Figura 4.104, pode observar-se que os resultados obtidos de  $T$  estão associados a erros da ordem dos 4 % na maioria da extensão do canal. No entanto, em algumas zonas pontuais esse resultado piora. O valor mediano de  $T$  é de 0,77 s.

Quanto aos resultados de  $\lambda$  presentes na Figura 4.105, à semelhança com o ensaio anterior, na extremidade mais próxima à câmara estão presentes os resultados que contêm menores erros associados. À medida que a distância à câmara aumenta, os erros também aumentam. Na extremidade os erros tomam valores da ordem dos 5 a 10 % no troço de 1800 a 3200 mm e, até aos primeiros 2000 mm, este valor aumenta de 10 para 30 % gradualmente.

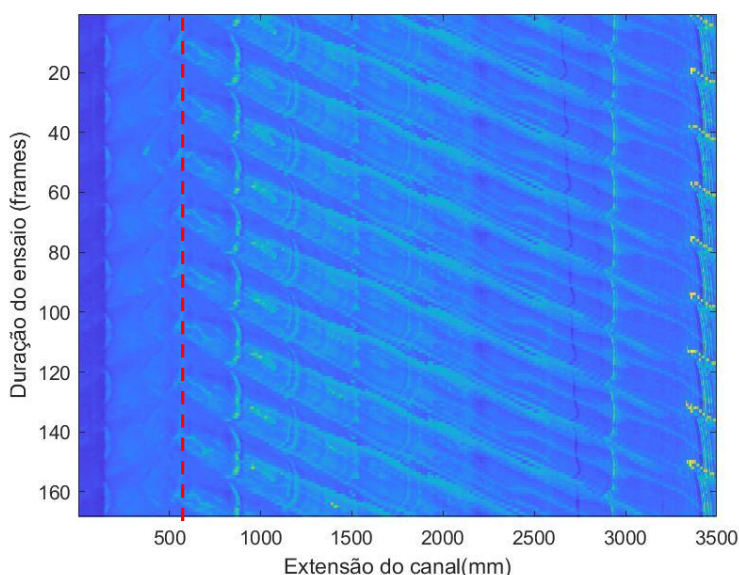


Figura 4.103- *Timestack* para o ensaio da altura de onda para uma distância de 3,0 cm ao eixo do disco. A linha a vermelho representa a amplitude máxima do batedor.

Relativamente aos resultados de  $z$ , da mesma forma que para  $\lambda$ , é junto à extremidade do canal que tem a câmara onde se registam os menores erros. Neste caso, nos últimos 1250 mm de extensão de canal, o erro associado é da ordem dos 10 %. Na restante extensão, os erros tomam valores de certa forma elevados que os valores de  $z$  não podem ser considerados como realistas.



Figura 4.104- Valores medianos e estimados de  $T$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 3,0 cm.

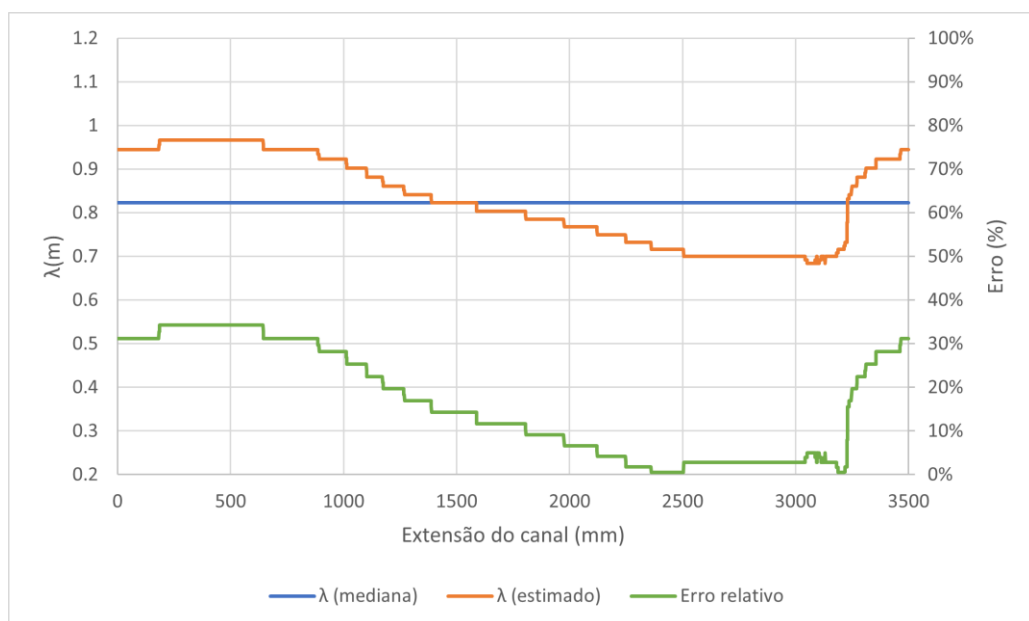


Figura 4.105- Valores medianos e estimados de  $\lambda$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 3,0 cm.

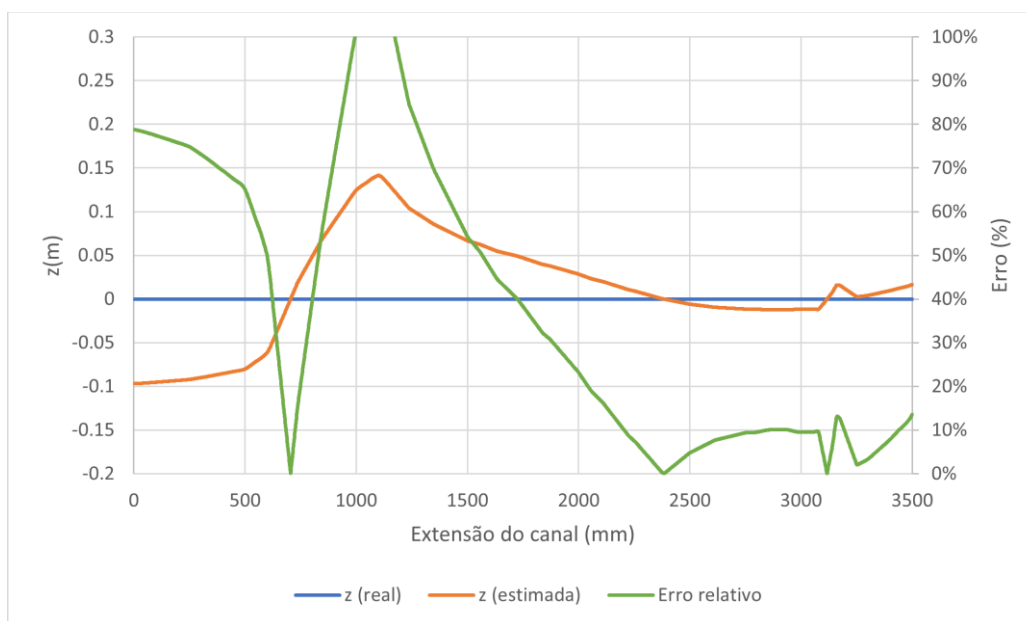


Figura 4.106- Valores médios e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio da altura de onda, para uma distância ao eixo do disco de 3,0 cm.

#### 4.4.3.5 Distância ao eixo do disco de 3,5 cm ( $H = 4,0$ cm)

Como as condições deste ensaio coincidem com as do ensaio apresentado no subcapítulo 4.4.2.3, remete-se os resultados deste ensaio para os que aí estão expostos.

#### 4.4.3.6 Súmula dos resultados obtidos

Na Tabela 4.4, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para uma variação de  $H$  no estudo da influência da profundidade. Como seria de esperar, a diminuição da amplitude do movimento do batedor coincide com a diminuição dos valores de  $H$ .

Relativamente à capacidade de o algoritmo detetar as características das ondas, verifica-se pela comparação entre os valores esperados de  $T$  e os médios, que as estimativas de  $T$  por um lado demonstraram ter boas aproximações no ponto de vista global (através do somatório do erro relativo). No entanto, o valor mediano de  $T$  teve nestes testes a maior diferença registada comparativamente aos estudos anteriores. Isso pode estar relacionado com a hora a que se começou o ensaio (12h30), pois é quando começa a existir uma menor incidência direta de luz natural sobre o canal e pelo facto acrescido de estar nublado nesse dia (como se indica nas observações da ficha de ensaio no Anexo 5). Quanto aos valores de  $\lambda$ , pode-se observar maiores diferenças do valor esperado para os valores médios, que podem estar relacionados com a luminosidade disponível no laboratório e, também, com a altura de onda. Para valores de  $H$  mais baixos, pode não haver uma clara distinção entre os pixels das cristas

e cavas da onda. Observando a evolução do somatório dos erros relativos de  $\lambda$ , verifica-se que quanto menor o valor de  $H$ , maior o somatório do erro relativo de  $\lambda$  associado. A Tabela 4.4 mostra que para o teste  $H= 4,0$  cm obtiveram-se menores erros para  $\lambda$  e  $T$ .

Tabela 4.4- Síntese dos resultados do estudo da influência da altura de onda.

Ensaio	$H$ (cm) (esperado)	$T$ (s) (esperado)	$T$ (s) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo (-) de $T$	$\lambda$ (m) (esperado)	$\lambda$ (m) (mediano)	$\Sigma$ erro relativo (-) de $\lambda$	$\Sigma$ erro relativo (-) de $z$
D=1,5 cm	1,7	0,75	0,75	<b>24,71</b>	0,66	0,82	1037,28	2671,07
D=2,0 cm	2,1	0,75	0,77	74,77	0,70	0,84	1222,47	2768,26
D=2,5 cm	2,8	0,75	0,77	76,44	0,69	0,80	618,39	970,36
D=3,0 cm	3,3	0,75	0,77	103,15	0,72	0,82	581,85	1359,48
D=3,5 cm	4,0	0,75	0,75	46,11	0,68	0,77	<b>520,45</b>	<b>702,72</b>

A negrito assinalam-se os menores erros acumulados.

## 4.5 Ensaios de fundo móvel

Neste subcapítulo pretende-se apresentar os resultados obtidos para os ensaios de fundo móvel e analisar os resultados obtidos, utilizando a segunda metodologia deste trabalho. Para estes ensaios, foram analisados dois tipos de perfil. Um perfil plano horizontal e um perfil com barra, típico de zonas costeiras. Foi utilizada baquelite para simular os sedimentos arenosos que tipicamente se encontram em zonas costeiras.

### 4.5.1 Perfil plano horizontal

Neste ensaio, devido à ocorrência de rebentação, como se pode observar na Figura 4.107, não será realizada a análise de resultados. No entanto, apresentam-se aqui os perfis iniciais e finais obtidos neste ensaio. Como se pode observar, o perfil de sedimentos é limitado nas extremidades por duas peças metálicas instaladas no canal, utilizadas meramente para conter os sedimentos entre elas. O perfil inicial deste ensaio (Figura 4.108-A) era plano em toda a sua extensão. Contudo, no final do ensaio, verificou-se uma zona de desgaste no início do perfil e outra de depósito dos sedimentos a 95,8 cm do início do perfil (Figura 4.108-B).

Este ensaio serviu, sobretudo, para compreender a sensibilidade dos sedimentos relativamente à profundidade ensaiada, ajudando a preparar o último ensaio presente neste texto, que corresponde a uma configuração de fundo mais próxima da que pode ser encontrada em zonas costeiras.



Figura 4.107- Ocorrência de rebentação no ensaio de fundo móvel com perfil plano horizontal.

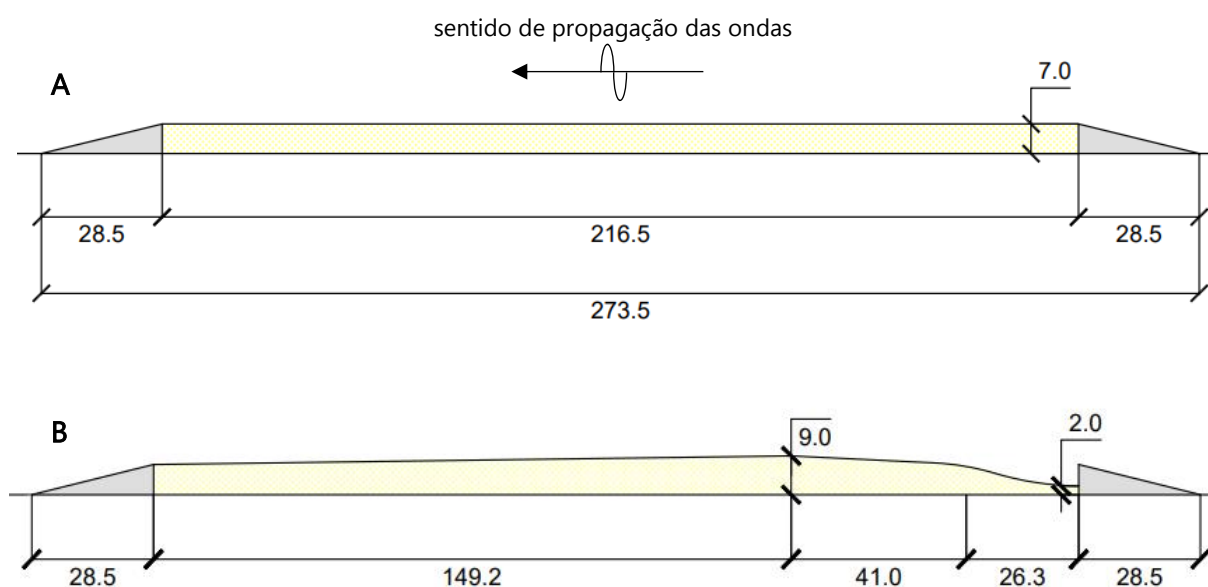


Figura 4.108- Geometrias dos perfis de ensaio plano horizontal.

