

PEDRO MIGUEL DIAS MARQUES

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

DESENVOLVIMENTO DE UM BATEDOR DE ONDAS DE BAIXO CUSTO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2023

DESENVOLVIMENTO DE UM BATEDOR DE ONDAS DE BAIXO CUSTO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO MIGUEL DIAS MARQUES

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Moisés Gonçalves de Brito

Professor Auxiliar, DEMI, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Professor Auxiliar, DEMI, Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor Daniel Cardoso Vaz

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Doutora Maria da Graça Neves

Professora Associada com Agregação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Vogal: Doutor Moisés Gonçalves de Brito

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Desenvolvimento de um batedor de ondas de baixo custo
Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Copyright © Pedro Miguel Dias Marques, 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

Em primeiro lugar, gostava de agradecer ao meu orientador, Professor Moisés Gonçalves de Brito, e coorientador, Professor Luís Gil, por todo o conhecimento e ajuda disponibilizada. Em especial, quero agradecer ao Professor Moisés a grande ajuda prestada no desenvolvimento das diversas etapas da dissertação, como também a constante disponibilidade e paciência na revisão do texto. Também, agradeço ao doutorando Francisco Bernardo por todo o apoio e aconselhamento transmitido.

À minha família, em especial aos meus pais e aos meus avós, quero agradecer por todo o apoio que sempre tive e que me permitiu alcançar o sucesso pessoal e académico.

Por fim, um agradecimento a todos os meus amigos e colegas de curso que me acompanharam ao longo destes cinco anos e tornaram esta experiência incrível.

Muito Obrigado a todos!

RESUMO

O crescente interesse na energia proveniente das ondas do oceano tem incentivado a geração de ondas em ambiente laboratorial, adquirindo cada vez mais importância para a engenharia oceânica e costeira. Neste sentido, os canais de ondas apresentam um papel crucial na avaliação da resposta das estruturas à ação das ondas, permitindo uma análise em escalas reduzidas, apesar do elevado custo associado à construção do mecanismo de geração de ondas.

Nesta dissertação pretende-se desenvolver um batedor de ondas do tipo pistão de baixo custo para um canal presente no laboratório de MFTA do DEMI. Este dispositivo mecânico é constituído por uma placa vertical animada com um movimento de translação horizontal, paralelo à superfície da água em repouso, gerando ondas no canal.

A conceção e modelação do batedor foi realizado com recurso ao *software SolidWorks*, sendo posteriormente fabricado e montado no canal. O controlo do movimento do batedor foi feito através de um circuito eletrónico e um Arduino UNO. O movimento da placa do batedor é acionado por um motor de passo e o código para o controlo deste motor foi programado para a geração de agitação regular.

A validação do código resume-se na realização de ensaios experimentais para diferentes alturas e períodos de onda. Estes testes visam comparar o comprimento de onda e a elevação da superfície livre das ondas geradas pelo batedor com as soluções analíticas.

Verificou-se uma maior aproximação dos resultados obtidos para o parâmetro do comprimento de onda, resultando num erro relativo médio dos ensaios de aproximadamente 4,51%. Para a elevação da superfície livre, os erros relativos determinados são mais elevados, apresentando um erro relativo médio de 27,6% para a posição da fita 1 e 81,3% para a posição da fita 2. A distorção das fotografias dos ensaios experimentais, a incerteza de leitura dos valores medidos através das fitas e a atualização descontínua da velocidade e aceleração do motor de passo durante o seu movimento são fatores que contribuíram para os erros relativos determinados.

Palavras-chave: Geração de ondas em canais, Batedor de ondas do tipo pistão, Motor de passo, Arduino.

ABSTRACT

The growing interest in the energy derived from ocean waves has encouraged the generation of waves in a laboratory environment, which is becoming increasingly important for ocean and coastal engineering. In this context, wave channels have a crucial role in the response evaluation of structures to wave action, allowing them to be analysed on a small scale, despite the high cost associated to the construction of a wavemaker.

The aim of this dissertation is to develop a low-cost piston-type wavemaker for a wave flume in DEMI's MFTA laboratory. This mechanical device incorporates an animated plate with a horizontal translational movement, usually parallel to the surface of the water at rest, generating waves in the wave flume.

The design and modelling of the wavemaker are carried out using SolidWorks software, and subsequently manufactured and assembled in the wave flume. The movement of the wavemaker was controlled using an electronic circuit and an Arduino UNO. The movement of the wavemaker paddle is driven by a stepper motor and the code for controlling this motor was programmed to generate regular agitation.

The validation of the code involves carrying out experimental tests for different wave heights and periods. These tests aim to compare the wavelength and elevation of the free surface of the waves generated by the piston-type wavemaker with the analytical solutions.

The results obtained revealed a better approximation of the measured values for the wavelength, resulting in an average relative error of the tests of approximately 4.51%. The measurement of the free surface elevation presented higher relative errors, with an average relative error of 27.6% for the position of *fita 1* and 81.3% for the position of *fita 2*. The distortion in the experimental test photos, the uncertainty in the reading of the values measured using the tapes and the discontinuous updating of the speed and acceleration of the stepper motor during its movement are all factors that contributed to the relative errors determined.

Keywords: Wave generation in wave flumes, Piston-type wavemaker, Stepper Motor, Arduino.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Índice de Listagens	xii
Siglas	xiii
Símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento do Trabalho	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia	3
1.5 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado de Arte	5
2.1 Teoria de Ondas	5
2.1.1 Ondas Marítimas	5
2.1.2 Características das Ondas	7
2.1.3 Teoria Linear das Ondas	9
2.1.4 Teoria de 2. ^a Ordem de Stokes	12
2.2 Ondas geradas em canais	13
2.3 Sistemas de absorção em canais de ondas	15
2.4 Batedor de ondas do tipo pistão	16
2.4.1 Princípio de funcionamento	16
2.4.2 Design e construção	18
2.5 Motor de passo	19
3 Descrição da Instalação Experimental	23
3.1 Modelação em <i>SolidWorks</i> do batedor	23
3.2 Construção e montagem do batedor	26
3.3 Construção da praia e zona de absorção passiva	30

4	Controlo do Movimento do Batedor	33
4.1	Circuito eletrónico	33
4.2	Programação da placa Arduino UNO	38
5	Verificação do Mecanismo de Geração	49
5.1	Ensaaios Experimentais	49
5.1.1	Ensaaios 1, 2 e 3	51
5.1.2	Ensaaios 4, 5 e 6	54
5.1.3	Ensaaios 7, 8 e 9	57
5.2	Análise e Discussão dos Resultados Experimentais	60
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	63
6.1	Principais conclusões	63
6.2	Desenvolvimentos Futuros	64
	Bibliografia	65
	Apêndices	
A	Código implementado no Arduino UNO	68

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Período e frequência dos diferentes tipos de ondas oceânicas [8].	6
2.2	Esquema representativo do modelo do "escudo" de desenvolvimento das ondas [7].	7
2.3	Principais parâmetros característicos de uma onda regular, adaptado de [11].	8
2.4	Principais parâmetros característicos de um estado de mar irregular, adaptado de [10].	8
2.5	Profundidade relativa e assintotas de funções hiperbólicas [11].	11
2.6	Deslocamento das partículas de água mediante a profundidade [10].	11
2.7	Domínios de validade para cada teoria de ondas [12].	13
2.8	Diferentes tipos de batedor para geração de agitação marítima [14].	14
2.9	Representação esquemática do método de atuação do sistema de absorção ativa [19].	15
2.10	Representação esquemática da geração de ondas num canal recorrendo a um batedor de ondas do tipo pistão [21].	16
2.11	Representação esquemática da teoria simplificada de Galvin para o batedor de ondas do tipo pistão para águas pouco profundas [24].	17
2.12	Canal de ondas pertencente à Faculdade de Engenharia de Bilbao [28].	19
2.13	Constituição do motor de passo - Rotor e Estator [31].	20
2.14	Princípio de funcionamento do motor de passo [31].	20
2.15	Curva de binário vs velocidade de rotação para o motor de passo PKP264D28 [34].	21
2.16	Exemplo de esquema de ligação do motor de passo à placa Arduino [31].	22
3.1	Canal de ondas e estrutura de suporte utilizados no estudo.	23
3.2	Módulo de fixação do motor de passo ao canal de ondas.	24
3.3	Acoplamento entre o veio do motor de passo e o fuso.	24
3.4	Módulo com movimento longitudinal para geração de ondas no canal.	25
3.5	Módulo de transmissão do movimento ao encoder.	26
3.6	Modelação em <i>SolidWorks</i> do batedor de ondas inserido no canal.	26
3.7	Componentes de acionamento.	27
3.8	Curva de binário vs velocidade de rotação para o motor de passo SM25776 [35].	27
3.9	Componentes adquiridos através da empresa <i>Igus®</i>	28
3.10	Componentes de medição da rotação do motor de passo.	28

3.11 Os três módulos constituintes do batedor fabricado.	29
3.12 Batedor de ondas inserido no canal e fixo à estrutura.	30
3.13 Estruturas de absorção instaladas no canal.	31
3.14 Cubo dissipativo implementado no canal de ondas.	31
3.15 Praia dissipativa de ondas inserida no canal.	32
4.1 Caixa de controlo do batedor.	33
4.2 Circuito eletrónico implementado para o controlo do batedor.	34
4.3 Diagrama do circuito eletrónico implementado.	35
4.4 Interruptor <i>ON/OFF</i> instalado na caixa de controlo do batedor.	36
4.5 Finais de curso instalados no batedor.	37
4.6 Perfil de deslocamento do batedor em ordem ao tempo.	46
4.7 Perfil de velocidade (Figura 4.7(a)) e aceleração (Figura 4.7(b)) de 1ª ordem do batedor em ordem ao tempo.	48
5.1 Domínio de aplicação dos ensaios experimentais no canal de ondas.	50
5.2 Ensaios experimentais realizados para $T = 0,5$ s.	51
5.3 Funções de elevação da superfície livre para $T = 0,5$ s.	53
5.4 Ensaios experimentais realizados para $T = 0,75$ s.	54
5.5 Funções de elevação da superfície livre para $T = 0,75$ s.	56
5.6 Ensaios experimentais realizados para $T = 1,00$ s.	57
5.7 Funções de elevação da superfície livre para $T = 1,00$ s.	58

ÍNDICE DE TABELAS

5.1	Parâmetros calculados para cada ensaio.	50
5.2	Tipo de onda respetivo a cada ensaio experimental.	51
5.3	Parâmetros experimentais dos Ensaios 1, 2 e 3.	52
5.4	Parâmetros teóricos dos Ensaios 1, 2 e 3.	54
5.5	Parâmetros experimentais e teóricos dos Ensaios 1, 2 e 3.	54
5.6	Parâmetros experimentais dos Ensaios 4, 5 e 6.	55
5.7	Parâmetros teóricos dos Ensaios 4, 5 e 6.	57
5.8	Parâmetros experimentais e teóricos relativos aos Ensaios 4, 5 e 6.	57
5.9	Parâmetros experimentais dos Ensaios 7, 8 e 9.	58
5.10	Parâmetros teóricos dos Ensaios 7, 8 e 9.	59
5.11	Parâmetros experimentais e teóricos relativos aos Ensaios 7, 8 e 9.	60
5.12	Erros relativos entre as elevações de superfície livre para a posição da fita 1.	60
5.13	Erros relativos entre as elevações de superfície livre para a posição da fita 2.	61
5.14	Erros relativos entre os comprimentos de onda experimentais e teóricos.	62

ÍNDICE DE LISTAGENS

4.1	Importação das bibliotecas e criação dos respetivos objetos	38
4.2	Nomeação dos pinos digitais utilizados do Arduino	39
4.3	Declaração de variáveis do motor de passo	39
4.4	Função <i>setup</i> executada apenas uma vez no início do programa.	39
4.5	Função de emergência para os finais de curso instalados no batedor.	41
4.6	Função principal do programa, <i>loop</i> , a correr repetidamente.	41
4.7	Função de leitura dos potenciômetros.	41
4.8	Função para obter as variáveis de modelação das ondas.	42
4.9	Função para visualizar os parâmetros definidos no <i>LCD</i>	43
4.10	Função para leitura do botão e início de ciclo de movimentos.	43
4.11	Função de controlo da rotação do motor de passo.	44
4.12	Funções de cálculo para a velocidade e aceleração do motor.	47
A.1		68

SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CCW	Counterclockwise motion
CNC	Computer Numeric Control
CRC	Canadian Research Center
CW	Clockwise motion
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DHI	Danish Hydraulics Institute
LCD	Liquid Crystal Display
MFTA	Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada
PVC	Polyvinyl chloride
WR	Wallingford Research

SÍMBOLOS

A	Amplitude
$a_{P_1}(t)$	Termo de 1ª ordem da aceleração do batedor do tipo pistão para geração de agitação regular
C	Celeridade de onda
d	Profundidade de água
ϵ	Declive de onda
d_R	Profundidade relativa
η	Elevação da superfície livre da água
δ	Ângulo de fase inicial
g	Aceleração gravítica
H	Altura de onda
H_{max}	Altura de onda máxima
H_R	Altura relativa
H_s	Altura de onda significativa
k	Número de onda
L	Comprimento de onda
ω	Frequência angular
ϕ	Potencial de velocidade
S	Curso do batedor do tipo pistão
T	Período de onda

t	Tempo
T_c	Período de onda de pico
T_r	Tempo total de registo
T_z	Período de intersecção zero
U	Número de Ursell
u	Componente da velocidade na direcção longitudinal
$v_{P_1}(t)$	Termo de 1ª ordem da velocidade do batedor do tipo pistão para geração de agitação regular
w	Componente da velocidade na direcção vertical
x	Coordenada longitudinal
$x_{P_1}(t)$	Termo de 1ª ordem do deslocamento do batedor do tipo pistão para geração de agitação regular
$x_{P_2}(t)$	Termo de 2ª ordem do deslocamento do batedor do tipo pistão para geração de agitação regular
z	Coordenada vertical

INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a motivação e o enquadramento do trabalho. Em seguida são descritos os objetivos principais a alcançar e a metodologia adotada. No final do capítulo é apresentada a estrutura da dissertação, sendo exposto os conteúdos abordados em cada capítulo.