Geometrias: (A) pré e (B) pós ensaio. Desenhos meramente ilustrativos (não estão à escala). Consideram-se os valores aqui presentes expressos em cm.

## 4.5.2 Perfil com barra

Neste subcapítulo apresenta-se, como geometria de fundo, um perfil de barra e fossa típico de zonas costeiras (Figura 4.109). Pretende-se com este estudo avaliar a qualidade dos resultados de deteção da batimetria no canal (pela segunda metodologia), comparando com a geometria real do fundo, nos instantes em que esta é conhecida. Os ensaios deste estudo

foram separados em dois dias e considerou-se sempre uma profundidade constante de 11,1 cm, uma distância ao eixo do disco constante e igual a 3,5 cm e dois períodos de onda diferentes (em cada dia).

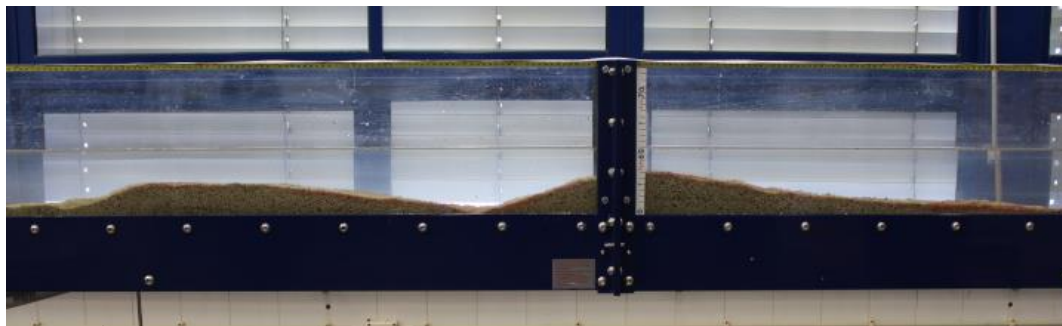


Figura 4.109- Perfil tipo, com barra, para ensaios com fundo móvel.

#### 4.5.2.1 Ensaios preliminares

No primeiro dia de ensaios, pretendeu-se avaliar o comportamento dos sedimentos para esta nova disposição, face à energia das ondas. Para tal, consideraram-se dois ensaios com períodos de onda diferentes. O primeiro ensaio com  $T = 1,24$  s e o segundo com  $T = 0,87$  s. As geometrias do fundo foram registadas em três instantes diferentes: no início dos ensaios, entre o primeiro e o segundo ensaio e no final do segundo ensaio. Consideraram-se os perfis apresentados na Figura 4.110.

Como se pode observar na Figura 4.110-A, no instante inicial ( $t=0$ ), existem duas cristas e uma fossa. A primeira crista com uma cota de 7,0 cm e a segunda de 5,5 cm distanciadas entre si de um total de 78,0 cm. Quanto à fossa, esta registou uma cota nula a uma distância 25,0 cm da primeira crista.

No final do primeiro ensaio ( $t=20$  min) e início do segundo ( $t=0$ ), verificou-se que ambas as cristas reduziram a sua cota em 2,0 e 1,0 cm, respetivamente, na primeira e segunda crista. Assinalou-se que mantiveram-se as suas posições iniciais. Isso não aconteceu com a fossa, que evoluiu em 10,0 cm no sentido da propagação das ondas e aumentou a sua cota em 2,0 cm (Figura 4.110-B).

Relativamente às cotas registadas no fim do segundo ensaio ( $t=10$  min), no primeiro dia (Figura 4.110-C), pode observar-se que a primeira crista evoluiu em 10,0 cm no sentido da segunda, que permaneceu na mesma posição. A fossa aproximou-se em 6,0 cm da segunda crista. A cota da primeira crista foi a única que reduziu e que, neste caso, passou para um  $z = 4,5$  cm. A cota da fossa, aumentou para  $z = 2,5$  cm.

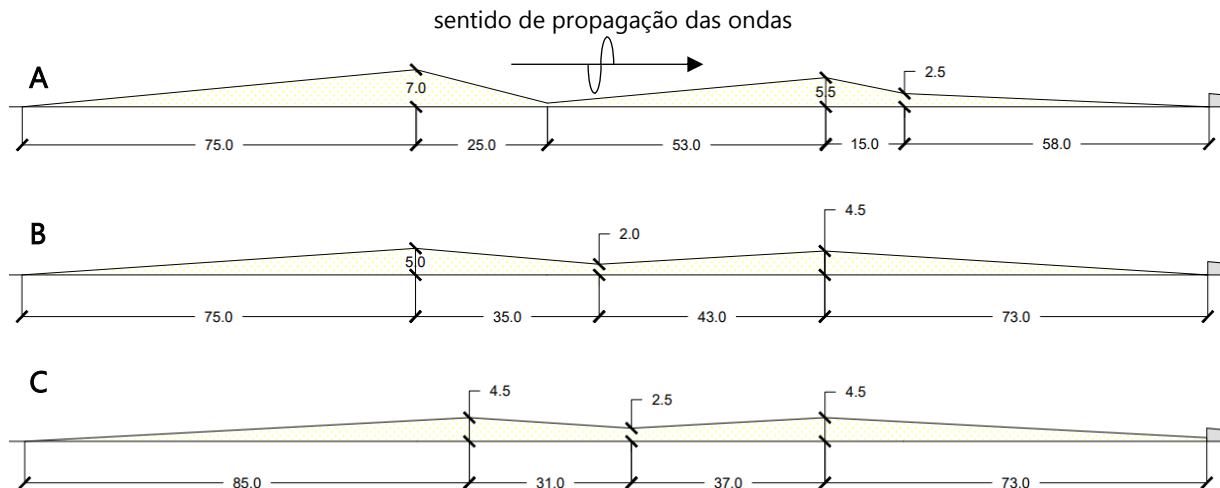


Figura 4.110- Geometrias dos perfis dos ensaios preliminares com barra.

Geometrias do perfil: (A) inicial ( $t=0$ ); (B) após o primeiro ensaio ( $t=20$  min); (C) após o segundo ensaio ( $t=10$  min). Desenhos meramente ilustrativos (não estão à escala). Consideram-se os valores aqui presentes expressos em cm.

#### 4.5.2.1.1 $T=1,24$ s

Na Figura 4.111 e Figura 4.113, apresentam-se as linhas de tendência da propagação das cristas das ondas obtidas para este ensaio nos instantes iniciais ( $t=0$ ) e finais ( $t=20$  min), respetivamente. A Figura 4.112 e Figura 4.114, ilustram as comparações obtidas entre o perfil real e o estimado. As características das ondas geradas pelo batedor, neste ensaio, foram:  $T = 1,24$  s;  $\lambda = 1,23$  m; e  $H = 2,5$  cm.

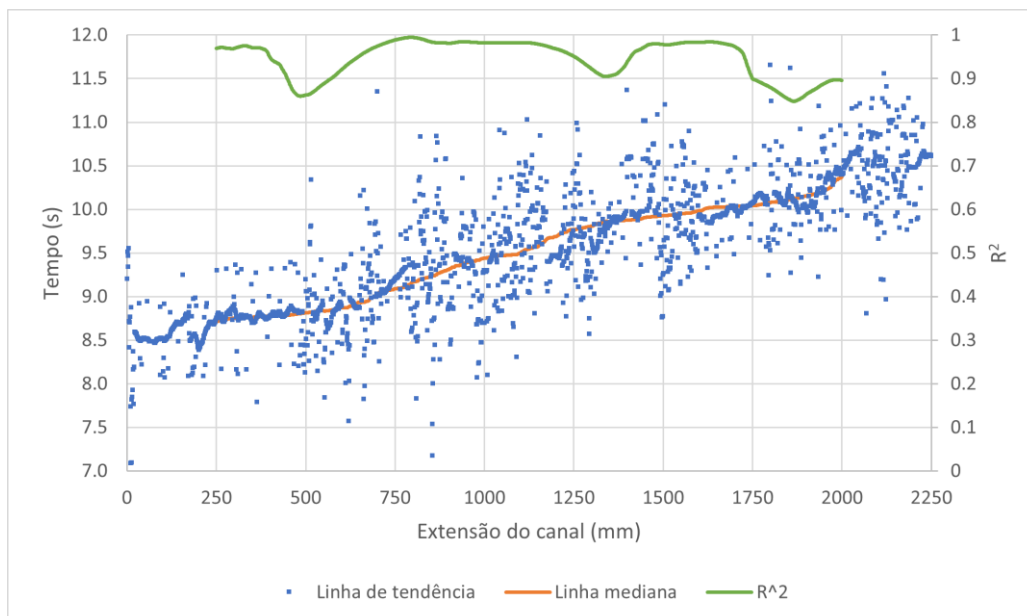


Figura 4.111- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com  $T=1,24$  s, no instante  $t=0$ .

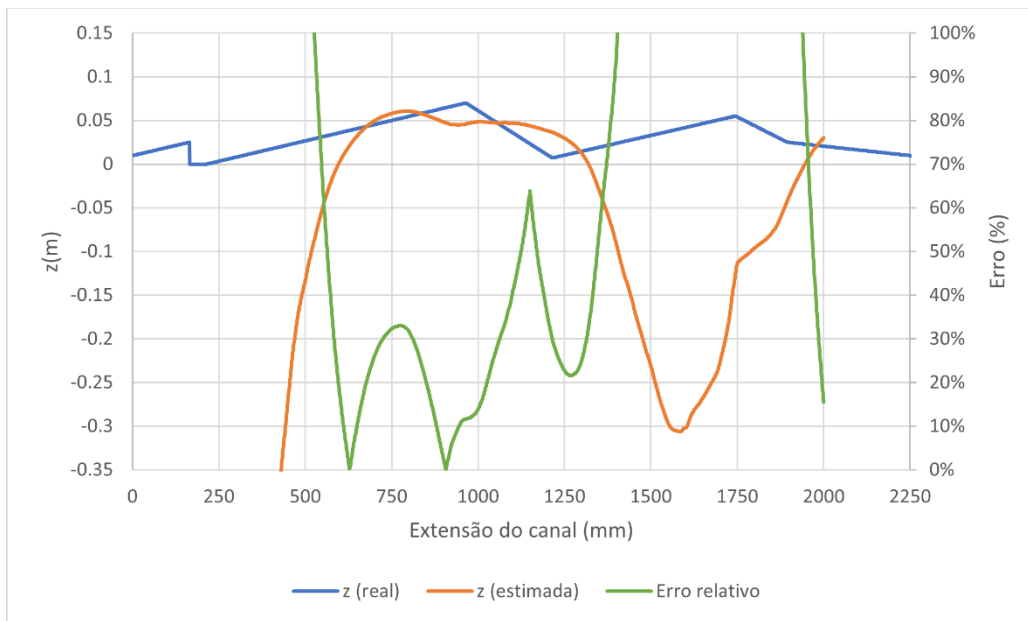


Figura 4.112- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio preliminar com  $T=1,24$  s, no instante  $t=0$ .

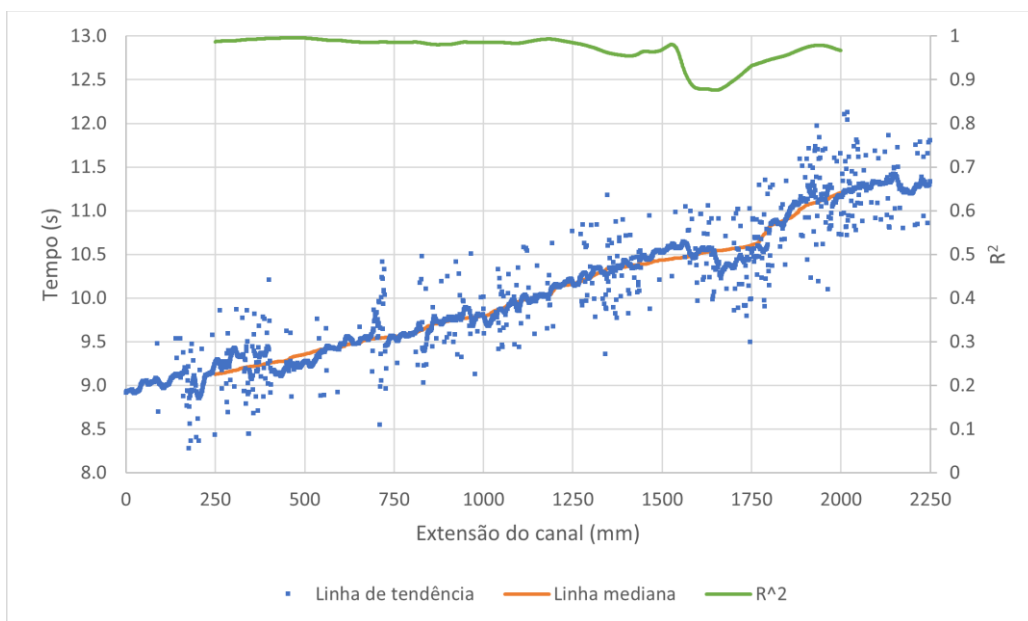


Figura 4.113- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com  $T=1,24$  s, no instante  $t=20$  min.

Como se pode observar na Figura 4.112, apenas é possível identificar com alguma precisão a localização da primeira barra. Neste caso, entre os primeiros 600 a 1100 mm de extensão do canal verificam-se estimativas sensivelmente coincidentes com a posição da primeira crista da barra. Os erros associados à localização dessa barra são da ordem dos 30 % nessa zona, pelo que o  $z$  estimado é de cerca de 5,0 cm. Contudo, não é clara a existência de uma segunda barra pelos valores de  $z$  estimados.

Quanto aos resultados da Figura 4.114, pode verificar-se que os resultados evidenciam a existência de duas barras: a primeira com o pico nos primeiros 1200 mm e a segunda com o pico aos 2000 mm. Neste caso, ambas as cristas estimadas aparecem ligeiramente adiantadas (em cerca de 250 mm relativamente ao perfil real). Relativamente à evolução dos perfis estimados, seria de esperar que a cota das cristas diminuísse ao longo do ensaio e as suas posições se mantivessem iguais, mas tal não aconteceu, tendo a primeira crista mantido uma cota estimada constante de cerca de 5 cm, coincidindo ainda assim com a cota da primeira crista no final do ensaio. A cota da segunda crista aparenta ter um  $z = 9,0$  cm.

Tal como se apresenta nas linhas de tendência, as zonas onde se obtêm piores valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) coincidem com as zonas com maiores erros associados, respetivamente em cada instante do ensaio. Contrariamente ao que foi observado para os fundos fixos, na zona mais próxima da câmara de vídeo as estimativas da profundidade são piores, pois há uma maior dispersão de valores da celeridade nesse local que se reflete pela diminuição de valores de  $R^2$ .

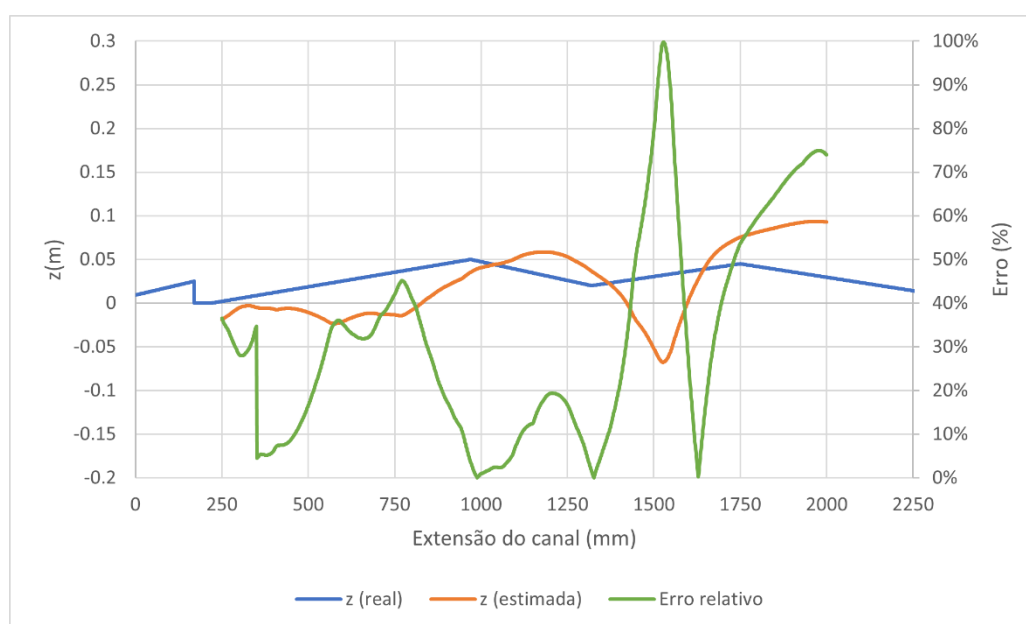


Figura 4.114- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio preliminar com  $T=1,24$  s, no instante  $t=20$  min.

#### 4.5.2.1.2 $T=0,87$ s

Na Figura 4.115 e na Figura 4.117, apresentam-se as linhas de tendência da propagação das cristas das ondas obtidas para este ensaio nos instantes iniciais ( $t=0$ ) e finais ( $t=10$  min), respetivamente. Na Figura 4.116 e na Figura 4.118, comparam-se os perfis reais e estimados. As características das ondas geradas pelo batedor foram:  $T = 0,87$  s;  $\lambda = 0,82$  m; e  $H = 3,8$  cm.

Como se pode observar na Figura 4.116, a presença de duas barras não é bem clara. No entanto, as cotas nos últimos 1000 mm do canal acompanham melhor as variações do perfil real, onde estas coincidem com a posição daquilo que parece ser a segunda barra (aos 1750 mm do canal). Nesta zona o perfil estimado apresenta sempre cotas de cerca de 2,5 cm superiores às esperadas (erros na ordem dos 30 %), ou seja, um  $z$  esperado de 6,0 cm.

Na Figura 4.118 parece suceder-se o inverso, com melhores adaptações às variações reais do perfil na primeira barra nos primeiros 1000 mm de extensão do canal ( $z$  estimado de 4,0 cm), com erros a variarem entre os 10 e os 30 % e piores resultados junto à segunda barra. A presença da segunda barra nos resultados de  $z$ , aparenta localizar-se cerca de 100 mm adiantada do perfil real, com um  $z$  estimado de cerca de 7,0 cm. Quanto à evolução dos perfis, neste ensaio, é possível verificar um abaixamento da cota na zona inicial do perfil tal como acontece nas cotas reais. Na zona final do perfil, onde seria de esperar uma cota constante na segunda barra, verifica-se um aumento das cotas estimadas.

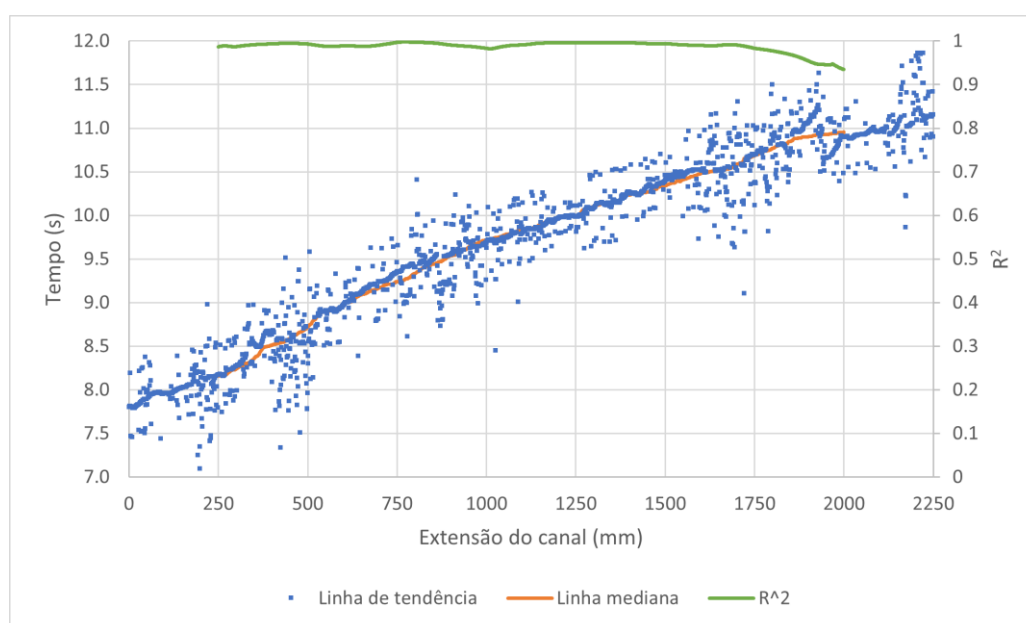


Figura 4.115- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com  $T=0,87$  s, no instante  $t=0$ .

De notar que, tal como aconteceu para os fundos fixos, a utilização de períodos menores e alturas de onda maiores, deveria conduzir a melhores resultados face ao ensaio anterior. Na linha de tendência inicial do ensaio, os valores de  $R^2$  apresentam na totalidade do canal ter uma muito boa aproximação das celeridades nesse ensaio ( $R^2 \approx 1$ ). No entanto, as cotas estimadas nos primeiros 1000 mm de extensão do canal apresentam ainda erros elevados (entre os 40 e 80 %). Isso pode estar relacionado, por um lado, com o afastamento à câmara traduzir-se

em piores resultados na qualidade das distâncias retificadas e, por outro lado, com o facto de se estar na presença de profundidades intermédias ( $\lambda/h=7,4$ ,  $>2$ ) e não em pequenas profundidades, tal como se admite aquando da utilização da Eq. (2.4). Esta situação também se sucede para o instante final deste ensaio ( $t=10$  min).



Figura 4.116- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio preliminar com  $T=0,87$  s, no instante  $t=0$ .

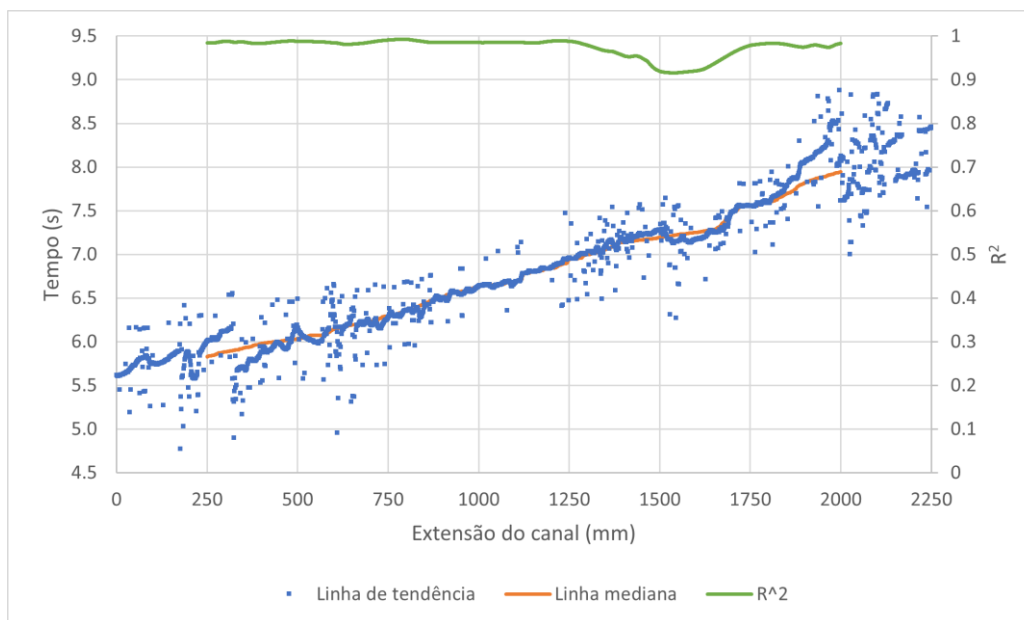


Figura 4.117- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio preliminar com  $T=0,87$  s, no instante  $t=10$  min.