1.1 Motivação

Com o crescente interesse no desenvolvimento sustentável do planeta, a energia proveniente das ondas do oceano evoluiu como uma alternativa promissora às energias solar e eólica. Deste modo, o estudo de conversores de energia das ondas, devido ao elevado potencial energético existente nas ondas do oceano, tem sido cada vez mais explorado [2].

No entanto, apesar das vantagens energéticas, os conversores de energia das ondas devem cumprir vários requisitos durante a sua construção, tendo em conta a aleatoriedade das condições do mar. Desta forma, com o intuito de testar estas estruturas marítimas, diferentes modelos matemáticos e numéricos dão resposta satisfatória a grande parte dos estudos realizados a estes sistemas de aproveitamento de energia. Contudo, a modelação física mediante protótipos torna-se fundamental para o desenvolvimento, calibração e validação desses modelos.

Adicionalmente ao teste de dispositivos de aproveitamento de energia, os canais de ondas apresentam diversas aplicações na indústria, como a realização de testes a protótipos de navios e estruturas *offshore* e *onshore*. Esta fase experimental permite a avaliação de certos aspetos, como a resistência do casco de um navio durante o seu movimento e as consequências da ação das ondas em instalações costeiras, evitando, assim, erros críticos e dispendiosos que ocorram nas fases iniciais dos projetos [3].

Em laboratório, os fenómenos físicos de geração e propagação das ondas e as formas de interação das ondas com outros corpos são estudados através de ensaios experimentais, onde a geração das ondas é feita recorrendo a batedores capazes de replicar as ondas que ocorrem na natureza.

1.2 Enquadramento do Trabalho

O estudo das ondas em canais é muito importante no campo da hidrodinâmica, não só para analisar o movimento e perfil das ondas, como também estudar a interação onda-estrutura através do cálculo das forças exercidas [4].

Os canais de ondas, tendo sido utilizados durante décadas como um dos métodos de teste bidimensionais que estudam soluções relacionadas com o desempenho e resposta de estruturas marítimas, proporcionam resultados valiosos que auxiliam o processo de conceção de dispositivos e estruturas marítimas. Nesses canais encontra-se instalado numa das extremidades o sistema de geração de agitação marítima. Porém, estes canais dedicados à geração de ondas apresentam um custo muito elevado, devido ao custo de construção dos batedores.

Posto isto, de modo a ultrapassar este obstáculo na criação de um mecanismo de geração de ondas, ainda que de pequena dimensão, esta dissertação dedicou-se ao desenvolvimento de um batedor de ondas do tipo pistão "*low-cost*" a inserir num canal de ondas do laboratório de [Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada \(MFTA\)](#) do [Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial \(DEMI\)](#).

O batedor de ondas do tipo pistão é utilizado na maioria dos canais, uma vez que dos restantes tipos de batedor existentes, este é o mais indicado para pequenas profundidades. O método de geração de ondas deste tipo de batedor ocorre a partir do deslocamento de uma parede móvel, que oscila horizontalmente, paralelo à superfície da água em repouso. O batedor de ondas do tipo pistão apresenta diversas aplicações, sendo bastante comum a sua utilização em canais de ondas industriais, permitindo a modelação de portos e estruturas costeiras.

1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um batedor de ondas do tipo pistão a inserir num canal existente. Este mecanismo de geração de ondas poderá ser, posteriormente, utilizado no estudo da hidrodinâmica de conversores de energia das ondas.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

1. Desenvolvimento do mecanismo de geração e suporte do batedor de ondas do tipo pistão;
2. Programação do movimento do batedor;

3. Validação do código de geração implementado;

1.4 Metodologia

A realização desta dissertação pressupõe várias fases para cumprir os objetivos propostos. A primeira fase consiste num estudo bibliográfico dos diferentes mecanismos mecânicos utilizados na literatura para geração de ondas em canais, dando especial atenção ao batedor de ondas do tipo pistão. Com a informação retirada, procede-se à sua conceção no programa *SolidWorks*, assegurando um custo reduzido do processo de construção do batedor.

Realizada a construção e montagem do batedor de ondas do tipo pistão, procede-se ao desenvolvimento de um circuito eletrónico e programação de um Arduino UNO. O acionamento do batedor é realizado com recurso a um motor de passo. Através desta instalação, o utilizador tem a capacidade de configurar as características iniciais das ondas a gerar, promovendo o movimento pretendido do batedor para a reprodução de ondas no canal.

Na validação do mecanismo de geração de ondas realizam-se vários ensaios experimentais, com diferentes alturas e períodos de onda. A partir dos resultados obtidos, em comparação com as soluções analíticas de 1ª ordem, procede-se ao cálculo dos erros relativos respetivos a cada ensaio.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em seis capítulos. Neste presente capítulo, **Introdução**, é apresentada uma visão geral da dissertação, começando com a motivação do tema, bem como o enquadramento do trabalho, os principais objetivos e a metodologia adotada.

No segundo capítulo, **Estado de Arte**, descrevem-se as diferentes teorias que caracterizam o comportamento das ondas e os métodos utilizados para a geração e absorção de ondas em canais. Apresenta-se a dinâmica de um batedor de ondas do tipo pistão e as teorias que relacionam o seu movimento com o perfil das ondas geradas. Por fim, descreve-se o princípio de funcionamento de um motor de passo utilizado no acionamento do batedor.

No terceiro capítulo, **Descrição da Instalação Experimental**, é representada a modelação em *SolidWorks* do batedor, o processo de fabrico e de montagem dos diferentes componentes que o constituem e apresentam-se os diferentes equipamentos dissipativos utilizados na absorção das ondas.

No quarto capítulo, **Controlo do Movimento do Batedor**, descreve-se o circuito eletrónico e o código desenvolvido na placa Arduino UNO.

No quinto capítulo, **Verificação do Mecanismo de Geração**, são realizados diversos ensaios experimentais para diferentes condições iniciais e comparam-se os resultados obtidos com as soluções analíticas de 1ª ordem do batedor.

No sexto capítulo, **Conclusões e Desenvolvimentos Futuros**, são apresentadas as conclusões do trabalho elaborado e sugestões para desenvolvimentos futuros.

ESTADO DE ARTE

Este capítulo é referente à pesquisa bibliográfica realizada sobre os temas abordados ao longo desta dissertação. Inicialmente faz-se uma breve introdução sobre as ondas oceânicas e os conceitos gerais na sua geração e propagação. Posteriormente foram expostos as diferentes teorias de ondas e os parâmetros que as definem, de modo a caracterizar o seu comportamento. Seguidamente, foi abordado, de modo a replicar as ondas oceânicas, a geração de ondas em canais por meio de diferentes mecanismos mecânicos, focando no batedor de ondas do tipo pistão. Continuamente, define-se o princípio de absorção ativa em canais e outros métodos de dissipação de energia das ondas. Por fim, analisa-se detalhadamente a teoria, design e construção de um batedor de ondas do tipo pistão e também o respetivo princípio de funcionamento do motor de passo utilizado no acionamento deste batedor.

2.1 Teoria de Ondas

2.1.1 Ondas Marítimas

As ondas são denominadas como ondas mecânicas superficiais, que consistem em oscilações da superfície da água com movimento relativo ao nível médio da superfície livre do mar [5].

Na formação destas massas de água é necessário existir um fornecimento inicial de energia, de modo a perturbar o estado de equilíbrio existente [6]. Esta energia fornecida é dividida pela atuação de diferentes tipos de forças [7]. A grande maioria das ondas geradas deve-se à ação do vento, através do seu efeito na superfície da água. Para o caso das marés, a força atuante é a atração gravítica entre a Terra, Lua e Sol. Outros tipos de ondas devem-se a um evento sísmico ou outro fenómeno que provoque uma modificação brusca

do fundo marinho (caso dos tsunamis) ou mediante gradientes de pressão atmosféricos.

Com o intuito de obter uma classificação consoante o tipo de onda, utilizou-se o método de classificação mais comum baseado no período e frequência associada a cada tipo de onda [6], como representado na Figura 2.1.

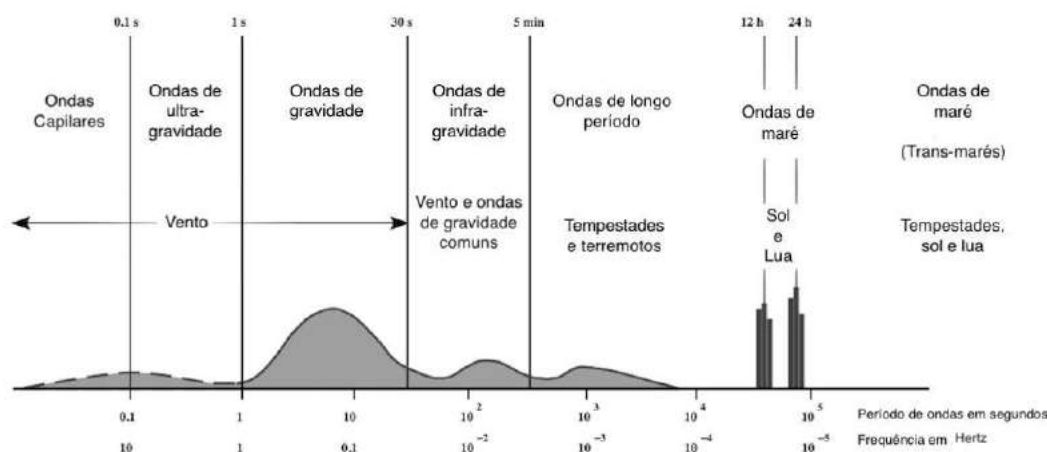


Figura 2.1: Período e frequência dos diferentes tipos de ondas oceânicas [8].

Particularizando o caso das ondas formadas a partir da ação do vento, as partículas de água são deslocadas da sua posição de equilíbrio e de forma a readquirirem esse estado de equilíbrio, é necessária a existência de uma força de restauro. Esta sucessão alternada de deslocamentos e restauros estabelece o movimento oscilatório característico das ondas. As duas principais forças de restauro são a força gravítica exercida pela Terra, caso das ondas gravíticas, e a tensão superficial da água, para o caso das ondas capilares.

Na geração destas ondas, tal como se referiu anteriormente, a maioria das ondas são geradas pelo vento. O facto de o vento perturbar a superfície livre da água provoca um aumento de rugosidade, conseqüentemente um aumento das tensões criadas na superfície livre do oceano. A partir deste aumento formam-se ligeiras ondulações com comprimento de onda e período muito pequenos, denominadas ondas capilares. Com a continuação da atuação do vento sobre a superfície livre da água, a influência da gravidade supera o efeito capilar, originando um aumento da amplitude das ondas e assim se formam as ondas gravíticas. Este fenómeno caracteriza-se pela maior pressão exercida pelo vento no lado ascendente e menor pressão no lado descendente, resultando em gradientes de pressão que formam vórtices [7], como representado na Figura 2.2. Este modelo de formação de ondas é conhecido pela designação de modelo do escudo e foi desenvolvido por Jeffreys em 1925 [9].

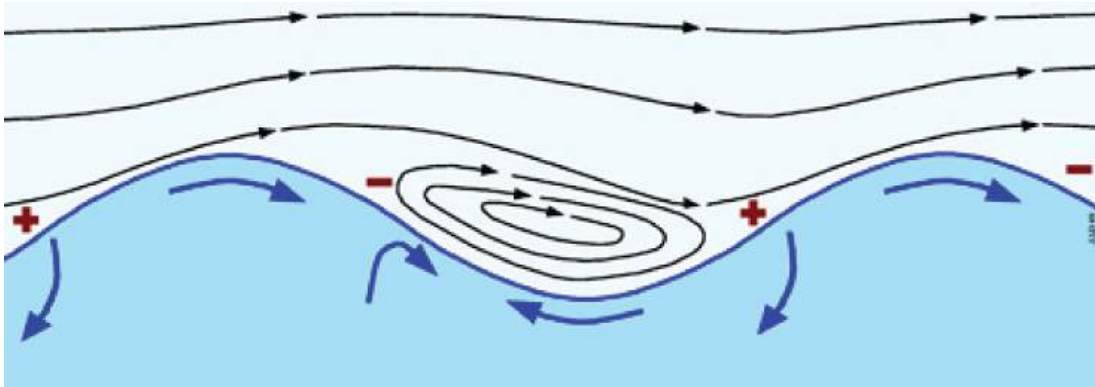


Figura 2.2: Esquema representativo do modelo do "escudo" de desenvolvimento das ondas [7].

2.1.2 Características das Ondas

Existem diversas teorias que permitem uma representação aproximada da geração e propagação de ondas. No entanto, cada um destes métodos apenas é adequado na descrição da onda se se cumprir com as hipóteses simplificativas nele descritas. As teorias que caracterizam o comportamento das ondas dividem-se em dois grupos: teorias das ondas regulares e irregulares [10].

As ondas regulares possuem características bem definidas, como amplitude e período constantes, enquanto as ondas irregulares são formadas pela soma de ondas regulares com altura e período diferentes.

Na definição do movimento de ondas regulares é necessário determinar vários parâmetros para descrever o seu comportamento:

- Amplitude, A (m)
- Período, T (s)
- Profundidade de água, d (m)
- Altura, H (m)
- Frequência angular, ω (rad/s)
- Celeridade, C (m/s)
- Número de Onda, k (rad/m)
- Comprimento, L (m)
- Elevação da superfície livre, η (m)

Na Figura 2.3 encontra-se representado os principais parâmetros mencionados que caracterizam as ondas regulares. Adicionalmente, é possível determinar outros parâmetros

como o número de onda $k = \frac{2\pi}{L}$ e a celeridade $C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k}$, como também os seguintes parâmetros adimensionais: o declive da onda, $\epsilon = \frac{H}{L}$, a profundidade relativa, $d_R = d/L$, e a altura relativa, $H_R = H/d$.

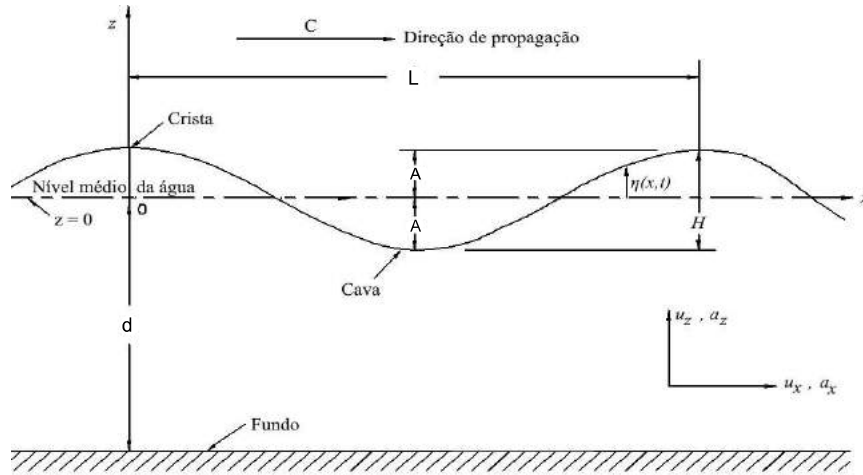


Figura 2.3: Principais parâmetros característicos de uma onda regular, adaptado de [11].

Para o caso das ondas irregulares, estas não serão alvo de estudo na presente dissertação, contudo, é apresentada uma breve caracterização deste tipo de ondas.

As ondas irregulares compõem a maioria da superfície oceânica, movendo-se em direções distintas. Apresentam alturas e períodos de onda variáveis, contrariamente às ondas regulares.

Existem muitos parâmetros que podem ser utilizados para definir estatísticas de estados de mar irregulares. A altura de onda significativa, H_s , representa a altura de onda média de um terço das ondas registadas com maior altura. A altura de onda máxima registada designa-se por H_{max} . Uma abordagem semelhante pode ser utilizada para o período da onda. O período médio de intersecção do nível médio da água é designado por T_z . O período médio entre duas cristas de onda consecutivas é designada por período de pico, T_c . Por último, o tempo total de registo das ondas designa-se por T_r .

A Figura 2.4 ilustra a evolução da elevação da superfície livre das ondas ao longo do tempo, medida num estado de mar irregular.

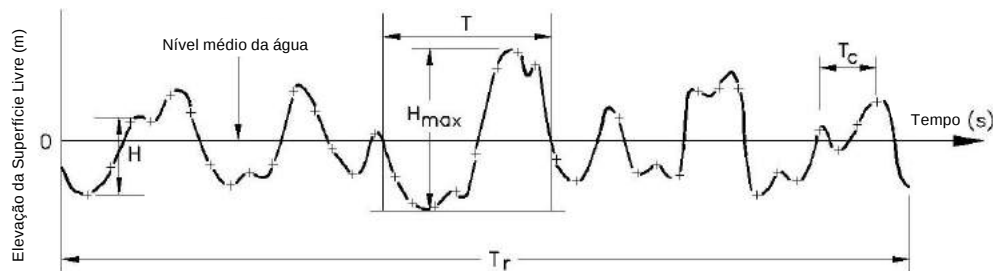


Figura 2.4: Principais parâmetros característicos de um estado de mar irregular, adaptado de [10].

2.1.3 Teoria Linear das Ondas

A teoria linear das ondas foi desenvolvida em 1845, por George Airy, e consiste no primeiro modelo analítico para descrever o comportamento das ondas regulares. Esta teoria tem a condição de que a amplitude da onda seja muito inferior em comparação com o comprimento de onda e profundidade. Este modelo revela-se também mais eficaz para grandes profundidades, uma vez que para pequenas profundidades existem vários fatores que não são considerados.

A teoria de Airy assume certas suposições para a sua aplicabilidade. O fluido é considerado homogêneo, invíscido e incompressível. O escoamento é irrotacional, as tensões superficiais são desprezáveis e a pressão na superfície livre é constante. O fundo considerado horizontal, impermeável e sem qualquer irregularidade, como também o efeito de Coriolis devido à rotação da terra é desprezado. Admite-se ainda um perfil de onda constante e bidimensional.

Admitindo estas condições da teoria de Airy, o escoamento de um fluido ideal, invíscido e incompressível é governado pela seguinte Equação (2.1) de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta z^2} = 0 \quad (2.1)$$

Sendo, $u = \frac{\delta \phi}{\delta x}$ e $w = \frac{\delta \phi}{\delta z}$. De referir que u e w correspondem à velocidade do fluido na direção x e z , respetivamente.

A partir da resolução das condições de fronteira, a aplicação da teoria linear das ondas necessita de recorrer à seguinte Equação (2.2) de Laplace, de modo a determinar o potencial de velocidade das partículas de água que permitem representar o campo de escoamento [11]:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

As componentes da velocidade horizontal e vertical das partículas de água podem ser determinadas através da derivação da Equação (2.2), em ordem às direções x e z respetivamente, obtendo as seguintes Equações (2.3) e (2.4):

$$u(x, z, t) = -\frac{\delta \phi(x, z, t)}{\delta x} = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.3)$$

$$w(x, z, t) = -\frac{\delta \phi(x, z, t)}{\delta z} = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.4)$$

A aceleração é obtida derivando a componente da velocidade em ordem ao tempo, logo a aceleração horizontal e vertical são dadas pelas seguintes Equações (2.5) e (2.6), respetivamente:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.5)$$

$$\frac{\delta w}{\delta t} = -\frac{H}{2} g k \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.6)$$

A elevação da superfície da água, η , em função da posição horizontal, x , e do tempo, t , de acordo com um determinado H e T , pode ser dada pela seguinte Equação (2.7):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

A velocidade de propagação da onda, ou a celeridade de onda, é dada pela Equação (2.8):

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2.8)$$

A introdução da relação de dispersão, $\omega^2 = gk \tanh(kd)$, conjugada com a equação da celeridade da onda, $C = \frac{L}{T}$, e a Equação (2.8) anteriormente referida, permite assim retirar a seguinte Equação (2.9) do comprimento de onda:

$$L = \frac{gT}{\omega} \tanh(kd) \quad (2.9)$$

De forma a simplificar estas equações, as funções hiperbólicas que descrevem o movimento das ondas possuem assintotas convenientes para águas profundas e pouco profundas, sendo útil utilizá-las para obter formas simplificadas das equações.

Na Figura 2.5 apresentam-se as funções hiperbólicas com as suas assintotas, onde é possível distinguir as regiões dentro das quais as aproximações assintóticas se tornam válidas. Verifica-se os limites de três regiões, para determinadas gamas de kh , com h igual à profundidade (d), estas são definidas como águas pouco profundas, de profundidade intermédia e águas profundas, respetivamente.

No caso particular deste trabalho, de geração de ondas num canal com $d \ll L$, a região de interesse é a de águas pouco profundas, onde a relação de dispersão se reduz da seguinte forma:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) = gk^2 d \quad (2.10)$$

$$C = \sqrt{gd} \quad (2.11)$$

A celeridade de onda em águas pouco profundas é determinada apenas tendo em conta a profundidade da água.

A análise destas equações que governam a teoria linear das ondas permite uma vez mais verificar a grande dependência do parâmetro da profundidade. Este parâmetro permite evidenciar a variação das equações, desenvolvidas por Airy, consoante a profundidade relativa.

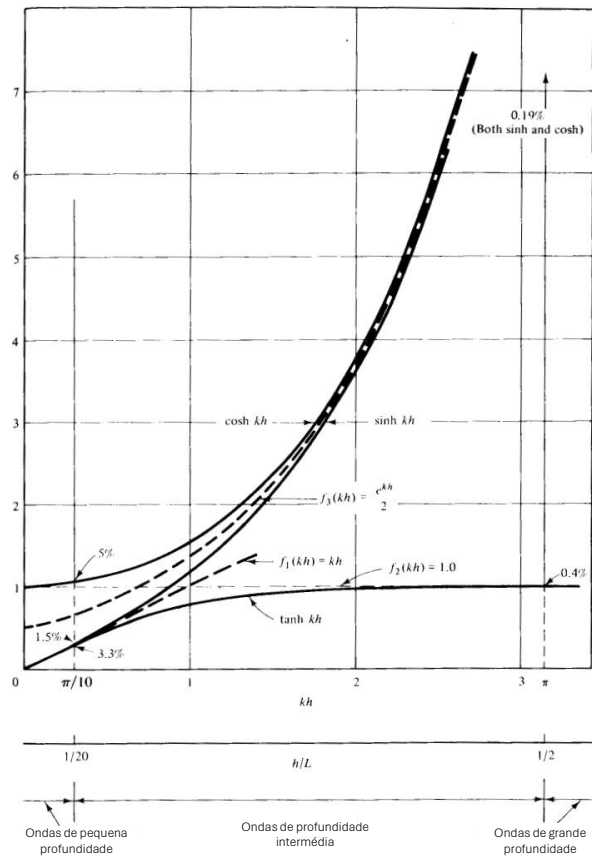


Figura 2.5: Profundidade relativa e assintotas de funções hiperbólicas [11].

A teoria das ondas lineares caracteriza o deslocamento das partículas de água, em órbitas fechadas e sem transporte de massa. As partículas movem-se geralmente em trajetórias elípticas em águas pouco profundas ou de transição e em trajetórias circulares em águas profundas. A Figura 2.6 representa a trajetória das partículas de água mediante a profundidade.

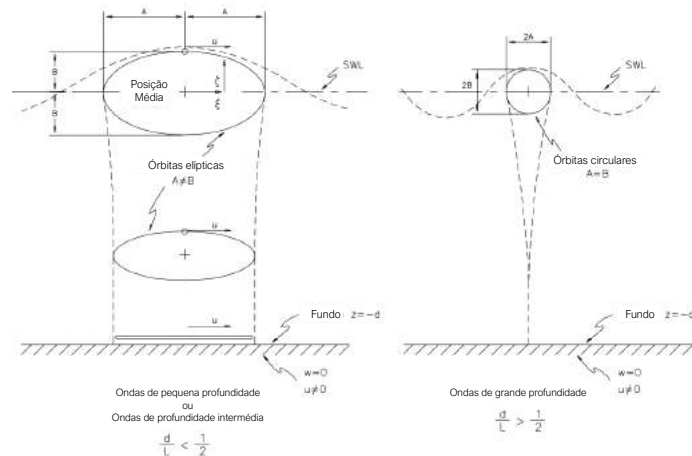


Figura 2.6: Deslocamento das partículas de água mediante a profundidade [10].

2.1.4 Teoria de 2.^a Ordem de Stokes

A limitação da teoria linear das ondas para pequenas profundidades traduziu-se numa necessidade de recorrer a teorias mais complexas.

Posto isto, Stokes em 1847 foi o primeiro a desenvolver uma teoria de ondas não lineares, denominada ondas de 2.^a ordem de Stokes. A aplicação desta teoria torna-se bastante relevante para $H/L < 0,125$.

Desde então, numerosas teorias, de modo a descrever o comportamento das ondas utilizando este método, têm sido derivadas por ordem superior de aproximações, para ondas de amplitude finita.

A expressão que permite calcular a elevação da superfície livre é dada pela Equação (2.12) [11]:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{kH^2}{16} \left[\frac{\cosh(kd)[2 + \cosh(2kd)]}{\sinh^3(kd)} \right] \cos[2(kx - \omega t)] \quad (2.12)$$

Segundo a teoria de 2.^a ordem de Stokes, o potencial de velocidade é dado da seguinte forma:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) - \frac{3H^2\omega}{32} \frac{\cosh[2k(d+z)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (2.13)$$

Através da derivação da Equação (2.13) retiram-se as componentes horizontal e vertical da velocidade, respetivamente:

$$u(x, z, t) = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3H^2\omega k}{16} \frac{\cosh[2k(d+z)]}{\sinh^4(kd)} \cos[2(kx - \omega t)] \quad (2.14)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3H^2\omega k}{16} \frac{\sinh[2k(d+z)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (2.15)$$

Para uma melhor visualização e interpretação das diferentes teorias de onda e os seus domínios de aplicação, Le Méhauté, em 1976, descreveu o domínio de validade para cada teoria de ondas [12], conforme mostra a Figura 2.7.

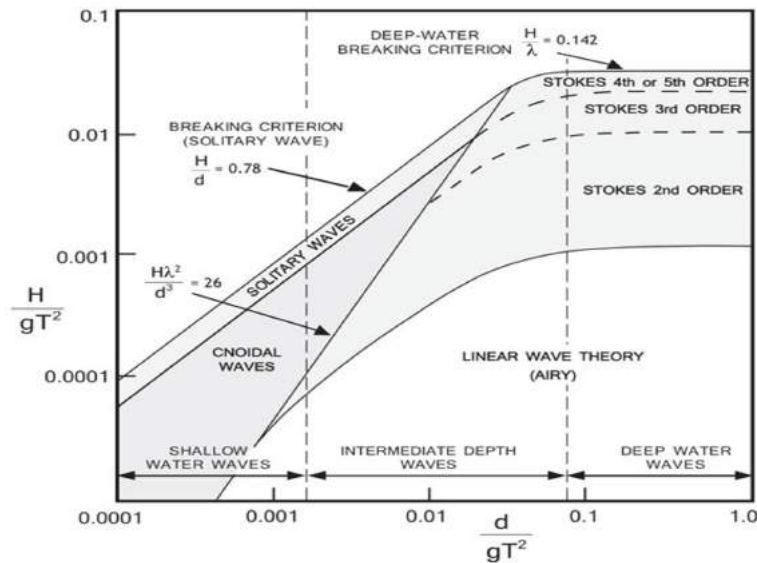


Figura 2.7: Domínios de validade para cada teoria de ondas [12].