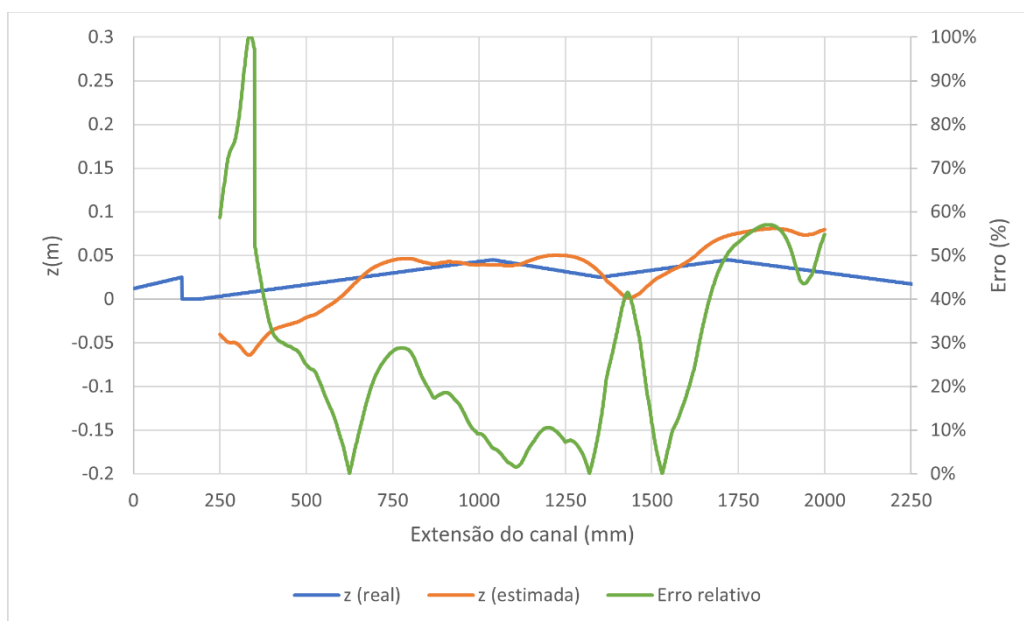


Figura 4.118- Valores reais e estimados de z e erro relativo para o ensaio preliminar com  $T=0,87$  s, no instante  $t=10$  min.

#### 4.5.2.2 Ensaios finais

No segundo dia, como já se tinha maior sensibilidade para o comportamento da baquelite na presença deste tipo de perfil, foi considerado o mesmo tipo de fundo. Devido ao facto dos comprimentos de onda de 1,23 e 0,82 m, obtidos no primeiro dia deste estudo, serem superiores à distância entre a posição das duas barras desse perfil (0,68 a 0,78 m), decidiu-se considerar uma distância maior entre eles. Também se considerou uma inclinação mais suave entre a barra e a fossa, diminuindo possíveis variações batimétricas bruscas, permitindo que a onda tenha tempo/espaco para se adaptar às alterações do fundo. Neste dia consideraram-se dois períodos diferentes no batedor ( $T=1,24$  s e  $T=0,75$  s). A geometria do fundo foi também anotada em três instantes diferentes: no início dos ensaios, após o primeiro ensaio e finalmente após o segundo ensaio. A geometria de cada um deles pode ser observada na Figura 4.119.

Na Figura 4.119-A, apresenta-se o perfil do ensaio inicial e, como se pode observar, neste segundo dia, replicaram-se as barras presentes no primeiro dia. No entanto, para o instante inicial do ensaio ( $t=0$ ) a distância entre as duas barras passou agora a ser de 82,0 cm. Adicionalmente, para diminuir a o declive das barras relativamente ao dia anterior, aumentou-se a cota da fossa para 1,0 cm e a distância entre o início do perfil e a primeira crista (agora de 80,0 cm) e diminui-se a cota da segunda barra em 2 cm.

No instante final ao primeiro ensaio ( $t=15$  min), verificou-se uma descida de 2,0 cm na primeira crista e de 0,5 cm na segunda, no entanto mantiveram as suas posições no canal. Já a fossa afastou-se em 6,1 cm face à primeira barra, mantendo a sua cota inicial.

Finalmente, após o segundo e último ensaio ( $t=10$  min), registou-se uma diferença considerável na posição da primeira barra relativamente à sua posição inicial. Esta deslocou-se mais 37,0 cm e atingiu uma cota de 6,3 cm, sobrepondo-se sobre a fossa. Já a segunda barra, manteve-se na mesma posição, mas regularizou a sua cota em  $z = 2,5$  cm.

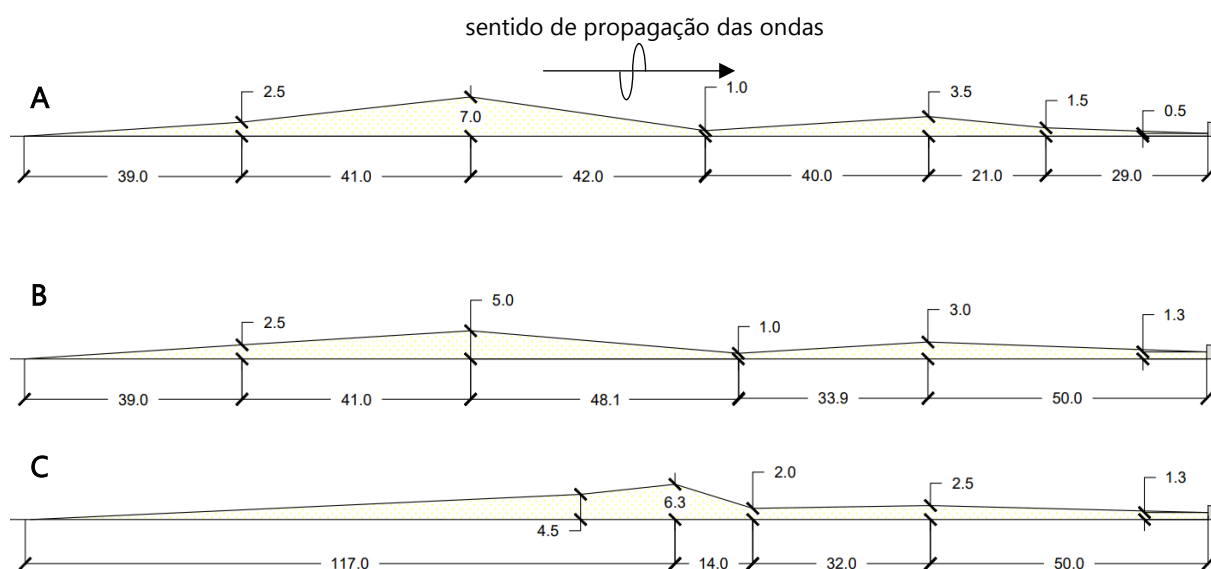


Figura 4.119- Geometrias dos perfis dos ensaios finais com barra.

Geometrias do perfil: (A) inicial ( $t=0$ ); (B) após o primeiro ensaio ( $t=15$  min); (C) após o segundo e último ensaio ( $t=10$  min). Desenhos meramente ilustrativos (não estão à escala). Consideram-se os valores aqui presentes expressos em cm.

#### 4.5.2.2.1 $T=1,24$ s

Na Figura 4.120 e na Figura 4.122, apresentam-se as linhas de tendência obtidas para este ensaio nos instantes iniciais ( $t=0$ ) e finais ( $t=15$  min), respetivamente. Na Figura 4.121 e na Figura 4.123 comparam-se os perfis reais e estimados. As características das ondas geradas pelo batedor foram:  $T= 1,24$  s;  $\lambda= 1,23$  m; e  $H= 2,5$  cm.

Observando a Figura 4.121 e a Figura 4.123, é claramente visível a presença de duas cristas no perfil estimado. No instante inicial, as estimativas das posições das cristas estão ambas atrasadas, de aproximadamente 250 mm, relativamente ao espectável. No instante final, as cristas têm posições coincidentes com as do perfil esperado, *i.e.*, nos primeiros 1000 e 1750 mm de extensão do canal. Ainda assim, as cotas estimadas para o instante final ( $t=15$  min)

são sempre cerca de 3,0 cm superiores às cotas reais das cristas (5,0 cm na primeira e 3,0 cm na segunda) e com erros da ordem dos 50 % nessas zonas. No instante inicial, as cotas da primeira crista (estimada e real) apenas diferem de 1,0 cm. No entanto, a cota da segunda crista mantém-se em 8,0 cm, diferindo da cota real da crista em 5 cm.

Quanto aos resultados de  $R^2$ , pode verificar-se que as piores aproximações da linha de tendência das cristas das ondas, no início do ensaio ( $t=0$ ), ocorrem na vizinhança da posição 1000 mm e nas extremidades do canal. No instante final do ensaio ( $t=15$  min), as piores aproximações da linha de tendência para obtenção da celeridade, verificam-se na zona central perto dos 1250 mm. Na restante extensão do canal,  $R^2$  apresenta boas aproximações (sempre acima de 0,95).

Relativamente à evolução morfológica, seria de esperar uma diminuição das cotas das cristas. Isso aconteceu, embora de forma ligeira (da ordem de 1 a 1,5 cm em ambas as cristas). No perfil real essa variação foi mais notória na primeira barra com a diminuição de 3,0 cm no final do primeiro ensaio.

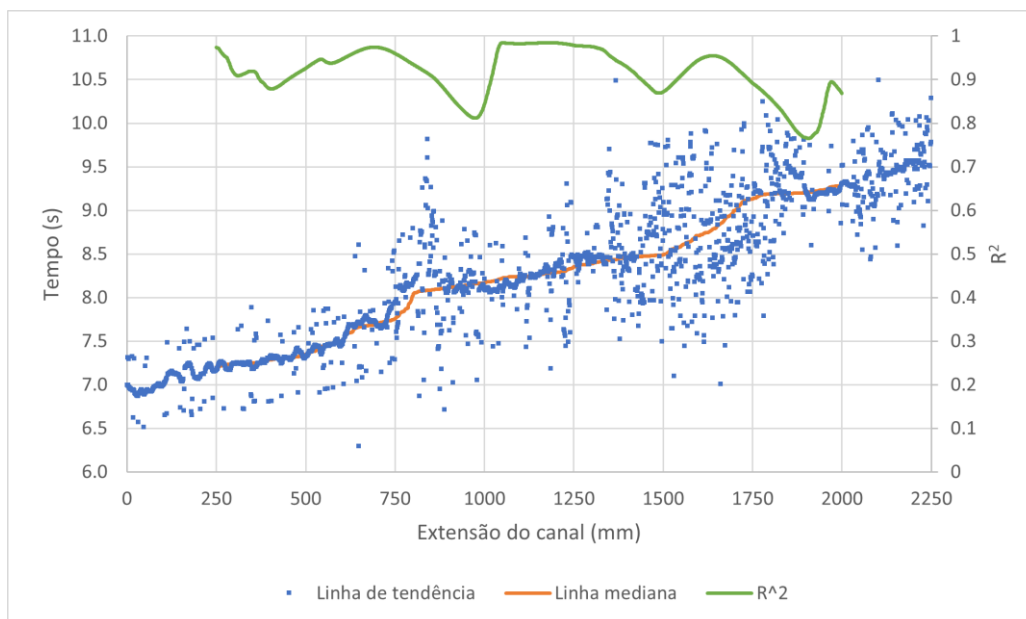


Figura 4.120- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com  $T=1,24$  s, no instante  $t=0$ .

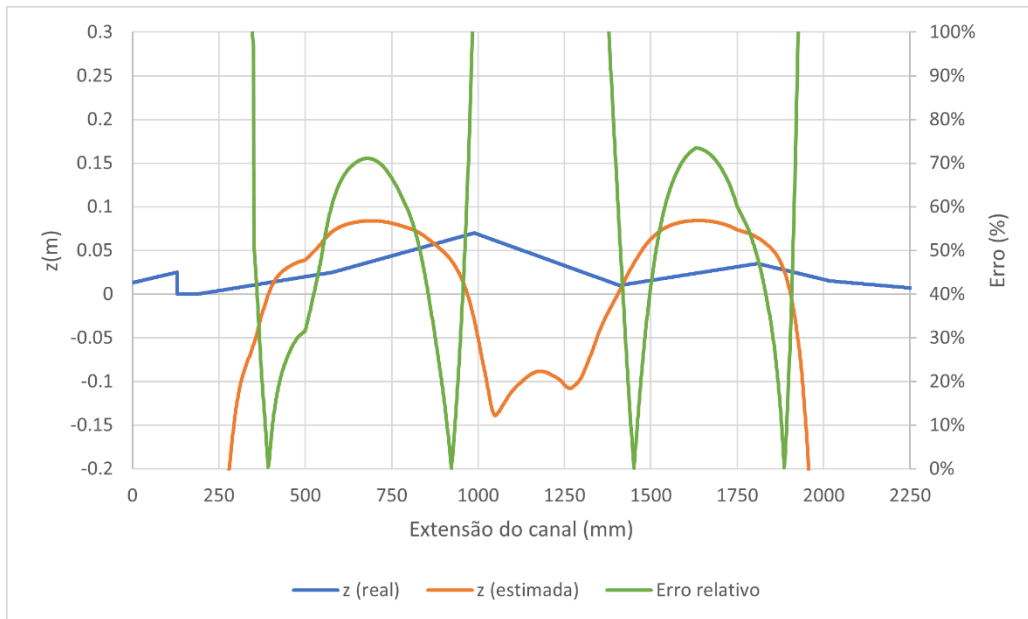


Figura 4.121- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio final com  $T=1,24$  s, no instante  $t=0$ .

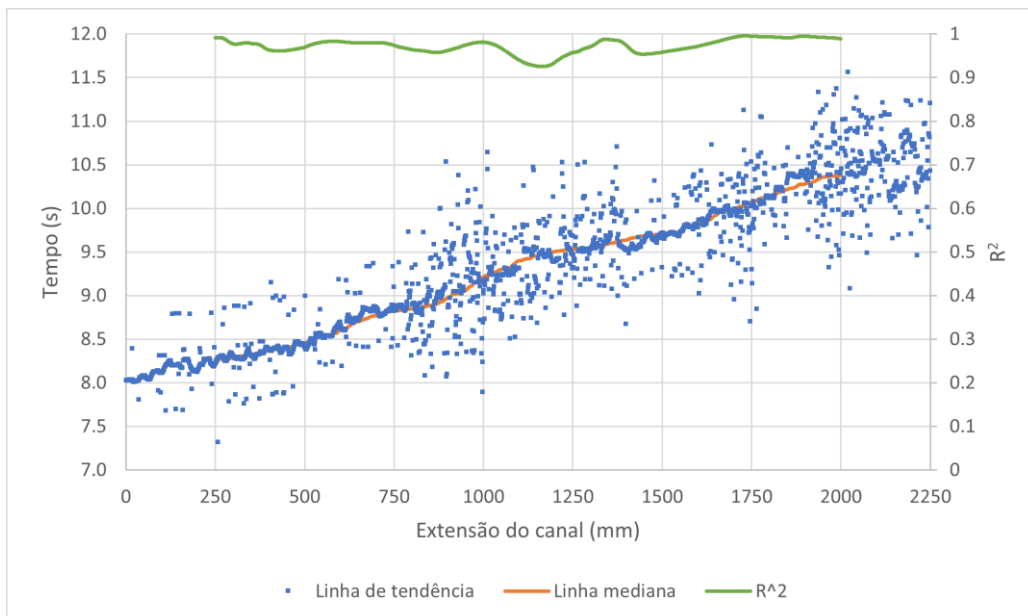


Figura 4.122- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com  $T=1,24$  s, no instante  $t=15$  min.

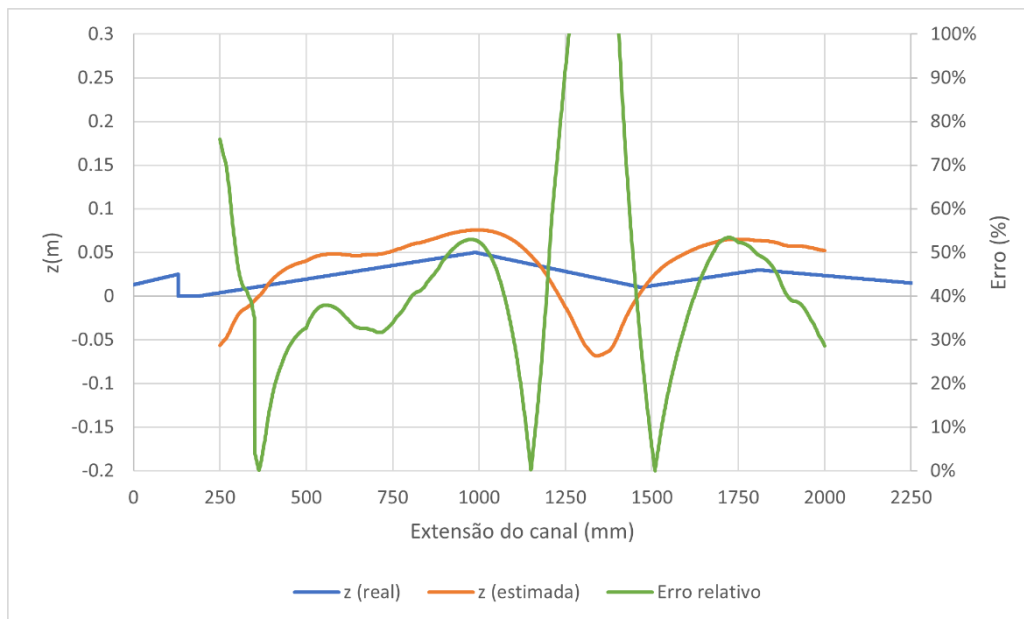


Figura 4.123- Valores reais e estimados de z e erro relativo para o ensaio final com  $T=1,24$  s, no instante  $t=15$  min.

#### 4.5.2.2.2 $T=0,75$ s

Na Figura 4.124 e Figura 4.126, apresentam-se as linhas de tendência obtidas para este ensaio nos instantes iniciais ( $t=0$ ) e finais ( $t=10$  min), respetivamente. Na Figura 4.125 e na Figura 4.127, comparam-se os perfis reais e estimados. As características das ondas geradas pelo batedor foram:  $T=0,75$  s;  $\lambda=0,68$  m; e  $H=4,6$  cm.

Como se pode observar na Figura 4.125, aparentam existir mais que duas cristas de barras no perfil estimado, nas posições 300, 900 e 1400 mm de extensão do canal. A segunda crista estimada ( $z=5,0$  cm), está apenas distanciada de 100 mm da primeira crista no perfil real, enquanto, na terceira crista ( $z=6,0$  cm), a distância relativamente à segunda crista já é da ordem dos 300 mm. Relativamente às cotas estimadas, até aos primeiros 750 mm, observam-se diferenças significativas das estimativas relativamente aos valores reais. Isso pode estar relacionado com a distância à câmara e a incompatibilidade da Eq. (2.4) em traduzir bons resultados na presença de profundidades intermédias ( $\lambda/h=6,1 > 2$ ). Por essa razão, a aparente primeira crista é descartada como a possibilidade de corresponder a uma crista.

Quanto aos resultados apresentados na Figura 4.127, no perfil real a presença da segunda barra ( $z=2,5$  cm) aos 1600 mm já não é tão clara quando comparada com a primeira aos 1300 mm ( $z=6,3$  cm). Ainda assim, pode observar-se a presença de duas cristas. Uma nos primeiros 1000 mm com uma cota de 7,5 cm e a segunda na posição 1700 mm, com uma cota

de cerca de 6,0 cm. No instante final do ensaio, pode ainda verificar-se que o valor de  $R^2$  toma na maioria da extensão do canal excelentes aproximações à celeridade real das ondas, exceto na zona intermédia do canal.

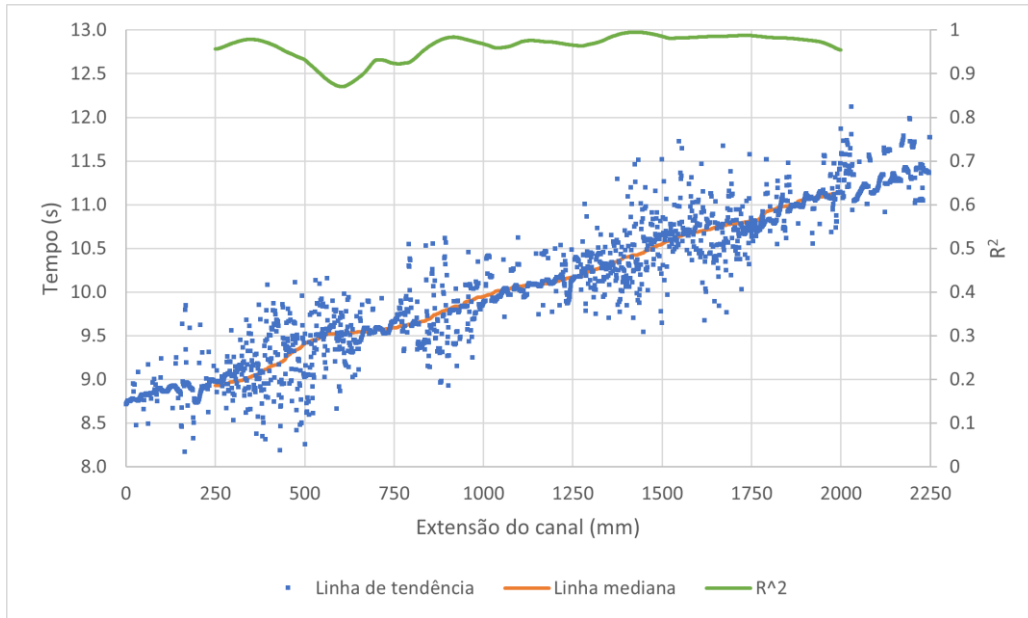


Figura 4.124- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com  $T=0,75$  s, no instante  $t=0$ .

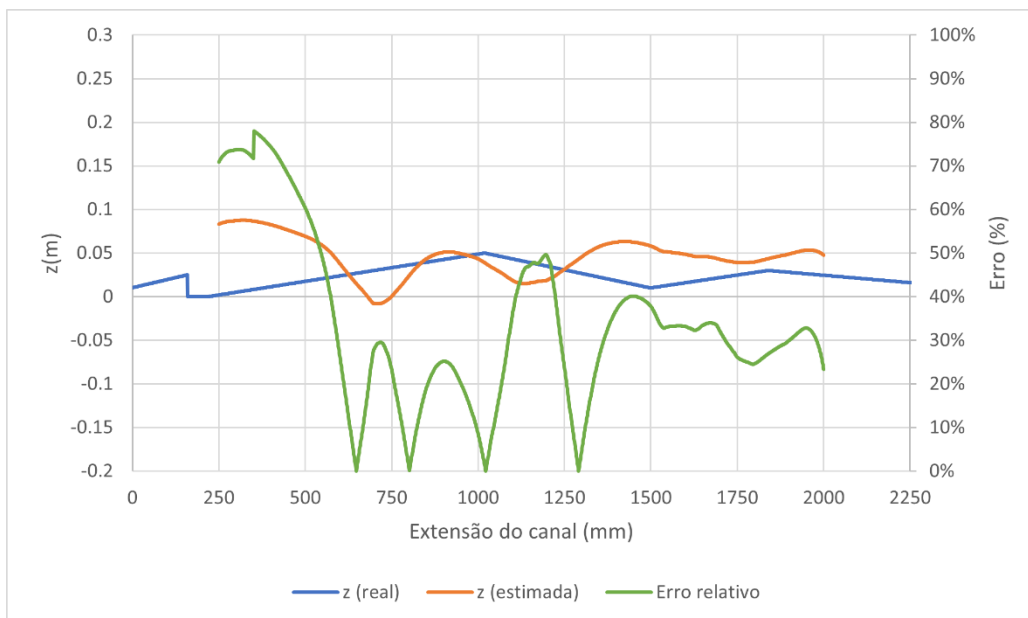


Figura 4.125- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio final com  $T=0,75$  s, no instante  $t=0$ .

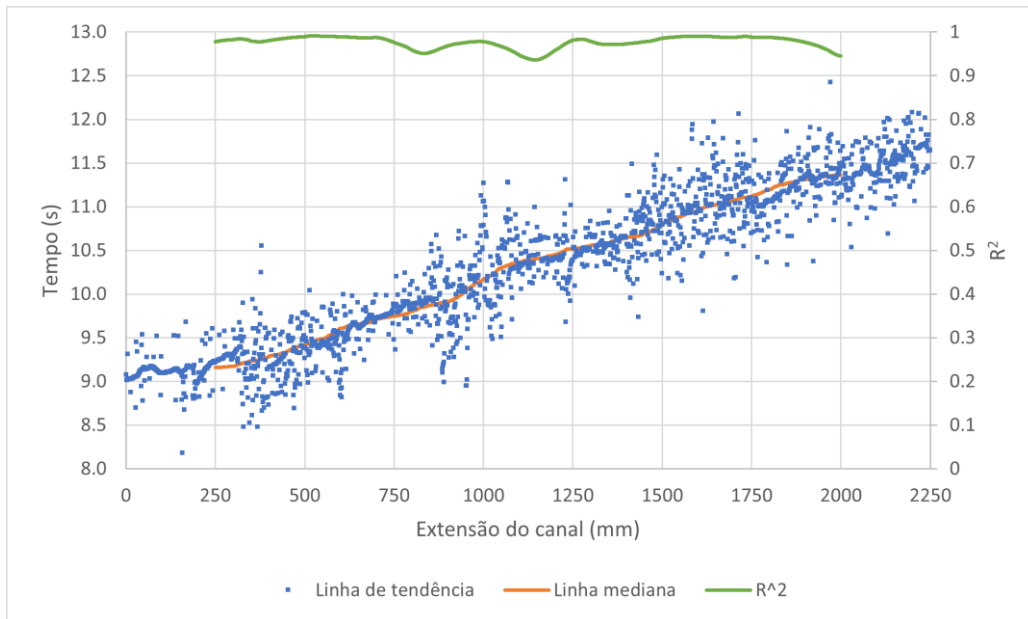


Figura 4.126- Linha de tendência da propagação das cristas para o ensaio final com  $T=0,75$  s, no instante  $t=10$  min.