2.2 Ondas geradas em canais

A geração de ondas em canais é um processo fundamental, utilizado em instalações experimentais, para o estudo do comportamento das ondas em condições controladas.

A correta geração de ondas em modelo físico bidimensional torna-se crítica para a calibração e validação dos modelos matemáticos e numéricos que dão resposta satisfatória ao estudo do comportamento das ondas, como também os efeitos que provocam em estruturas perto e longe da costa. Os canais de ondas têm então um papel crucial na avaliação da resposta das estruturas projetadas no trajeto de ação das ondas, como é o exemplo de sistemas de aproveitamento de energia das ondas, permitindo uma análise em escalas reduzidas com um custo significativamente menor que as estruturas finais a serem implementadas. Deste modo, é necessário que se consiga reproduzir no canal os fenómenos ondulatórios com a maior fidelidade possível ao que ocorre na natureza.

Os canais de ondas são geralmente abertos no topo, com uma largura e profundidade muito inferiores relativamente ao comprimento. Numa das suas extremidades encontra-se o mecanismo de geração de ondas, enquanto que na outra extremidade é comum existir algo semelhante a uma praia artificial ou a uma superfície absorvente de ondas [13].

Os geradores de ondas podem ser ajustados para produzir ondas com diferentes características, tais como ondas regulares, ondas irregulares, ondas solitárias e outros padrões de onda complexos. Existe uma variedade de sistemas geradores de agitação marítima, contudo, neste trabalho a formação de agitação foca-se na utilização de batedores, onde a oscilação é provocada a partir do deslocamento dos mesmos. O batedor de ondas divide-se em três principais tipos, cada um deles tem vantagens específicas, uma vez que cada um depende da relação entre as ondas geradas e a profundidade do canal. Na

Figura 2.8 é possível observar o batedor de ondas do tipo pistão, do tipo flap e, por último, de êmbolo.

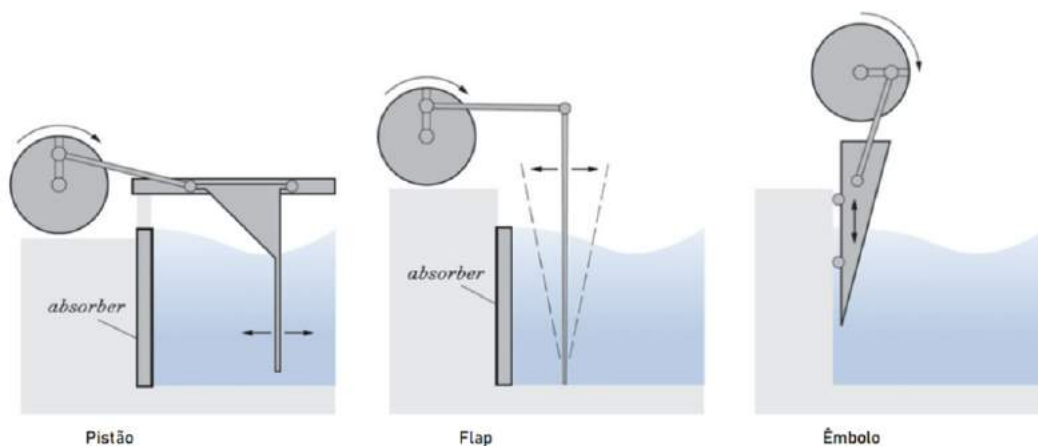


Figura 2.8: Diferentes tipos de batedor para geração de agitação marítima [14].

O batedor de ondas do tipo pistão consiste numa placa vertical que oscila horizontalmente e é submersa numa profundidade perto da profundidade do canal a que se encontra inserido. Esta característica de deslocamento de toda a coluna de água presente no canal, torna este tipo de batedor mais adequado para águas pouco profundas, uma vez que, para grandes profundidades, o deslocamento horizontal uniforme por toda a profundidade do canal não representa o movimento real das partículas de água nessa condição de onda. Outro fator de desvantagem seria o custo muito elevado, exigindo grandes dimensões da placa do batedor, como a capacidade de suportar forças muito elevadas no deslocamento da massa de água. A aplicação deste tipo de batedor é bastante comum em canais de ondas industriais, permitindo a modelação de portos e estruturas costeiras [15].

O batedor de ondas do tipo flap consiste numa pá articulada no fundo do canal com movimento semelhante a um pêndulo invertido. Contrariamente ao batedor de ondas do tipo pistão, este é utilizado para produzir ondas em águas profundas onde o movimento das partículas decai exponencialmente com a profundidade, não existindo movimento significativo das partículas no fundo. Algumas aplicações típicas são a modelação de estruturas flutuantes em águas profundas e a investigação da física das ondas oceânicas.

O batedor de êmbolo ou também designado de cunha é característico por oscilar verticalmente para gerar ondas e pode ser utilizado imerso ou a uma altura que esteja imediatamente acima da superfície da água [13]. Este mecanismo tem a vantagem de conseguir formar ondas de alta frequência com uma força aplicada mínima [16].

Nesta dissertação irá ser abordado mais ao pormenor o batedor de ondas do tipo pistão, pois será este o utilizado na experimentação para a geração de ondas.

2.3 Sistemas de absorção em canais de ondas

A reprodução e análise dos fenómenos ondulatórios em modelos físicos tem vindo a ser otimizada com a criação de novos métodos e melhoramento de equipamentos. Contudo, um dos principais problemas que persiste associado à reprodução de ondas em laboratório são as ondas refletidas [17].

No oceano, este problema não tem significado visto que as ondas refletidas pela costa propagam-se e dissipam-se sem encontrar obstáculos físicos. Em laboratório, isto já não acontece, uma vez que a reflexão das ondas geradas podem alcançar o batedor de ondas, causando uma alteração das seguintes ondas geradas pela interação destas com as ondas refletidas na placa do batedor. Este processo pode resultar em instabilidades das ondas no interior do canal, colocando em causa a validação dos ensaios realizados ao apresentarem resultados incompatíveis com a realidade.

Existem dois grupos de sistemas de absorção de ondas: ativo e passivo. O sistema de absorção ativa gera ondas como reação às ondas refletidas detetadas e o sistema de absorção passivo amortece as ondas, geralmente por intermédio de equipamentos de dissipação de energia [18].

Desde a última década do século XX, a aplicabilidade de sistemas de absorção ativa em canais de água tem vindo a crescer, encontrando-se aplicada em diversos laboratórios de hidráulica, nomeadamente no [Danish Hydraulics Institute \(DHI\)](#), na Dinamarca, no [Canadian Research Center \(CRC\)](#), no Canadá, e no [Wallingford Research \(WR\)](#), no Reino Unido. Estes sistemas de absorção baseiam-se na teoria linear das ondas e no controlo linear, o que permite a resolução do problema da absorção ativa independentemente da geração de ondas [17].

A absorção ativa de ondas num canal requer então a existência de um feedback hidrodinâmico que forneça a informação referente às ondas a absorver e o sistema de controlo assegura que o batedor de ondas se desloca de modo a absorver as ondas indesejadas.

A atuação deste sistema encontra-se esquematizada na Figura 2.9.

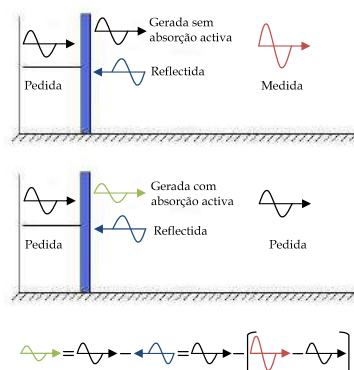


Figura 2.9: Representação esquemática do método de atuação do sistema de absorção ativa [19].

De uma forma simplificada, quando o sistema de absorção ativa é acionado no sistema de controlo do batedor de ondas do tipo pistão, a onda a ser gerada deve corresponder à diferença entre a onda pedida e a onda refletida, sendo esta última determinada pela diferença entre a onda medida junto à placa do batedor e a onda gerada. Assim, deste modo é possível corrigir a onda gerada, assegurando a formação de ondas aproximadamente iguais à onda pedida [19].

2.4 Batedor de ondas do tipo pistão

2.4.1 Princípio de funcionamento

Os batedores do tipo pistão constituem um dos dispositivos mais simples na geração de ondas, segundo Biéssel e Suquet [20]. Estes dispositivos mecânicos são constituídos por uma placa vertical animada com um movimento de translação horizontal, geralmente paralelo à superfície da água em repouso, como representado na Figura 2.10.

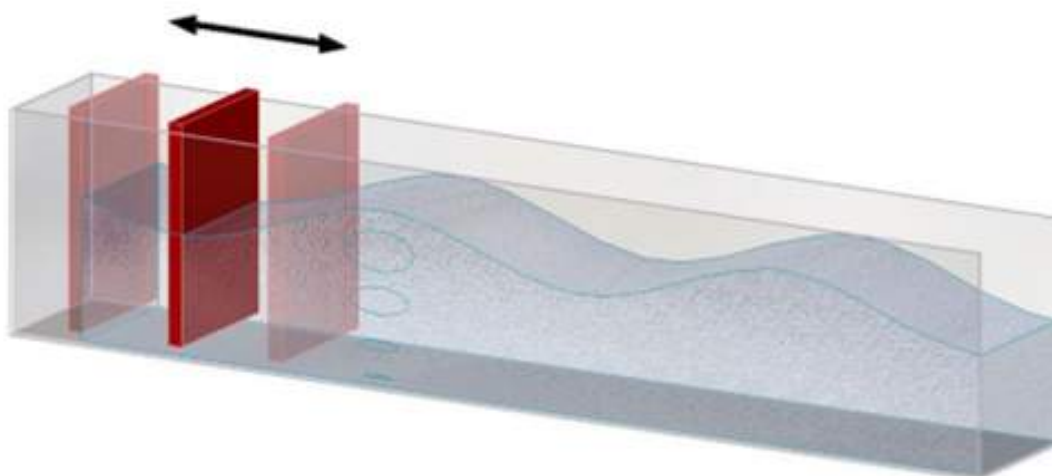


Figura 2.10: Representação esquemática da geração de ondas num canal recorrendo a um batedor de ondas do tipo pistão [21].

Como foi referido anteriormente, este tipo de gerador de ondas é também caracterizado por apresentar melhores resultados para ondas de elevado comprimento relativamente à profundidade, como também é o único mecanismo que permite mover toda a coluna de água. No entanto, um dos principais problemas deste tipo de batedor é a necessidade de exercer uma maior força devido à força hidrostática, para que seja possível ocorrer deslocamento da massa de água [22].

2.4.1.1 Teoria de 1.^a ordem do batedor

A teoria para a geração de ondas do batedor de ondas do tipo pistão foi sustentada pela função de transferência de Biéssel e Suquet (1951), iniciando pela teoria linear para

ondas regulares [23].

Esta função de transferência do batedor de ondas baseia-se no estabelecimento de uma relação entre o movimento da placa do batedor no início do canal e a elevação da superfície livre originada por esse mesmo movimento.

De acordo com esta função, as equações que regem a teoria do batedor de ondas do tipo pistão são determinadas a partir da relação entre o volume de água deslocado pelo pistão num curso completo e o volume da crista da onda gerada [2]. Esta teoria foi também desenvolvida por Galvin (1964) e encontra-se representada de forma esquematizada na Figura 2.11.

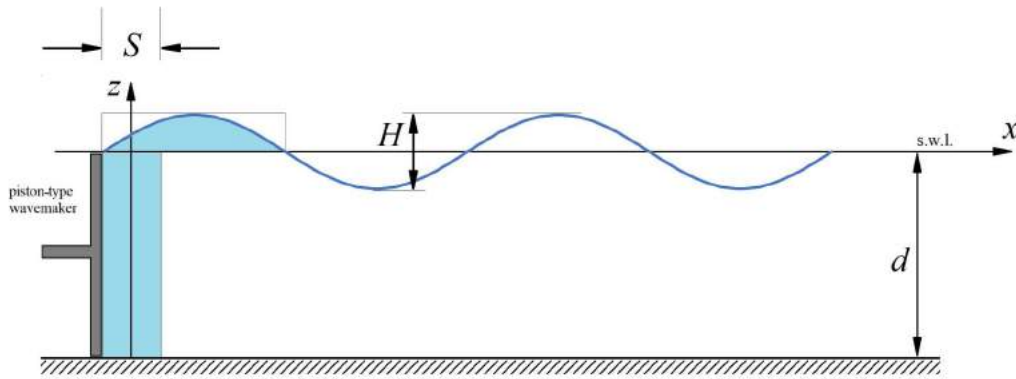


Figura 2.11: Representação esquemática da teoria simplificada de Galvin para o batedor de ondas do tipo pistão para águas pouco profundas [24].

Uma vez que na teoria linear a amplitude de onda não varia com a posição, logo a solução apenas tem significado num domínio distante [23]. Desta forma, assumindo o fluido irrotacional e incompressível e uma pressão constante na superfície livre, a elevação da superfície livre pode ser expressa através da seguinte Equação (2.16):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx + \delta) \quad (2.16)$$

A fase inicial δ é dada por um valor compreendido entre 0 e 2π .

O movimento horizontal do pistão de 1ª ordem, $x_{p1}(t)$, é dado pela Equação (2.17) e a relação entre a altura da onda H e o curso do pistão S é dado pela Equação (2.18) [2].

$$x_{p1}(t) = \frac{S}{2} \sin(\omega t + \delta) \quad (2.17)$$

$$\frac{H}{S} = \frac{2[\cosh(2kd) - 1]}{\sinh(2kd) + 2kd} \quad (2.18)$$

A geração de ondas regulares em canais, tendo por base a teoria de 1.ª ordem deste tipo de batedor de ondas, pode causar a formação de ondas secundárias que progridem a uma velocidade ligeiramente inferior à das ondas primárias. Este fenómeno pode então

provocar modificações no perfil das ondas geradas, devido à diferença entre a velocidade imposta no fluido pelo batedor e a velocidade orbital teórica da onda (Calabrese & Buccino, 2008) [23]. Esta alteração no comportamento das ondas torna-se cada vez mais acentuada à medida que aumenta o declive de onda, $\epsilon = \frac{H}{L}$, ou diminui a profundidade relativa, d/L . De acordo com Goda (1967), a formação de ondas secundárias indesejadas é dada para $d/L < 0,15$, sendo este o caso relativo a instalações equipadas com um batedor de ondas do tipo pistão [25].

Posto isto, fica a necessidade de implementar a teoria de 2.^a ordem para este tipo de batedor, prevenindo a geração de ondas secundárias indesejadas.

2.4.1.2 Teoria de 2.^a ordem do batedor

A teoria de 2.^a ordem do batedor de ondas do tipo pistão baseia-se na teoria de Madsen, que desenvolveu, de uma forma simples, a capacidade de gerar ondas de Stokes sem que ocorresse alterações no formato das ondas à medida que estas se propagam [26].

Segundo a teoria de Madsen, o curso do pistão S pode ser redefinido da Equação (2.18), para $S = H/m_1$, onde:

$$m_1 = \frac{2 \sinh^2(kd)}{\sinh(kd) + \cosh(kd) + kd} \quad (2.19)$$

Além disso, Madsen derivou uma solução aproximada capaz de fornecer uma expressão explícita para o movimento do batedor de ondas, de modo a eliminar as ondas secundárias [23]. Por conseguinte, o deslocamento do batedor de 2.^a ordem, $x_{P_2}(t)$, pode ser expresso pela seguinte Equação (2.20):

$$x_{P_2}(t) = \frac{S}{2} \sin(\omega t + \delta) + \left[\left(\frac{H^2}{32d} \right) \cdot \left(\frac{3 \cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \right) - \frac{2}{m_1} \right] \sin[2(\omega t + \delta)] \quad (2.20)$$

A Equação (2.20) é limitada, dado que para a sua aplicação é necessário cumprir a seguinte condição, $HL^2/d^3 < 8\pi^2/3$, onde o termo da esquerda corresponde ao número de Ursell, $U = HL^2/d^3$.

2.4.2 Design e construção

O objetivo do *design* do batedor é a tentativa de combinar o deslocamento da placa com o movimento das partículas de água, de forma a minimizar as ondas instáveis que se encontram próximas da placa. Estas ondas indesejadas decompõem-se naturalmente ao longo do tempo, contudo é importante reduzir a amplitude das ondas geradas minimizando o espaço inutilizável em frente da placa.

O batedor de ondas do tipo pistão é constituído por uma placa lisa e plana, estruturalmente rígida, apoiada em articulação dentro do canal e parcialmente imersa na água. Este batedor necessita também de uma estrutura de suporte com sistema de guias para o

apoio da placa, visto que esta fica suspensa no canal. A necessidade de instalação desta guia dificulta os processos de instalação e remoção do equipamento [22].

A placa pode ser acionada através de diferentes sistemas mecânicos, por meio da utilização de braços hidráulicos que promovem o deslocamento da placa ou através do princípio mecânico de movimentação de um fuso, sendo o movimento da placa gerado pelo acionamento de um motor. Este motor deve apresentar uma extrema precisão no seu posicionamento e uma resposta rápida, de modo que a placa realize o movimento pretendido com o maior rigor possível. O exemplo mais conhecido de um motor com estas características é o motor de passo e é este o tipo de motor utilizado no trabalho.

Na construção de um batedor de ondas do tipo pistão, o material geralmente utilizado é o aço inoxidável, conferindo uma vida útil superior a 20 anos. O fuso é também de aço inoxidável e todos os elementos de suporte e fixação possuem normalmente um revestimento resistente à corrosão [27].

Na Figura 2.12, optou-se por mostrar, na realidade, um exemplo de um batedor de ondas do tipo pistão inserido num canal de ondas, pertencente à Faculdade de Engenharia de Bilbao.



Figura 2.12: Canal de ondas pertencente à Faculdade de Engenharia de Bilbao [28].

2.5 Motor de passo

Tal como a grande maioria dos motores elétricos, o funcionamento do motor de passo recorre à interação entre campos eletromagnéticos [29]. No entanto, ao contrário dos motores convencionais, que rodam continuamente, o motor de passo é um motor síncrono que possui a particularidade de percorrer um número exato de passos. Este caracteriza-se

pela precisão no controlo da posição no seu eixo, como também pela elevada precisão da velocidade e binário aplicados pelo motor.

O motor de passo consiste em dois principais componentes: o rotor e o estator, como representado na Figura 2.13. O rotor é o elemento que fornece rotação, enquanto que o estator é a parte estacionária do motor de passo que aloja o rotor. Este último traduz-se em múltiplas bobinas, que atuam como íman quando existe passagem de corrente elétrica através delas [30].

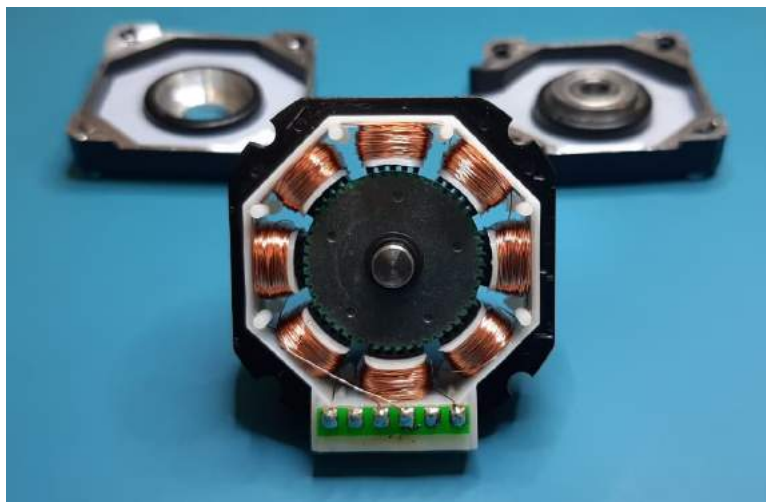


Figura 2.13: Constituição do motor de passo - Rotor e Estator [31].

O método de funcionamento deste tipo de motor consiste no controlo individual de bobinas que, quando ativadas, atraem um dos pólos do íman conectado ao eixo do motor e provocam a rotação do mesmo, como representado na Figura 2.14.

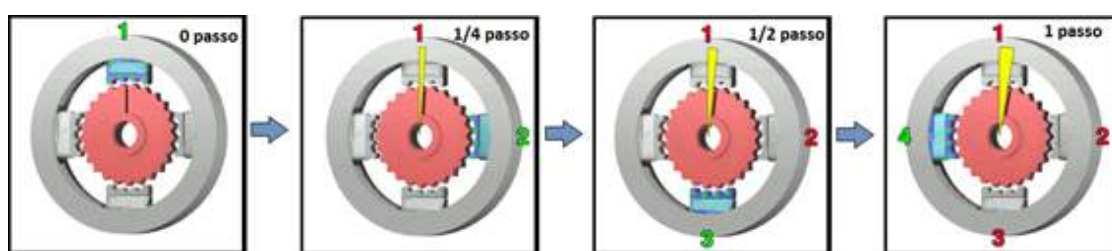


Figura 2.14: Princípio de funcionamento do motor de passo [31].

O motor de passo apresenta uma excelente resposta ao arranque, paragem e inversão e, desde que o motor funcione dentro dos seus limites de carga, a posição do eixo é sempre conhecida, sem a necessidade de um mecanismo de feedback [32]. Outra característica é o facto de, quando não existe corrente transmitida ao motor, este permite manter firmemente a sua posição.

O motor de passo apresenta diversas aplicações na indústria, onde se inclui impressoras, máquinas CNC e bombas volumétricas, devido à sua alta fiabilidade, baixo custo,

capacidade de fornecer um binário elevado a baixas velocidades, como também apresenta uma construção simples que facilita a sua utilização [33].

No controlo do motor de passo é necessário um controlador externo para regular o seu movimento. Este tipo de motor é facilmente controlado por um microcontrolador, como o Arduino. No entanto, não é boa prática ligar diretamente a placa de Arduino ao motor de passo. Isto deve-se ao facto de o motor armazenar energia elétrica em campos magnéticos, sendo que, quando não existe passagem de corrente elétrica, esta energia magnética armazenada transforma-se novamente em energia elétrica, podendo assim danificar os componentes.

Geralmente, recorre-se a um microcontrolador aliado a transístores que acionam as bobinas na ordem correta e na velocidade desejada. Estes controladores podem ser unipolares ou bipolares. Nos motores de passo com controlo unipolar, a corrente flui sempre no mesmo sentido, sendo cada bobina dedicada a um sentido de corrente, ou seja, a bobina A+ ou a bobina A- é alimentada e nunca em conjunto. Contrariamente, o motor de passo com controlo bipolar permite o fluxo de corrente em ambos os sentidos das bobinas.

Para a seleção do motor de passo mais adequado para um determinado projeto, em combinação com um controlador específico, a maioria dos fornecedores apresenta curvas características de binário-velocidade de rotação. A partir destas curvas características, é possível retirar o binário disponível para uma determinada velocidade. Esta curva depende das diferentes combinações de motor de passo e *driver* utilizados, como também da corrente e tensão transmitida ao controlador. A Figura 2.15 representa, como exemplo, a curva característica binário-velocidade para o motor de passo PKP264D28, da empresa Oriental Motor.

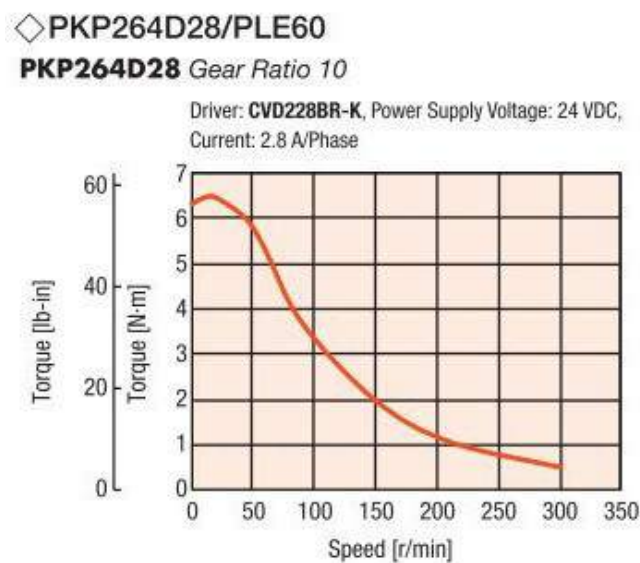


Figura 2.15: Curva de binário vs velocidade de rotação para o motor de passo PKP264D28 [34].

Um exemplo do esquema de ligação entre o motor de passo, o controlador e a placa de Arduino é representado na Figura 2.16.

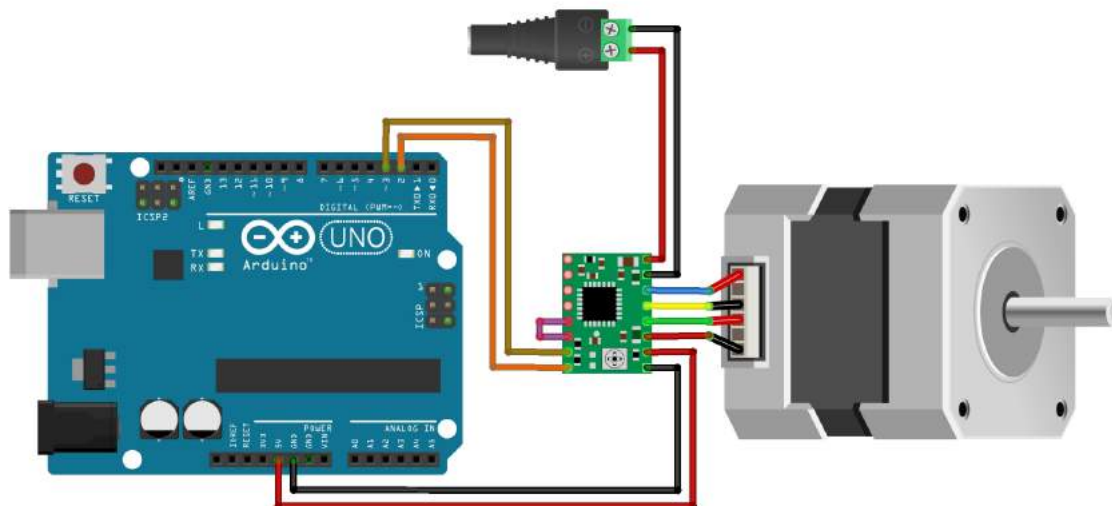


Figura 2.16: Exemplo de esquema de ligação do motor de passo à placa Arduino [31].

O código de funcionamento do motor de passo, após o circuito ser implementado, é desenvolvido de maneira a promover o movimento desejado do batedor. A programação é realizada na placa Arduino. Esta contém um conector USB para a ligação ao computador, sendo por intermédio do ambiente de programação Arduino, *Arduino IDE*, que esta é programável. O *Arduino IDE* contém uma biblioteca de funções a utilizar para este tipo de motor, sendo possível executar, de forma simplificada, comandos como aceleração e desaceleração durante o movimento do motor de passo [31].

DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo inicia-se com a modelação em *SolidWorks* do batedor do tipo pistão para a geração de ondas no canal do laboratório de MFTA do DEMI. Posteriormente, procede-se ao fabrico e compra dos componentes necessários à construção de um batedor deste tipo, como também à montagem funcional entre todos os componentes. Por fim, é realizada a construção do sistema de absorção a inserir no canal de ondas.

3.1 Modelação em *SolidWorks* do batedor

A primeira etapa a realizar para a construção do batedor de ondas do tipo pistão é o desenho e modelação das peças.

Antes de proceder à conceção do batedor, torna-se fundamental conhecer as dimensões do canal onde será inserido o batedor. Deste modo, obtém-se um correto dimensionamento das peças a fabricar, como também uma visualização *à priori* da ligação entre os diferentes componentes. Na Figura 3.1 representa-se o canal de ondas e a estrutura de suporte.