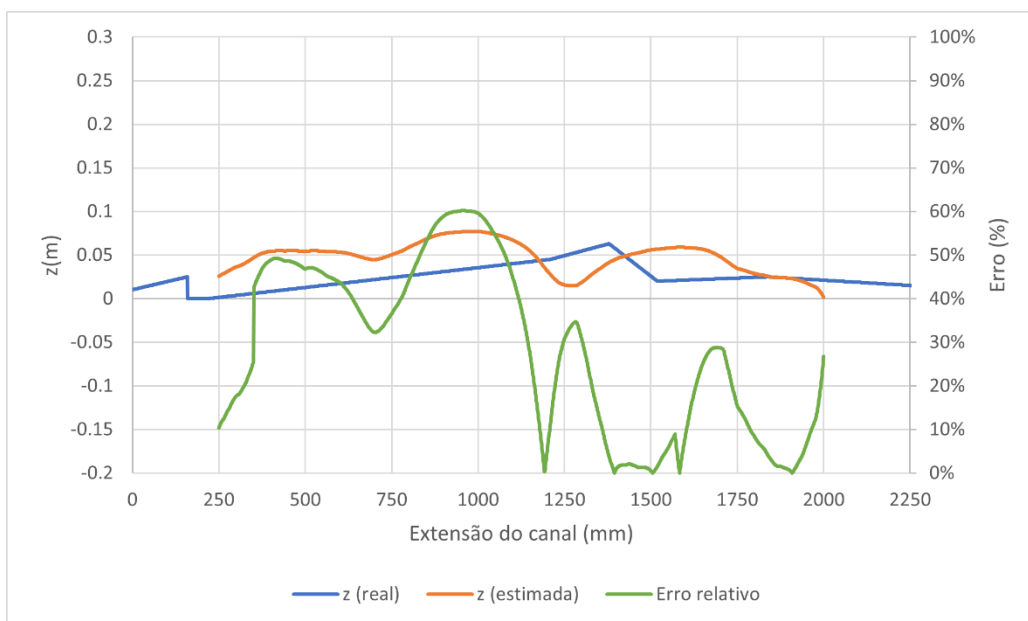


Figura 4.127- Valores reais e estimados de  $z$  e erro relativo para o ensaio final com  $T=0,75$  s, no instante  $t=10$  min.

#### 4.5.2.3 Súmula dos resultados obtidos

Na Tabela 4.5, apresenta-se a síntese dos resultados obtidos neste estudo. Tendo em consideração os perfis de ensaio utilizados neste estudo de fundo móvel, pode-se concluir que,

após o novo afastamento inicial das cristas das barras no segundo dia (82,0 cm) relativamente ao primeiro (78,0 cm), este continua a ser inferior ao maior  $\lambda$  registado (123,0 cm) nos ensaios do segundo dia. Ou seja, existe uma variação do fundo mais repentina quando comparada com a ordem de grandeza do comprimento das ondas. Isso pode ter resultado numa pior qualidade de estimativas da profundidade, pelo facto de que as ondas poderem não ter tempo de se adaptarem a essas variações morfológicas mais bruscas.

Tabela 4.5- Síntese dos resultados das posições das barras, para o ensaio de fundo móvel (perfil barra fossa).

Ensaio		Posição real (m)		Posição estimada (m)		Cota real (cm)		Cota estimada (cm)		Duração do ensaio (min)
		1ª barra	2ª barra	1ª barra	2ª barra	1ª barra	2ª barra	1ª barra	2ª barra	
Preliminar	$T= 1,24$ s	<b>0,75</b>	1,53	<b>0,75</b>	-	7,0	5,5	5,0	-	20
	No final do primeiro ensaio	0,75	<b>1,53</b>	1,00	1,78	<b>5,0</b>	4,5	<b>5,0</b>	9,0	
	No início do segundo ensaio			-	<b>1,53</b>			-	6,0	10
	$T= 0,87$ s	<b>0,85</b>	1,53	<b>0,85</b>	1,63	4,5	4,5	4,0	7,0	
Final	$T= 1,24$ s	0,80	1,62	0,55	1,37	7,0	3,5	8,0	8,0	15
	No final do primeiro ensaio	<b>0,80</b>	<b>1,62</b>	<b>0,80</b>	<b>1,62</b>	<b>5,0</b>	3,0	8,0	6,0	
	No início do segundo ensaio			0,70	1,32			<b>5,0</b>	6,0	10
	$T= 0,75$ s	1,16	1,62	0,75	1,45	6,3	2,5	7,5	6,0	

As posições aqui mencionadas são relativas ao início da primeira barra.

Notou-se também que, para os ensaios mais energéticos, isto é, os ensaios com altura de onda superior (segundo ensaio de cada dia), foi onde ocorreram maiores transformações morfológicas como é o caso do ensaio final para  $T=0,75$  s. Neste, para um tempo de ensaio inferior ao primeiro, registaram-se maiores deslocamentos da crista da primeira barra. Adicionalmente, a cota da crista aumentou relativamente ao instante inicial do segundo ensaio desse dia. Segundo as posições estimadas das barras para a metodologia utilizada, conseguiu-se sempre detetar avanços nas posições das cristas em todos os ensaios, ainda que com alguns erros de acuidade nas cotas estimadas. No entanto, as posições estimadas das cristas das barras nem sempre coincidiram com as reais, nos vários ensaios.

De uma forma geral, os resultados aqui apresentados para fundos móveis evidenciam que as cotas estimadas dos perfis não correspondem na grande maioria dos ensaios às cotas esperadas. Por outro lado, na grande maioria dos resultados, a metodologia aqui utilizada conseguiu detetar a presença e evolução das barras nos perfis de ensaio. Para os ensaios de maior período (nos dois dias de ensaio) os erros aparentam ser maiores, pois apresentaram ter cotas negativas de valor bastante elevado. No fundo, nesses casos, o valor de  $h$  estimado será bastante superior ao valor de  $h$  real, ou seja, o valor da celeridade local estimada pelas linhas de tendência (*i.e.*, o declive instantâneo) é bastante superior à celeridade real das ondas.

Relativamente às posições das cristas das barras estimadas, registaram-se alguns casos onde essas posições não corresponderam à posição real. Isto também pode estar relacionado com o facto de que a ferramenta de ortorretificação de imagens não ter sido utilizada da melhor forma, na medida em que, o tabuleiro em xadrez utilizado para a obtenção dos pontos de controlo, foi colocado sobre as paredes do canal e não ao nível da superfície livre da água em repouso. Essa diferença planimétrica condiciona a localização relativa do perfil estimado na extensão do canal. Este problema só é agora levantado nestes testes, uma vez que, os ensaios de fundo fixo tinham profundidade constante e as posições relativas dos pontos do canal não eram importantes.

Nestes ensaios registaram-se também pequenos instantes ao longo do tempo, zonas pontuais com reflexo da luz (Figura 4.128) que não tinham ocorrido para os ensaios de fundo fixo. Isto pode ter a ver com a alteração da geometria da onda, na presença de fundos variáveis. Este facto leva a que se verifique uma perturbação na coloração dos pixels nas *timestacks* original e uniformizada (ver dos 1500 aos 2500 mm de extensão do canal na Figura 4.15-C). Por consequência, a qualidade dos resultados da celeridade fica comprometida, na medida em que há uma maior dispersão dos pixels das cristas, ou seja, o valor de  $R^2$  diminui ao longo da linha de tendência.

No artigo de Santos *et al.* (2022b), os pixels da *timestack* não são influenciados pela cor do fundo. No entanto, neste trabalho, uma vez que os ensaios foram realizados em laboratório, a transparência da água e as *timestacks* obtidas, demonstraram ser sensíveis às diferentes colorações do fundo do canal (azul-escuro) e dos sedimentos (tom bege). A Figura 4.129 demonstra essa situação, particularmente entre os 750 e os 2750 mm (zona de estudo). Esta diferença de cores presente na *timestack* pode ser inconveniente na obtenção de resultados. Nessa figura, as duas faixas mais realçadas (a primeira e a segunda entre os [500, 1000] mm e os [2500, 3000] mm do canal, respetivamente) são, neste caso, as posições das duas peças metálicas instaladas no canal. Elas servem para conter os sedimentos entre elas, pelo que não

contribuem para a geometria do fundo estudado. No entanto, dada a sua proximidade com os sedimentos e reflexos emitidos podem ter também contribuído para influenciar a geometria do fundo detetada pela câmara.

Quaisquer outras informações sobre os ensaios de fundo móvel podem ser consultadas no Anexo 6.

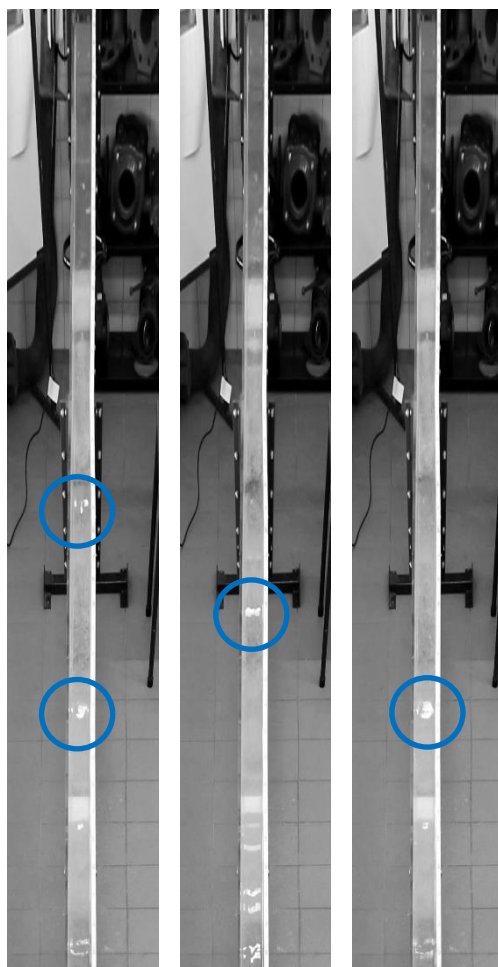


Figura 4.128- Exemplos da presença de reflexo da luz artificial sobre a superfície das ondas.

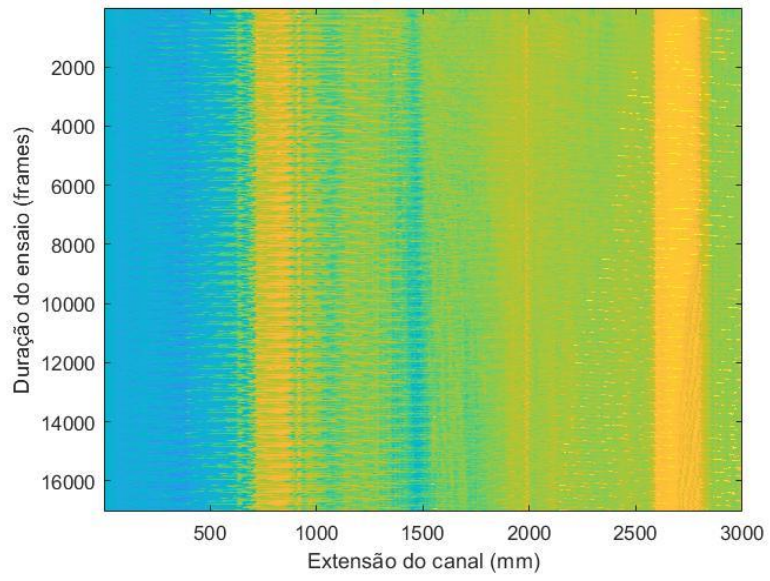


Figura 4.129- Diferença de coloração na *timestack* devido à presença de sedimentos no canal durante os ensaios de fundo móvel.



## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTU- ROS

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho, utilizaram-se imagens de vídeo para obter informação das características das ondas e, por seu intermédio, da geometria do fundo em ensaios à escala reduzida com ondas regulares. As gravações dos ensaios foram realizadas a uma cota superior à do canal, recorrendo a uma câmara que adquiria imagens a partir de uma das extremidades do canal. Desta forma, a aquisição das imagens foi obtida obliquamente ao canal e não perpendicularmente a este, havendo necessidade de ortorretificar as imagens, tendo-se registado uma perda de resolução de imagem associada ao afastamento da câmara à zona retificada. Com as imagens obtidas estimaram-se as características das ondas (comprimento de onda e período), através da deteção do padrão das ondas em imagens de vídeo, através de uma análise do sinal, onde as variações da coloração dos pixels representam, neste caso, os sinais. Posteriormente, com a utilização da relação de dispersão são obtidas as profundidades ao longo do canal.

Realizaram-se ensaios com agitação regular com características de onda (alturas e períodos de onda) distintas e foram efetuados em configurações de fundo fixo e de fundo móvel composto por baquelite. Inicialmente fizeram-se estudos de sensibilidade à luz incidente sobre a superfície livre do canal, concluindo-se que, com a metodologia proposta, se obtiveram melhores resultados na presença simultânea de luz natural e artificial.

Os ensaios de fundo fixo permitiram avaliar a sensibilidade dos resultados a variações do período de onda, profundidade e altura de onda. Observou-se que à medida que o período e o comprimento de onda vão aumentando, a qualidade dos valores do comprimento de onda,  $\lambda$ , estimados vão diminuindo, o que pode estar relacionado, neste caso, com a diminuição da

declividade da onda ( $H/\lambda$ ). Assim, os testes com períodos menores levaram a melhores resultados das profundidades.

Quanto aos resultados da influência da profundidade, observou-se que através da diminuição da profundidade, é possível notar que o comprimento de onda tende também a diminuir. Este facto vai ao encontro com a teoria de ondas, onde se sabe que desde que a onda começa a sentir o fundo, ou seja, na passagem de grandes profundidades para profundidades intermédias, a mesma onda (neste caso, simulada com o mesmo período em cada ensaio) tem tendência a diminuir o seu comprimento. No entanto, pela metodologia utilizada em Santos et al. (2022b), a boa qualidade dos resultados de  $T$  contrastada com a fraca qualidade dos resultados de  $\lambda$ , levou a concluir que o canal é de pequenas dimensões na medida em que nas *timestacks*, o número de cristas observadas no mesmo instante ao longo do canal ser substancialmente menor que o número de cristas observadas na mesma posição do canal ao longo de toda a gravação do ensaio.

Para os ensaios com variações das alturas de onda conclui-se que existe uma diminuição da qualidade dos resultados de  $\lambda$  associados à diminuição da altura da onda, que pode estar relacionado com a fraca distinção entre os pixels nas várias fases da onda.

Na observação dos resultados globais para todos os ensaios de fundo fixo, foi possível concluir que os resultados da batimetria demonstraram ter uma perda da qualidade dos resultados nas zonas mais afastadas à câmara, que pode estar relacionado com a perda da resolução de imagem obtida na fase de ortorretificação de imagem.

Para os ensaios de fundo móvel, concluiu-se que a metodologia utilizada em Santos et al. (2022b) não produzia resultados aceitáveis dos comprimentos de onda pelo facto de a extensão do canal não comportar um número mínimo de ondas necessárias para determinar com clareza as suas variações ao longo do canal. Foi então necessária a utilização de uma segunda metodologia de ensaio, que se baseou na determinação da celeridade instantânea reproduzida pelas coordenadas das cristas das ondas nas *timestacks*, para determinar a batimetria ao longo canal. Permitindo avaliar se existira uma melhor adaptação da celeridade face ao comprimentos da onda. Nestes ensaios, utilizou-se uma geometria de fundo tipo barra fossa tipicamente presente em zonas costeiras. Os resultados obtidos não conseguiram de uma forma geral reproduzir eficazmente a geometria do fundo real. A primeira razão encontrada está relacionada com a localização das barras relativamente à extensão do canal. Outra razão prende-se com o facto de o tabuleiro utilizado para a ortorretificação de imagem ter sido colocado sobre o canal e não ao nível da superfície livre, conjuntamente com a eventualidade de existência de um

atraso na localização do fundo devido ao alongamento das órbitas das ondas, na presença de profundidades pequenas a intermédias. A segunda razão está relacionada com o facto de a metodologia utilizada nos ensaios de fundo móvel não conseguir detetar corretamente batimetria real nos vários ensaios, já que a celeridade instantânea, ou seja, os declives na linha de tendência não eram coincidentes com os esperados, provavelmente devido à presença de reflexo da luz artificial no canal, perturbando os níveis de coloração das várias fases das ondas (o que não aconteceu para os ensaios de fundo fixo), dificultando a deteção da verdadeira propagação das ondas ao longo do ensaio. Existe também a possibilidade das diferentes colorações entre o fundo original do canal (azul-escuro) e da baquelite (tom bege) influenciarem a qualidade dos resultados, na medida em que as *timestacks* apresentaram diferentes colorações entre as zonas com e sem sedimentos. A terceira razão está relacionada com a geometria real da batimetria utilizada. A transição de declives na batimetria, apresentaram uma extensão superior à dimensão do comprimento das ondas ensaiadas, não permitindo que a onda se adaptasse corretamente a essas variações. A quarta e última razão, está relacionada com o facto de nos ensaios de fundo móvel se ter estado não só na presença de pequenas profundidades, mas também de profundidades intermédias, o que põe em causa a qualidade dos resultados utilizando a relação de dispersão simplificada, que deve essencialmente ser utilizada para pequenas profundidades. Ainda assim, na observação dos resultados obtidos, evidenciou-se uma clara evolução das barras entre os instantes finais e iniciais para a grande maioria dos ensaios.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Em desenvolvimentos futuros, nos ensaios de profundidade variável e de fundo móvel, deverá ser analisada mais que uma condição de luz para cada ensaio. Das imagens com fundo móvel obtiveram-se grandes perturbações no seguimento das cristas na *timestack* uniformizada. Uma das razões para isso poderá estar relacionada com algum reflexo momentâneo da luz artificial na água durante os ensaios de fundo móvel, já que se utilizou em todos os ensaios luz artificial e solar em simultâneo.

Outra questão importante a ter em conta está relacionada com a diferença da resolução de imagem em ambas as direções. Se as gravações oblíquas contivessem o alinhamento do canal numa direção perpendicular ao alinhamento da câmara, provavelmente existiria menor distorção de imagem, na medida em que a resolução de imagem na direção perpendicular ao alinhamento da câmara sofre menos alterações que na direção paralela a esta. Por outro lado,

com as imagens obtidas neste trabalho (com o alinhamento do canal paralelo ao alinhamento da câmara), seria interessante testar uma resolução de imagem  $dx$  com valores variáveis na *timestack*. Esta hipótese poderia melhorar os resultados dos comprimentos de onda obtidos neste trabalho. Já a fiabilidade dos resultados obtidos para o período em todos os ensaios está possivelmente relacionada com o facto de que a resolução de imagem  $dt$  na direcção transversal ao canal não ser perdida.

Em futuros desenvolvimentos seria importante referenciar o início e o fim da zona de estudo como também ao longo desta, por exemplo a cada 10,0 cm de extensão do canal, para facilitar na localização do fundo relativamente à extensão do canal. Isto porque os números presentes na fita métrica não são facilmente reconhecidos após a retificação das imagens de vídeo. Por outro lado, seria importante também ser considerado *timestacks* todas com as mesmas dimensões temporais, para haver um maior rigor na comparação entre os resultados obtidos. Finalmente, seria também interessante experimentar realizar ensaios com um batedor de ondas irregulares, aproximando assim as condições de ensaios às condições de mar.

Relativamente ao tratamento de imagem, supostamente dever-se-ia ter calibrado a câmara, corrigido as imagens só depois ortoretificá-las. No entanto, por desconhecimento das duas primeiras fases de tratamento de imagem durante a realização dos ensaios, neste trabalho, as imagens de vídeo apenas foram ortoretificadas.

## BIBLIOGRAFIA

- Andriolo, U. (2019). Nearshore Wave Transformation Domains from Video Imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), Artigo 186. <https://doi.org/10.3390/jmse7060186>
- Instituto Hidrográfico. (2018, março 27). *Levantamentos Hidrográficos*. Acedido em setembro 20, 2022. <https://www.hidrografico.pt/op/19>
- Kumar, P., & Foufoula-Georgiou, E. (1994). Wavelets Analysis in Geophysics: An Introduction. *Wavelet Analysis and Its Applications*, 4, 1-43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052087-2.50007-4>
- Lippmann, T. C. & Holman, R. A. (1989). Quantification of Sand Bar Morphology: A Video Technique Based on Wave Dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94(C1), 995-1011. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>
- Loomis, J. (2015, março 11). *General 2-D Spatial Transformations in MATLAB*. Acedido em outubro 8, 2022. <https://johnloomis.org/ece564/notes/tform/index.html>
- National Geographic Society. (s.d.) *Bathymetry*. Acedido em setembro 21, 2022. <https://education.nationalgeographic.org/resource/bathymetry/>
- Nova School of Science & Technology. (s.d.) *Laboratório de Hidráulica Professor Armando Lencastre (LabHID)*. Acedido em fevereiro 20, 2023. <https://sites.fct.unl.pt/declabs/pages/laboratorio-de-hidraulica-professor-armando-lencastre-labhid>
- Plant, N.G., & Holman, R. A. (1997). Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140(1-2), 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00019-4)
- Santos, D., Abreu, T., Silva, P.A., & Baptista, P. (2020). Estimation of Coastal Bathymetry Using Wavelets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), Artigo 772. <https://doi.org/10.3390/jmse8100772>
- Santos, D., Fernández-Fernández, S., Abreu, T., Silva, P.A., & Baptista, P. (2022a). Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-1 SAR data in high energetic wave coasts: The Portuguese case study. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, Artigo 100674. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100674>

Santos, D., Abreu, T., Silva, P.A., Santos, F., & Baptista, P. (2022b). Nearshore Bathymetry Retrieval from Wave-Based Inversion for Video Imagery. *Remote Sensing*, 14(9), Artigo 2155. <https://doi.org/10.3390/rs14092155>

Silva, A.N., Taborda, R., Catalão, J., & Freire, P. (2009) DTM Extraction Using Video-monitoring Techniques: Application to a Fetch limited Beach. *Journal of Coastal Research*, 1(SI 56), 203-207. <https://www.jstor.org/stable/25737566>

Soares, M. J. (1997) *Onduletas e Processamento de Sinal*. [Artigo em ata de conferência]. I Conferência Nacional de Telecomunicações. Aveiro. <https://hdl.handle.net/1822/1554>

Taborda, R. & Silva, A. (2012). COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system. *Computers & Geosciences*, 49, 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.013>

United States Army Corps of Engineers. (2015) *Coastal Engineering Manual - Part II*. (4a alteração). United States Army Corps of Engineers. <https://plainwater.com/pubs/em/em-1110-2-1100-coastal-engineering-manual/>

## ANEXOS



## Anexo 1 - Planeamento dos ensaios

	CONDIÇÕES DE ENSAIO	MATERIAIS	METODOLOGIA	OBJETIVO	OBSERVAÇÕES
1º Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidade, fundo, frequência e distância ao eixo do disco <b>constantes</b></li> <li>- Condições de luz <b>variável</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fita métrica;</li> <li>- Tripé;</li> <li>- Matriz xadrez.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Com a gravação lateral ver a diferença entre a cava e a crista para saber o H;</li> <li>- Testar várias condições de luz com a vista superior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliar a margem de erro do programa das wavelets através da comparação de valores da profundidade, h, medidos e estimados pelo programa;</li> <li>- Definir qual a luz mais adequada para os ensaios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Registrar H das ondas <b>(1) a (3)*</b> numa zona mais próxima do batedor (1ª metade do canal);</li> <li>- Na lateral do canal para o efeito das medições, colocar uma fita métrica na vertical na zona em frente à filmagem lateral;</li> <li>- Imagem lateral ao nível do canal.</li> </ul>
2º Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidade, fundo e distância ao eixo do disco <b>constantes</b></li> <li>- Frequência do batedor <b>variável</b></li> <li>- Luz natural + artificial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fita métrica;</li> <li>- Tripé;</li> <li>- Matriz xadrez.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No vídeo lateral registar: o tempo entre duas cristas para obter o período (T); e altura (H) entre crista e cava;</li> <li>- Alterar as frequências do batedor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir os períodos (T) da onda para cada frequência do batedor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>(1) a (3)</b></li> <li>- Verificar se as frequências do mostrador correspondem às reais.</li> </ul>
3º Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fundo, frequência e distância ao eixo do disco <b>constantes</b></li> <li>- Profundidade <b>variável</b></li> <li>- Luz natural + artificial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fita métrica;</li> <li>- Tripé;</li> <li>- Matriz xadrez.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para cada nível de água aplicar a mesma frequência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliar as variações dos comprimentos de onda (<math>\lambda</math>);</li> <li>- Verificar se se está perante grandes, médias ou pequenas profundidades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>(1) a (3)</b></li> </ul>

4º Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidade, fundo e frequências <b>constantes</b></li> <li>- Distância ao eixo de rotação do disco/manivela do motor <b>variável</b></li> <li>- Luz natural + artificial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fita métrica;</li> <li>- Tripé;</li> <li>- Matriz xadrez;</li> <li>- Chave para o parafuso do disco.</li> <li>- Marcador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Em cada ensaio fazer variar a distância ao eixo do disco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliar a variação da altura de onda (H).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (1) a (3)</li> <li>- O marcador servirá para marcar o eixo de rotação do disco para se poder medir as distâncias ao eixo.</li> </ul>
5º Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidade e distância ao eixo do disco <b>constantes</b></li> <li>- Fundo e frequências <b>variáveis</b></li> <li>- Luz natural + artificial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fita métrica;</li> <li>- Tripé;</li> <li>- Matriz xadrez;</li> <li>- Baquelite*;</li> <li>- Marcador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensaiar vários fundos móveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perceber se o fundo variável é possível de ser obtido a partir do comprimento (<math>\lambda</math>) e período (T).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (1) a (4)</li> <li>- Tentar testar mais do que um fundo: pendentes variáveis e/ ou com barra, para se perceber a precisão do método em testar essas alterações.</li> <li>- O marcador servirá para desenhar, nas paredes vítreas do canal, o perfil dos ensaios de fundo móvel (com sedimentos);</li> <li>- A baquelite será o sedimento utilizado para criar os perfis barra e fossa nos ensaios de fundo móvel.</li> </ul>

- (1) - Realizar todas as filmagens superiores para cada condição de ensaio variável. Antes dessas filmagens, realizar outra de curta duração com a MATRIZ XADREZ por cima do canal, alinhada com a aresta interior da parede esquerda do canal. Para prevenir caso a máquina não esteja na mesma posição.
- (2) - Realizar para futura confirmação de resultados e estimativa de erros, 2 filmagens laterais: 1 com fita métrica na vertical para determinar H e 1 com fita métrica na horizontal para determinar  $\lambda$ .
- (3) - Garantir que a rebentação se dá o mais próximo possível do fim do canal.
- (4) - Os fundos não podem ter mudanças de inclinação repentinas.