Figura 3.1: Canal de ondas e estrutura de suporte utilizados no estudo.

O canal tem 3 m de comprimento, 17,5 cm de largura e 40,2 cm de altura.

A modelação do batedor, realizada no *software SolidWorks*, dividiu-se em três grupos, de modo a organizar os diferentes módulos a construir: módulo de fixação do motor de passo ao canal de ondas, módulo de deslocamento da placa para a geração de ondas e, por fim, módulo de fixação do encoder ao canal.

O módulo de fixação do motor de passo no canal tem dois objetivos a cumprir: transmissão do movimento entre o motor de passo e o fuso e a fixação de todo o conjunto à estrutura de suporte do canal de ondas, adquirindo assim a estabilidade necessária.

Na Figura 3.2 encontra-se representados os componentes desenvolvidos para o módulo de fixação.



Figura 3.2: Módulo de fixação do motor de passo ao canal de ondas.

Na Figura 3.3 representa-se o detalhe da transmissão da rotação do motor de passo ao fuso, por meio da utilização de um acoplamento.

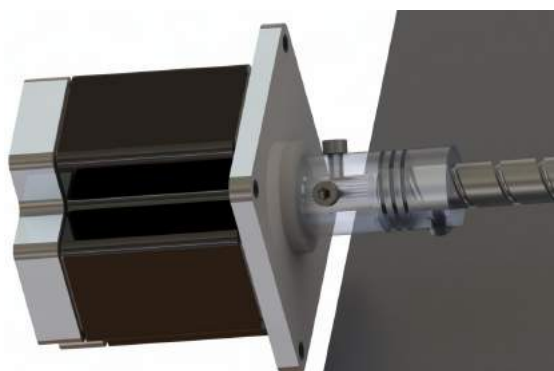


Figura 3.3: Acoplamento entre o veio do motor de passo e o fuso.

Em seguida, encontra-se representado na Figura 3.4 o módulo de deslocamento da placa, ou seja, o único módulo que não se encontra fixo, sendo o seu deslocamento responsável pela geração de ondas no canal.

As duas porcas utilizadas, com as mesmas características que o fuso, deslocam-se ao longo da rosca do fuso, permitindo o movimento do batedor. Uma das porcas foi colocada em contacto com o bloco rígido e a outra, do lado contrário, encontra-se em contacto com a chapa que movimenta a água do canal.

No apoio e alinhamento deste mecanismo de movimentação recorreu-se a duas guias. Para que ocorra um movimento suave do batedor através das guias resolveu-se recorrer à utilização de quatro casquilhos, para minimizar o atrito. Dois casquilhos são colocados em contacto com o bloco e os outros dois em contacto com a chapa.

De modo a impedir a flexão e vibração da placa devido ao momento, colocou-se um perfil em L fixo entre a placa e o bloco de deslocamento do batedor.

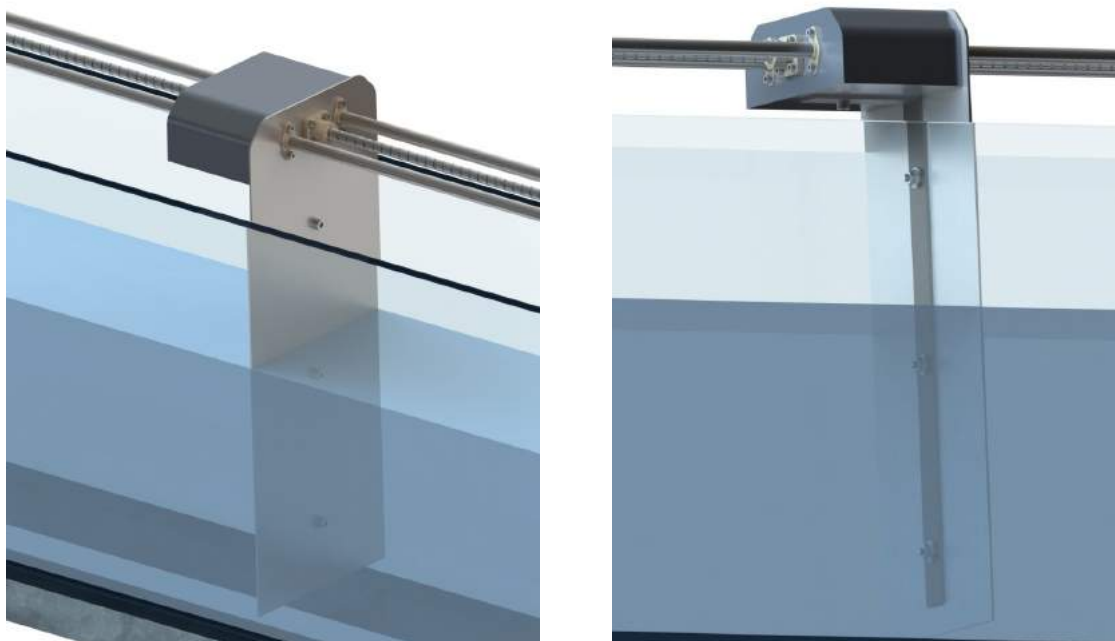


Figura 3.4: Módulo com movimento longitudinal para geração de ondas no canal.

Por último, o módulo de fixação do encoder tem o objetivo de suporte do batedor na extremidade final do fuso, como também de transmitir a rotação realizada pelo fuso ao encoder.

Os dois anéis de fixação têm a função de impedir o movimento longitudinal do fuso em ambos os sentidos, minimizando a força aplicada nos acoplamentos, tanto do motor de passo como do encoder.

Na Figura 3.5 apresenta-se o conjunto fixo à estrutura de suporte do canal de ondas.



Figura 3.5: Módulo de transmissão do movimento ao encoder.

O batedor de ondas do tipo pistão, modelado no *SolidWorks*, contém no total 87 peças, incluindo parafusos e porcas utilizados na imobilização de diversos componentes. Na Figura 3.6 encontra-se representado o design idealizado do batedor e da estrutura de suporte criada para a fixação do batedor ao canal de ondas presente no DEMI.

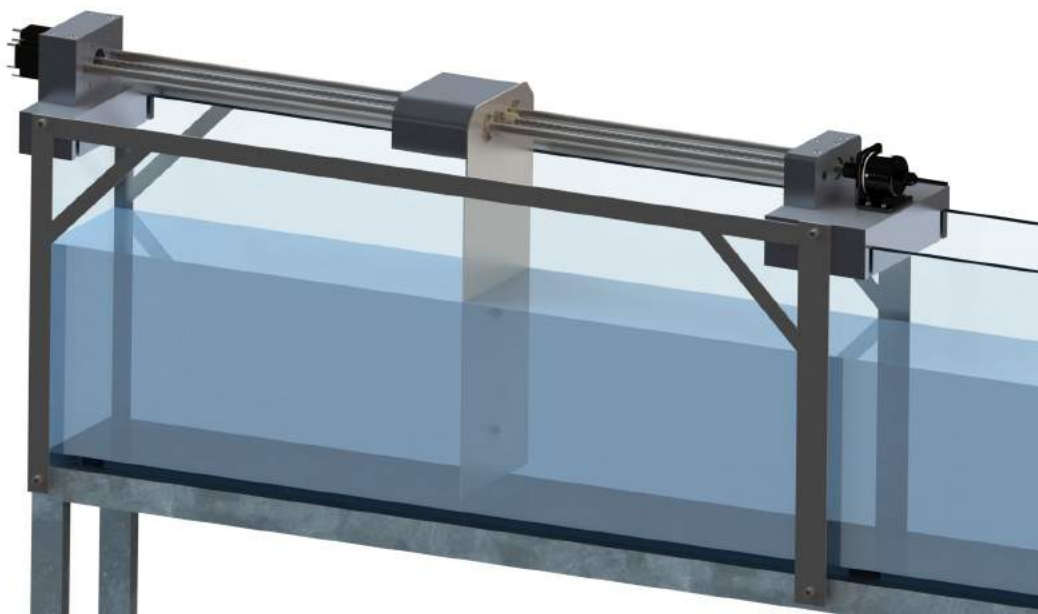


Figura 3.6: Modelação em *SolidWorks* do batedor de ondas inserido no canal.

3.2 Construção e montagem do batedor

Os módulos do batedor foram construídos a partir de uma placa de [PVC](#). A modelação dos blocos foi feita na fresadora e no torno mecânico.

O motor de passo, o acoplamento para o veio do motor de passo, as guias de alumínio, o encoder, o acoplamento entre o fuso e o encoder, o fuso, as porcas de fuso e os casquilhos

foram adquiridos no laboratório de MFTA do DEMI.

Na Figura 3.7(a) encontra-se representado o motor de passo utilizado, sendo o modelo SM25776 da empresa *Waveshare*. Este motor pertence à família dos motores de passo NEMA24. Apresenta duas fases (A e B) e uma corrente nominal de 3 A/Fase. Caracteriza-se por uma resolução de 200 passos por revolução, deslocando-se $1,8^\circ$ por passo. Apresenta um binário de retenção de 1,90 N/m, isto é o binário que o motor irá produzir, quando este se encontra em repouso e com corrente aplicada. O acoplamento flexível, em alumínio, empregue na união entre este motor e o fuso encontra-se representado na Figura 3.7(b).



Figura 3.7: Componentes de acionamento.

A curva característica de binário-velocidade de rotação para este tipo de motor de passo, consoante a tensão e corrente aplicada na alimentação do motor, encontra-se representado na Figura 3.8.

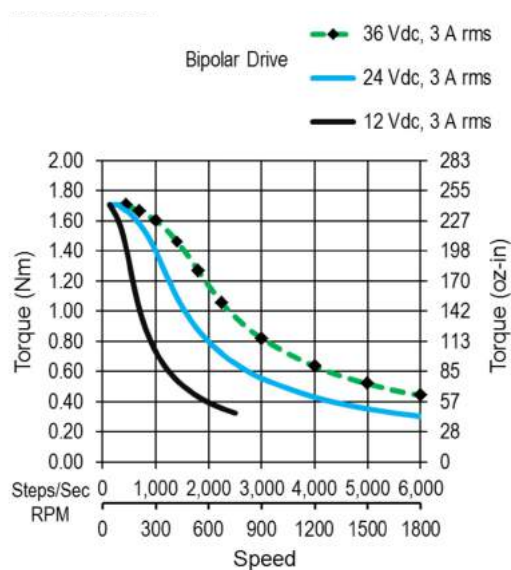


Figura 3.8: Curva de binário vs velocidade de rotação para o motor de passo SM25776 [35].

O fuso, porcas de fuso e casquilhos utilizados nas guias foram adquiridos na empresa *Igus®*. O fuso adquirido tem 87 cm de comprimento, de modo a ser compatível com o comprimento das guias de alumínio utilizadas. Este fuso apresenta 10 cm de diâmetro exterior, sendo o material em aço inoxidável 304. A direção da rosca é rosca direita e o fuso caracteriza-se por um passo de 50 mm. As duas porcas de fuso com flange, implementadas no batedor, apresentam as mesmas características que as do fuso, ou seja, o mesmo diâmetro de furo, direção de rosca e passo. O material utilizado é *Iglidur® J*, sendo este um plástico próprio da marca, onde as peças foram moldadas por injeção. Relativamente aos casquilhos, à semelhança das porcas de fuso, estes possuem flange e o mesmo tipo de material. Estes casquilhos são autolubrificados e apresentam baixos coeficientes de atrito, baixo desgaste em contacto com diferentes tipos de materiais no seu eixo, como também apresentam um bom amortecimento das vibrações que poderão ocorrer durante o movimento do batedor. Nas Figuras 3.9(a) e 3.9(b), encontra-se representado uma das porcas de fuso adquiridas como também um dos casquilhos, respetivamente.



(a) Porca de Fuso



(b) Casquilho

Figura 3.9: Componentes adquiridos através da empresa *Igus®*.

O encoder e o acoplamento utilizados são da empresa *Autonics Corporation*. O encoder rotativo incremental fornece uma medição precisa de ângulo, posição, velocidade e aceleração. Este encoder pertence à série *E50S*, sendo utilizado o modelo *E50S8-1000-6-L-5*, representado na Figura 3.10(a). Este caracteriza-se por um diâmetro exterior do eixo de 8 mm, uma resolução de 1000 passos por revolução e alimentação de 5 V. O acoplamento, representado na Figura 3.10(b), assegura a transmissão do movimento gerado no fuso ao encoder.

(a) Encoder *E50S8-1000-6-L-5*

(b) Acoplamento

Figura 3.10: Componentes de medição da rotação do motor de passo.

3.2. CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO BATEDOR

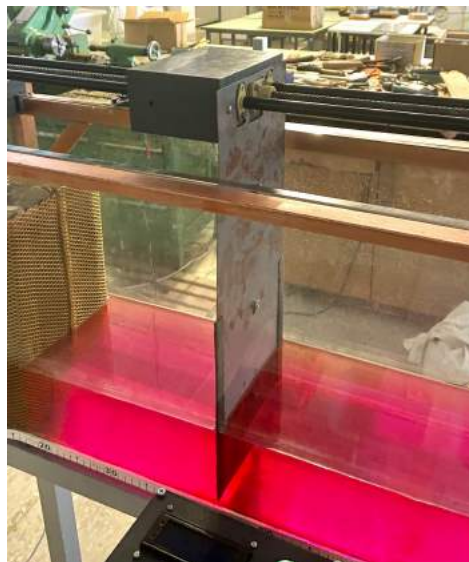
Fabricados e adquiridos todos os componentes necessários, procedeu-se à montagem dos diferentes módulos, como apresentados na secção 3.1. Na Figura 3.11 encontram-se os três grupos construídos: o módulo de fixação do motor de passo e o módulo de fixação do encoder ao canal de ondas e, por fim, o módulo de deslocamento da placa para geração de ondas no canal.



(a) Módulo de fixação do motor de passo



(b) Módulo de fixação do encoder



(c) Módulo de deslocamento da placa

Figura 3.11: Os três módulos constituintes do batedor fabricado.

Por último, para a construção da estrutura de fixação do batedor ao canal foram utilizadas várias cantoneiras soldadas. Na Figura 3.12 encontra-se apresentada a estrutura de suporte.



Figura 3.12: Batedor de ondas inserido no canal e fixo à estrutura.

3.3 Construção da praia e zona de absorção passiva

Na geração de ondas é importante capacitar o canal de ondas com um sistema eficaz para absorver as ondas geradas, para que estas não sejam “re-refletidas” pelo mecanismo de geração do batedor [18].

No canal de ondas em estudo, o sistema de absorção utilizado é do tipo passivo, no qual, por meio de estruturas de dissipação de energia, as ondas são amortecidas.

Dos métodos normalmente utilizados para este tipo de absorção, destaca-se a utilização de praias dissipativas, onde o declive gradual da praia incentiva a rebentação das ondas. A diminuição da velocidade das ondas à medida que a profundidade diminui e o constante fluxo energético faz com que ocorra um aumento progressivo da altura de onda. A diferença de velocidade entre a crista da onda (profundidade maior) e a cava da onda (profundidade menor) é significativa e aumenta constantemente, por forma que a crista da onda avança sobre a cava, onde não existe sustentação e, conseqüentemente, rebenta.

A colocação de blocos ou estruturas porosas representam outro método de absorção bastante utilizado, procurando criar turbulência e promover a dissipação de energia mediante interações entre as ondas geradas e os obstáculos.

No canal foram construídos dois mecanismos de absorção, ilustrados na Figura 3.13. Na zona livre a barlar do batedor foi construído um cubo dissipativo de energia e na extremidade mais distante do batedor foi instalada uma praia dissipativa de ondas.

3.3. CONSTRUÇÃO DA PRAIA E ZONA DE ABSORÇÃO PASSIVA

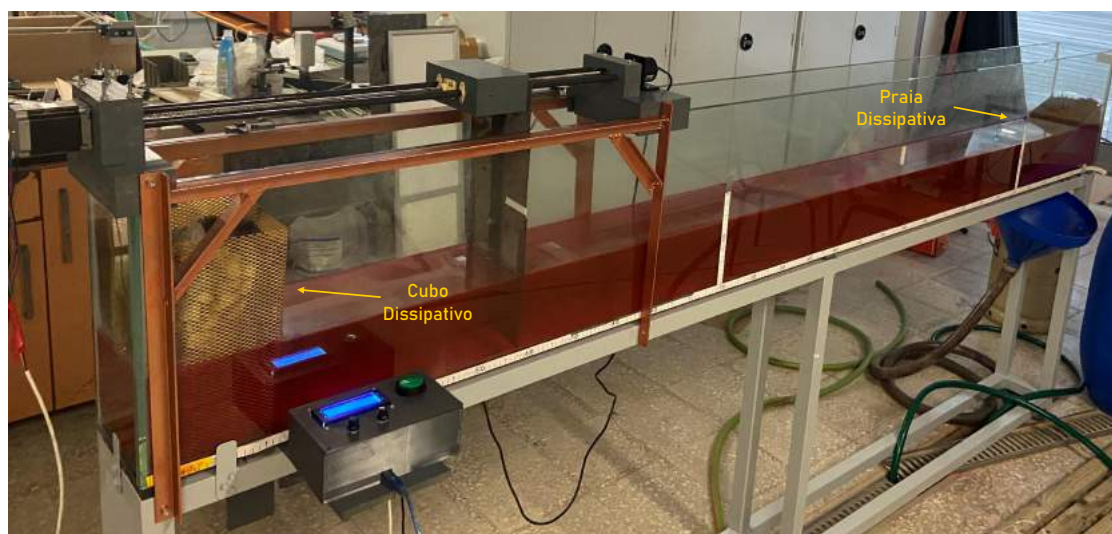


Figura 3.13: Estruturas de absorção instaladas no canal.

O cubo dissipativo tem como objetivo absorver as ondas na região a barlar do batedor de ondas, evitando que as ondas refletidas na extremidade mais próxima do canal atinjam o batedor e interfiram no seu funcionamento, alterando as características das ondas geradas. Para a construção deste cubo, como mostra a Figura 3.14, foram utilizadas várias redes sobrepostas, criando um espaço no seu interior, de forma quadrada. Neste espaço foi colocado um tapete rugoso permeável e, em seguida, preenchido com pequenas pedras. Deste modo, é criada uma zona porosa para a passagem de água por entre as cavidades das pedras, promovendo uma melhor absorção da agitação formada nesta zona.

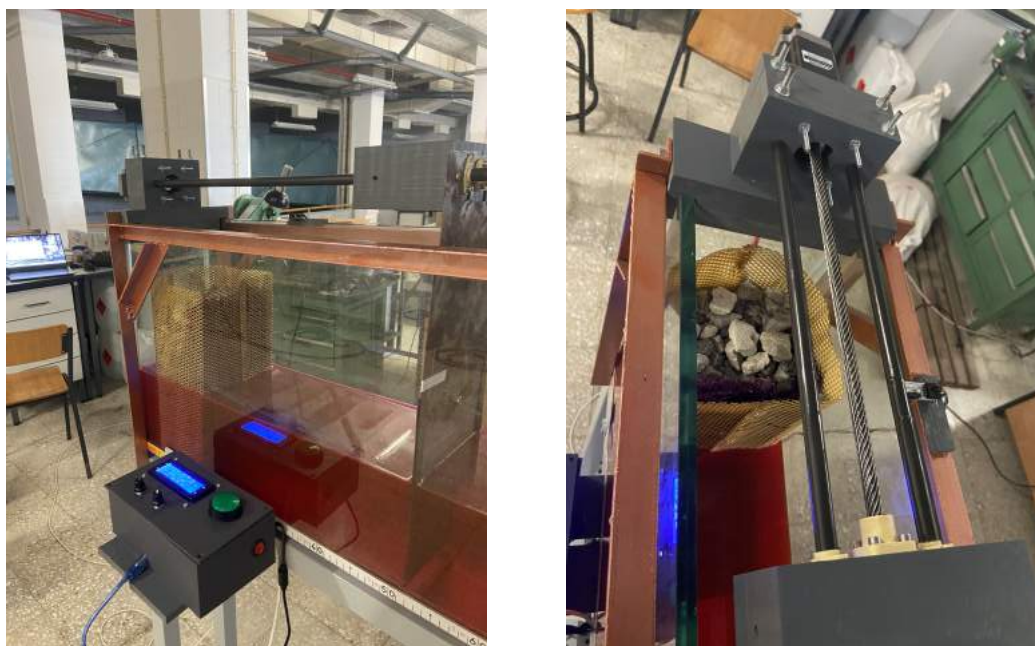


Figura 3.14: Cubo dissipativo implementado no canal de ondas.

No caso da praia absorvente de ondas, esta tem a função de replicar a atuação natural das praias, absorvendo a energia das ondas através de processos como a rebentação, a turbulência e o transporte de sedimentos.

Na construção da praia de absorção de ondas foi necessário ter em conta o perfil da praia, incluindo a sua inclinação e forma, de modo a favorecer a rebentação das ondas e a dissipação da energia. Um aumento gradual da altura da praia, ou seja, um declive mais suave, estimula a rebentação das ondas e uma maior dissipação de energia, à medida que as ondas avançam pela praia [36].

Posto isto, a estrutura de suporte da praia foi construída a partir de placas *PVC*, cortadas em forma triangular para adquirir o aspeto natural de uma praia, como mostra a Figura 3.15. Posteriormente, esta estrutura de suporte, que fornece estabilidade à praia, foi revestida por uma rede, cuja função é dissipar a energia das ondas. Por fim, no interior da praia foi colocado um tapete rugoso e enchido com pedras.

A praia dissipativa, inserida no canal, tem 58 cm de comprimento e 22 cm de altura na extremidade a jusante, o que resulta num declive igual a $\frac{H}{L} = 38\%$.



Figura 3.15: Praia dissipativa de ondas inserida no canal.

CONTROLO DO MOVIMENTO DO BATEDOR

Neste capítulo, inicialmente, procede-se à caracterização do circuito eletrónico implementado para o controlo do batedor de ondas. Por fim, descreve-se detalhadamente o código gerado no Arduino UNO, que assegura um movimento desejado do motor de passo e o correto funcionamento do circuito.

4.1 Circuito eletrónico

A conceção e implementação do circuito eletrónico, para acionar e controlar o movimento do batedor, requer a compreensão do comportamento dos diferentes componentes utilizados, bem como a forma de estes interagirem em conjunto, de maneira a obter um funcionamento adequado do batedor. Na Figura 4.1 apresenta-se a caixa de controlo do batedor, realizada em impressão 3D e onde contém os diferentes dispositivos utilizados na comunicação com o utilizador que opera o batedor.



Figura 4.1: Caixa de controlo do batedor.

A partir da tampa desta caixa é possível ajustar a altura e a frequência das ondas geradas pelo batedor. Este ajuste é feito a partir de dois potenciômetros, onde o amarelo e o verde representam a altura de onda e a frequência, respetivamente.

Para tornar o controlo autónomo e independente de qualquer dispositivo externo foi implementado um **LCD** integrado na caixa, para visualizar os valores de altura e frequência definidos através dos potenciômetros.

Foi também instalado um botão, de cor verde como ilustrado na Figura 4.1, com as funções de *start/stop* do movimento do batedor.

Na Figura 4.2 apresenta-se o circuito eletrónico construído para o controlo do batedor.

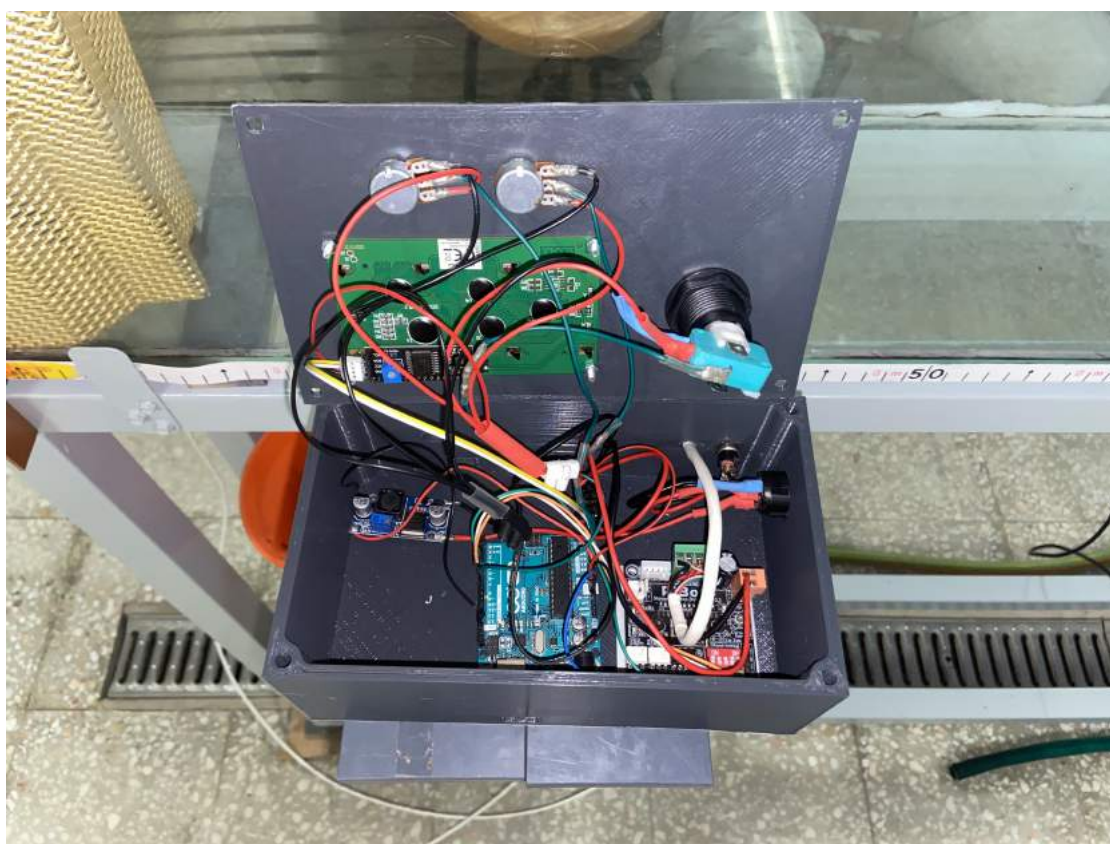


Figura 4.2: Circuito eletrónico implementado para o controlo do batedor.

Para compreender melhor toda a instalação do circuito, foi realizado um diagrama do circuito através do *software Fritzing*. O circuito, ilustrado na Figura 4.3, é composto por um motor de passo, uma placa de Arduino UNO, um controlador de motor, uma bateria para a alimentação do circuito, um conversor de tensão, um interruptor de início de circuito, uma *breadboard*, uma resistência, dois potenciômetros, um *LCD*, um botão de início de ciclo e dois finais de curso.