## Anexo 2 - Ensaios realizados em 25 de outubro

Data: 25 Out 2022

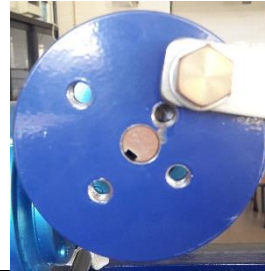
Ensaio nº: 1

Hora: 11h

### Características da onda no batedor

Altura de onda	$H(\text{cm}) = 12,5 - 8,9 = 3,6$
Profundidade	$h(\text{cm}) = 10,9$
Período entre cristas	$T(\text{s}) \approx 0,75$

### Posição do braço da manivela do motor:



Distância da rebentação ao fim do canal	1,10 m (mas depois alterou-se)
---	--------------------------------

Frequência no mostrador	10
-------------------------	----

### Posição da máquina fotográfica (para efeitos de repetição das condições de ensaio)

Distância ao canal	$107 + \approx 40 = 147 \text{ cm}$
Altura a partir do canal	$(h_{\text{mesa1}}=69,5) + (h_{\text{mesa2}}=72) + (h_{\text{tripé}}=165,5) - (h_{\text{canal}}=148) = 159 \text{ cm}$
Ângulo com a horizontal	Colocar na próxima (não foi anotado)

### Condições de iluminação

1ª gravação cortinas fechadas; (MVI\_2068.MOV)

2ª gravação cortinas abertas; (MVI\_2069.MOV)

3ª gravação cortinas abertas com luz artificial; (MVI\_2070.MOV)

4ª gravação cortinas fechadas com luz artificial; (MVI\_2071.MOV)

5ª gravação cortinas totalmente fechadas – isto porque a 1ª faltava-lhe uma cortina fechada (MVI\_2072.MOV)

### Observações:

- Realizaram-se as seguintes gravações: 2 gravações laterais ( 1 para H e outra para o L); 1 superior com a matriz xadrez; e outras 5 gravações superiores para testar qual a que contém as melhores condições de iluminação (1ª: Cortinas fechadas; 2ª: Cortinas abertas; 3ª: cortinas abertas com luz artificial; 4ª: cortinas fechadas com luz artificial; e 5ª: Cortinas totalmente fechadas – isto porque na 1ª faltava-lhe uma cortina fechada);
- Para a gravação lateral a máquina estava a uma altura do chão de 119,5 cm (do chão até à interface azul-clara "PATENTED");
- Sem as pedras colocadas não há rebentação;
- O canal vai dos 4,50 m até à plataforma do batedor e tem um comprimento total de 4,87 m;
- O comprimento de onda é  $\approx 67 \text{ cm}$ .
- A frequência do batedor necessita de ser verificada para ver se corresponde em Hz ou rad/s.

## Anexo 3 - Ensaio realizados em 11 de novembro

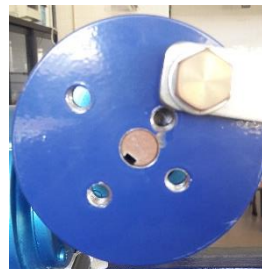
Data: 11 Nov 2022

Ensaio nº: 2

Hora: 15h40

<b>Distância da rebentação ao fim do canal</b>	0,76 m (tendo reduzido com a redução da frequência do batedor)
--	--

Posição do braço da manivela do motor:



Características da onda no batedor

Frequências reais do batedor

Frequência do batedor pelo mostrador *	Altura de onda H(cm)	Período entre cristas T(s)	Comprimento de onda $\lambda$ (m)	Freq. Linear (Hz)	Freq. Angular (rad/s)
10	4,6	0,79	0,79	1,26	7,93
9	4,2	0,88	0,85	1,14	7,18
8	3,8	1,00	0,98	1,00	6,28
7	2,5	1,13	1,10	0,89	5,58
6	2,5	1,29	1,30	0,77	4,86
5	1,3	1,79	Superior a 1,30*	0,56	3,50

Profundidade constante:  $h(\text{cm}) = 13,3$

Posição da máquina fotográfica (para efeitos de repetição das condições de ensaio)

Distância ao canal	---
Altura a partir do canal	$(h_{\text{mesa1}}=69,5) + (h_{\text{mesa2}}=70) + (h_{\text{tripé}}=163,7) - (h_{\text{canal}}=148) = 155,2 \text{ cm}$

### Observações:

- Foram realizadas 2 filmagens laterais para cada frequência, de forma a se poder estimar H, T e L;
- As frequências vão de 10 até 5 porque só nestas se obtém ondas com características razoáveis para análise. No entanto para a frequência 5 já se obtém uma onda bastante abatida;
- A distância ao canal a partir da máquina por lapso, não foi medido.
- Para a frequência de 5 o comprimento de onda pela gravação lateral não foi possível de ser obtido, mas sabe-se que será superior a 1,30\*;
- As frequências do batedor não correspondem nem a frequências lineares em Hz, nem a frequências angulares em rad/s\*;
- Foi feita uma primeira tentativa de ensaios às 11h onde se tinha mais luminosidade, mas infelizmente a máquina ficou sem bateria. À tarde o laboratório recebe menos luz natural.

## Anexo 4 - Ensaios realizados em 15 de novembro

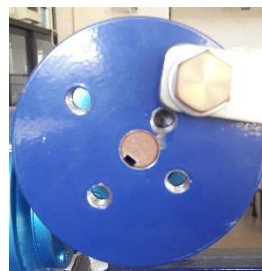
Data: 15 Nov 2022

Ensaio nº: 3

Hora: 10h30

Frequência no mostrador	10
Distância da rebentação ao fim do canal	(*)

Posição do braço da manivela do motor:



### Características da onda no batedor

Profundidade	Altura de onda	Período entre cristas	Comprimento de onda
h(cm)	H(cm)	T(s)	$\lambda$ (m)
15,2	5,3	0,79	0,75
14,2	-	-	-
13,3	5,5	0,75	0,72
12,3	4,0	0,75	0,68
11,3	5,0	0,75	0,66
10,1	4,5	0,79	0,64
8,9	3,5	0,75	0,60
6,8	2,4	0,75	0,56

### Posição da máquina fotográfica (para efeitos de repetição das condições de ensaio)

Distância ao canal	(*)
Altura apartir do canal	$303,5 - 148 = 155,5$ cm (*)

### Observações:

- O ensaio com a profundidade de 14,2 cm não vai ser considerado, uma vez que a altura da câmara não era igual à utilizada para retificação de imagem.

(\*) – Estes dados já não são necessários devido à metodologia de ortorretificação de imagem utilizada.

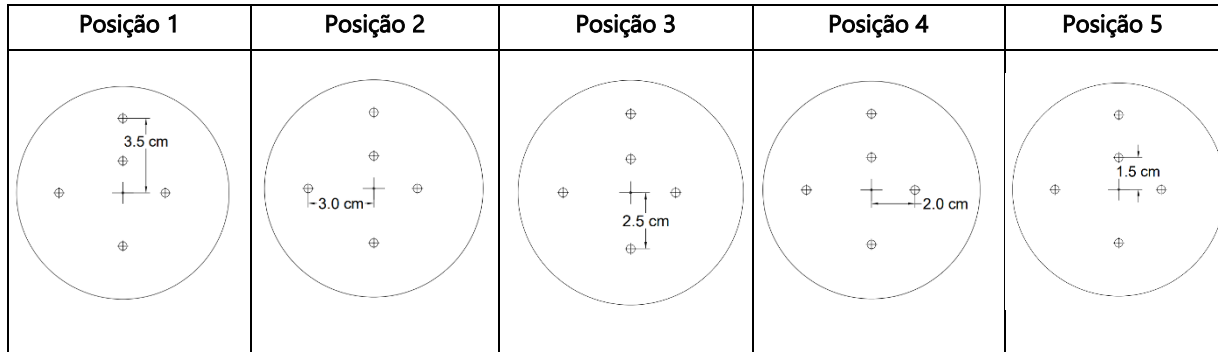
## Anexo 5 - Ensaio realizados em 15 de novembro

Data: 15 Nov 2022

Ensaio nº: 4

Hora: 12h10

Posições do braço da manivela



Características da onda no batedor

Posição #	Distância do braço ao eixo (cm)	Altura de onda H(cm)	Período entre cristas T(s)	Comprimento de onda $\lambda$ (m)
1	3,5	4,0	0,75	0,68
2	3,0	3,3	0,75	0,72
3	2,5	2,8	0,75	0,69
4	2,0	2,1	0,75	0,70
5	1,5	1,7	0,75	0,66

Profundidade constante:  $h(\text{cm}) = 12,3$  Freq. no mostrador: 10

Posição da máquina fotográfica (para efeitos de repetição das condições de ensaio)

Distância ao canal	(*)
Altura a partir do canal	(*)

### Observações:

- Neste ensaio a primeira posição do braço da manivela foi aproveitado do ensaio 3 para poupar algum tempo.
- Registou-se uma menor incidência de luz natural no laboratório devido a condições de neblusidade.

(\*) – Estes dados já não são necessários devido à metodologia de ortorretificação de imagem utilizada.

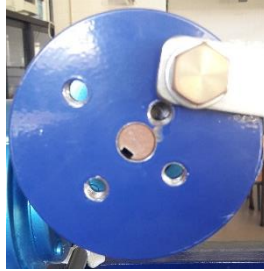
## Anexo 6 - Ensaio realizados em 17, 18 e 24 de novembro

Data: 17, 18 e 24 Nov

Ensaio nº: 5

Hora: Durante a manhã

Posição do braço da manivela do motor:



Geometria do fundo		Características da onda e descrição do fundo
Ensaio de perfil plano	t=0 	T=1,12 s; h=12,3 cm; L=1,15 m. Fundo tipo móvel, com geometria inicial plana, tendo evoluído para a geometria que abaixo se apresenta. Ou seja zona de desgaste mais depósito.
	t=5 min 	
Ensaio preliminar, perfil com barra	t=0 	T=1,24 s; h=11,1 cm; L=1,23 m. Fundo tipo móvel, com geometria tipo barra fossa (*)
	t=20 min 	Perfil intermédio entre t=0 e t=20 + 10 min. (*)
	t=20 + 10 min 	T=0,87 s; h=11,1 cm; L=0,82 m. (*)

Ensaio final, perfil com barra	<p>t=0</p>	<p>T=1,24 s; h=11,1 cm; L=1,23 m. (*)</p>
	<p>t=15 min</p>	<p>Perfil intermédio entre t=0 e t=15 + 10 min. (*)</p>
	<p>t=15 + 10 min</p>	<p>T=0,75 s; h=11,1 cm; L=0,68 m. (*)</p>

**Observações:**

- Na geometria do ensaio de perfil plano, houve rebentação pelo que não serão analisados os resultados.
- Na geometria do ensaio preliminar de perfil com barra, o comprimento de onda medido era superior à distância entre cristas da barra, pelo que se repetiu o ensaio.
- Na geometria do ensaio final de perfil com barra, o comprimento de onda medido continuou superior à distância entre cristas da barra.
- No geral, os ensaios de perfil com barra-fossa tiveram evoluções do perfil adequadas ao tempo de gravação. Ou seja, não muito rápidas, nem muito lentas.
- A qualidade das imagens aqui exposta não permite a visualização das cotas. No entanto, os perfis aqui apresentados correspondem aos que estão expostos no corpo do texto acima.