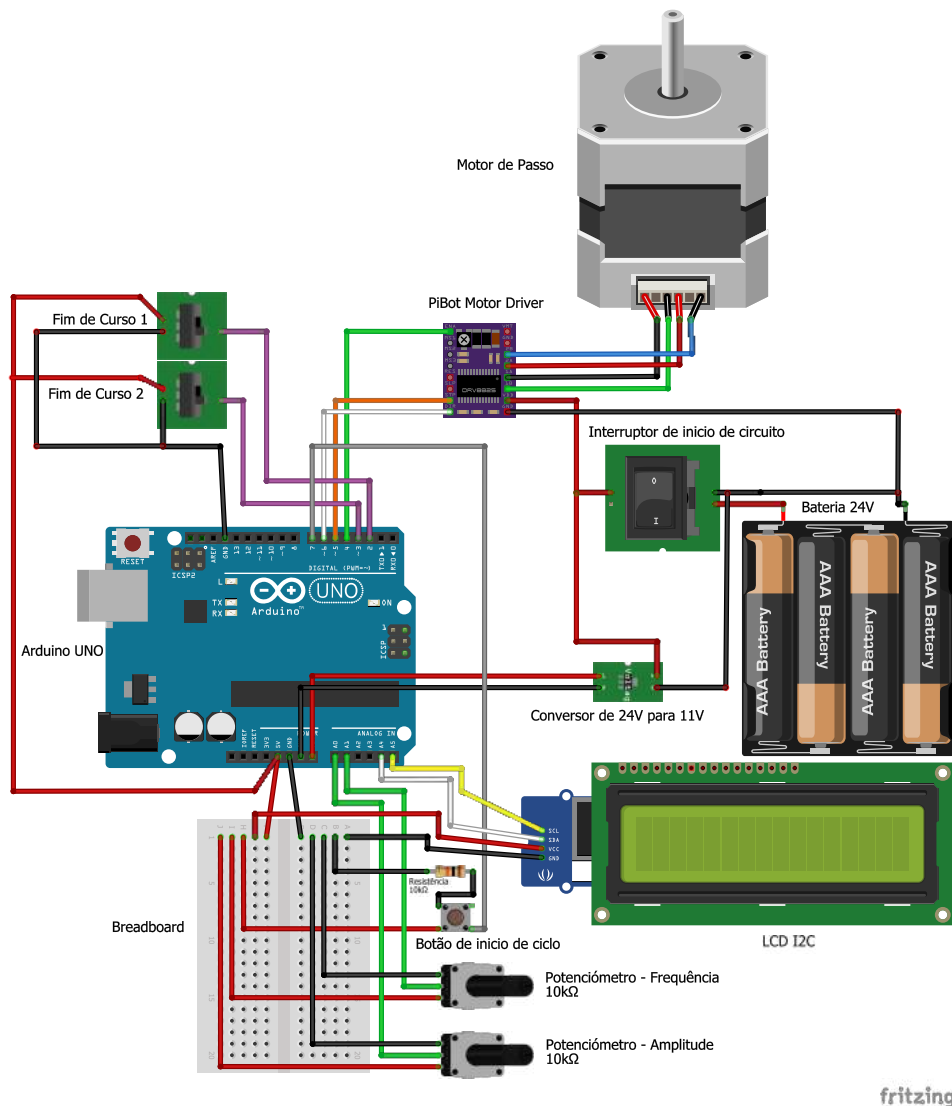


Figura 4.3: Diagrama do circuito eletrônico implementado.

A instalação deste circuito para o controlo do batedor centra-se na utilização de uma placa Arduino UNO para a emissão de sinais de acionamento ao motor.

Uma vez que o motor de passo requer uma corrente mais elevada do que a que os pinos do Arduino têm capacidade de fornecer, foi necessário a utilização de um controlador de motor externo, designado por *motor driver*. Este controlador tem a função de transmitir a informação dada pelo Arduino ao motor de passo, permitindo-lhe fornecer os sinais de alimentação e controlo necessários ao motor. A escolha do *motor driver* respeita várias condições, pois este deve apresentar um intervalo de energia de entrada capaz de aceitar a fonte utilizada no circuito, como também a capacidade de fornecer uma corrente nominal compatível com o motor de passo utilizado. Tendo por base estes fatores, o controlador aplicado no circuito foi o *PiBot Stepper Motor Driver Rev2.2*, atuando como intermediário na passagem de informação entre o Arduino e o motor de passo.

Para as ligações entre estes três componentes, foi necessário conectar as bobinas do motor aos pinos de saída do controlador e por sua vez, ligar os pinos de entrada do controlador aos pinos digitais de saída do Arduino UNO. Os três pinos do Arduino (4, 5 e 6), utilizados na ligação ao controlador, desempenham funções diferentes na transmissão de informação. O pino 4 conectado ao pino *En* do *motor driver* tem o objetivo, quando ativado, permitir a passagem de corrente para o motor de passo, permitindo a existência de binário. O pino 5 ligado ao pino *Dir* permite configurar a rotação do veio do motor em sentido horário (*CW*) ou anti-horário (*CCW*), conforme o estado atual do pino. E por último, o pino 6 ligado ao pino *CLK* do *motor driver* transmite o sinal de executar um passo ao motor sempre que ocorra uma troca de estado do pino de *LOW* para *HIGH*.

A alimentação do circuito eletrónico realizou-se através da utilização de uma fonte de 24 V, compatível com o motor de passo utilizado. Contudo, apesar desta fonte ser indicada na alimentação do motor, a placa de Arduino apenas suporta um intervalo de entrada entre 7 V e 12 V. Posto isto, foi necessário utilizar um regulador de tensão que permitisse a passagem da alimentação do Arduino de 24 V para uma tensão dentro dos limites de referência da placa. O conversor de tensão utilizado foi o *LM2596 Conversor DC-DC Step Down*, tendo sido regulada uma passagem de 24 V para 11 V.

A condição de passagem de corrente ao longo do circuito foi concretizada através do uso de um interruptor *ON/OFF*, representado na Figura 4.4, colocado no início do circuito junto à entrada da fonte de alimentação de 24 V. Este permite controlar o fluxo de corrente elétrica através dos diferentes componentes utilizados no circuito, evitando o desgaste desnecessário dos dispositivos quando não se encontram em utilização.



Figura 4.4: Interruptor *ON/OFF* instalado na caixa de controlo do batedor.

Na tampa da caixa encontram-se os componentes de interação com o operador do batedor, como ilustrado na Figura 4.1.

Os terminais *VCC* e *GND* dos potenciômetros, do *LCD* e do botão foram ligados à porta de 5 V e *GND* do Arduino, respetivamente. Foi utilizado neste diagrama uma *breadboard* para ilustrar melhor estas ligações.

Os dois pinos dos potenciômetros, que permitem definir a altura e frequência de onda

gerada, encontram-se conectados às portas analógicas A0 e A1 do Arduino, respetivamente.

No caso do *LCD 20×4 I2C* utilizado, este possui 20 colunas e 4 linhas de caracteres e permite visualizar os valores escolhidos através dos potenciômetros. Este tipo de *LCD* utiliza o modo de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*) para se conectar ao Arduino. A comunicação I2C é uma forma serial de comunicação que permite a conexão entre dispositivos através de apenas dois fios, um para transmitir dados (*SDA - Serial Data*) e outro para transmitir o sinal de *clock* (*SCL - Serial Clock*). Estes dois fios foram ligados, respetivamente, às portas analógicas A4 e A5 do Arduino.

O botão de início de ciclo, colocado na tampa da caixa, é um botão de uma posição estável, de cor verde e acionado por pressão. Como presente no diagrama, o sinal do botão encontra-se conectado ao pino digital 7 do Arduino. Quanto à resistência utilizada, esta é usada para garantir um estado conhecido quando o botão não se encontra pressionado, impedindo que ocorra uma flutuação de valores entre 0 e 1 no terminal do pino. Esta resistência, designada por resistência *pull-down*, é conectada entre o terminal do botão e o *GND* do Arduino, assegurando que, quando o botão não está pressionado, o terminal encontra-se no estado *LOW*.

Como meio de proteção do mecanismo de geração de ondas, instalou-se dois finais de curso no canal de ondas como representado na Figura 4.5, limitando o curso máximo do batedor em 60 cm. Estes finais de curso encontram-se ligados aos pinos digitais 2 e 3 do Arduino. Existindo uma falha durante o movimento do batedor que provoque um deslocamento imprevisto da placa, esta ao entrar em contacto com os finais de curso, estes emitem sinais de emergência que permitem a paragem e reinício do circuito. Desta forma, garante-se que o módulo de deslocamento da placa não colida contra um dos outros módulos fixos do batedor, colocando em risco a estrutura.

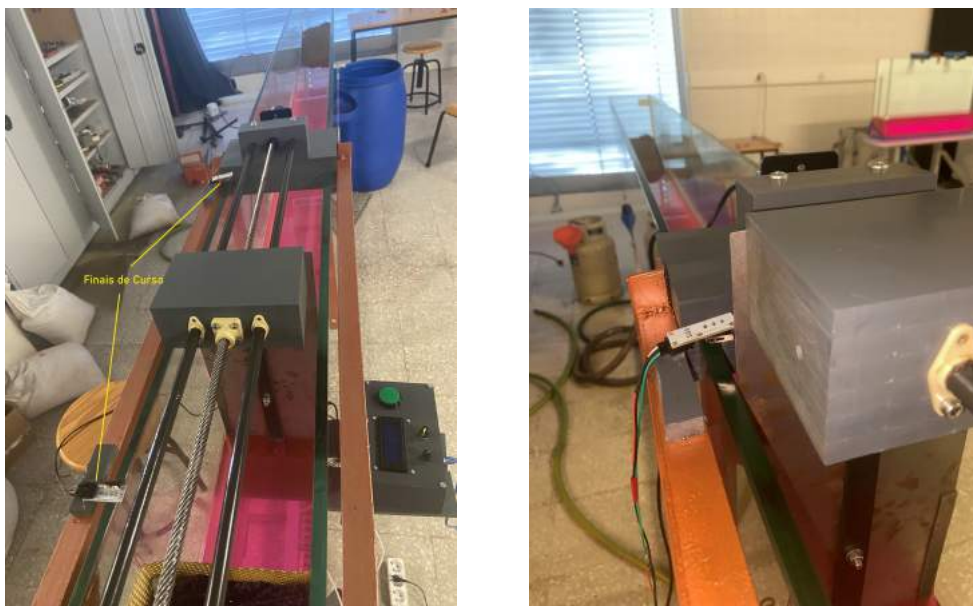


Figura 4.5: Finais de curso instalados no batedor.

4.2 Programação da placa Arduino UNO

O batedor de ondas do tipo pistão caracteriza-se pela geração de movimentos horizontais na produção de ondas. Por isso, é assim fundamental, que o código gerado no Arduino UNO assegure o movimento correto do motor de passo, de modo que a rotação do veio do motor corresponda a este tipo de movimento.

A comunicação entre o Arduino e o motor baseia-se em duas informações essenciais a reter: a velocidade entre *steps* e o número de *steps* do motor.

O código foi desenvolvido no software *Arduino IDE*, este contém uma grande variedade de bibliotecas disponíveis a utilizar para o controlo do movimento deste tipo de motor. Contudo, na geração de movimentos sinusoidais, uma vez que ocorre variação da velocidade ao longo do percurso do batedor, surge uma biblioteca mais adequada para a produção deste tipo de movimento, designada de *FlexyStepper*. Esta biblioteca é otimizada para um controlo flexível deste tipo de motor, no qual a velocidade de rotação e a posição atual conhecida pelo motor de passo podem ser alteradas durante o movimento. Também, esta biblioteca oferece diversas funções que facilitam a programação do código para a obtenção do movimento pretendido.

Para uma melhor explicação do código implementado, este será apresentado em pequenos fragmentos. Também é possível visualizar o código completo no Apêndice A.

Código 4.1: Importação das bibliotecas e criação dos respetivos objetos

```
1 #include <FlexyStepper.h> //Biblioteca de comandos de controlo para o motor
    de passo
2 #include <Wire.h> //Biblioteca para a comunicação I2C do LCD
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h> //Biblioteca de comandos dedicada ao LCD

4 FlexyStepper stepper; //Criar o objeto stepper
5 LiquidCrystal_I2C lcd = LiquidCrystal_I2C(0x27, 20, 4); //Criar o objeto lcd
```

O trecho apresentado no código 4.1 permite importar as bibliotecas necessárias para um bom funcionamento do circuito implementado. Foram adicionadas as bibliotecas *FlexyStepper*, *Wire* e *LiquidCrystal_I2C*.

Foi criado o objeto *stepper*, que será utilizado para chamar as funções pertencentes à biblioteca *FlexyStepper*.

Na programação do LCD, a biblioteca *Wire* permite a comunicação do LCD, via I2C, ao Arduino, enquanto que a biblioteca *LiquidCrystal_I2C* permite a programação do LCD, ou seja, é responsável pela informação mostrada no visor. Analogamente à criação do objeto *stepper*, foi criado o objeto *lcd* na chamada das funções da biblioteca *LiquidCrystal_I2C*.

Código 4.2: Nomeação dos pinos digitais utilizados do Arduino

```
6 //Pinos respetivos aos finais de curso do batedor
7 const int emergencyStopPin1 = 2;
8 const int emergencyStopPin2 = 3;

9 //Pinos do motor de passo
10 const int enPin = 4;
11 const int dirPin = 5;
12 const int stepPin = 6;

13 const int buttonPin = 7;    //Pino do Botão de start/stop
```

Neste trecho de código 4.2 foram atribuídos os nomes dos pinos conectados ao Arduino UNO. Estes referem-se aos finais de curso instalados no batedor, aos pinos respetivos do motor de passo e, por fim, ao pino utilizado para o botão de início de ciclos de movimento.

Código 4.3: Declaração de variáveis do motor de passo

```
14 //Variáveis constantes do motor de passo
15 const float stepAngle = 1.8;    //Ângulo percorrido por cada step em graus
16 const int stepsPerRevolution = 360/stepAngle;    //Número de steps para o motor
    percorrer uma revolução
17 const int PassoFuso = 50;    //Passo do Fuso em mm
18 const int stepsPerMilimeter = stepsPerRevolution/PassoFuso;    //Número de
    steps necessários para o motor percorrer 1mm

19 int PressedButtonStop;

20 //Variáveis constantes conhecidas
21 const float Pi = 3.141592;    //Valor aproximado da constante pi
22 const float g = 9.80665;    //Valor aproximado da aceleração gravítica
```

As variáveis declaradas caracterizam o motor de passo utilizado.

O motor de passo, como já referido anteriormente, caracteriza-se por um deslocamento de 1,8° por passo, necessitando de percorrer 200 passos para completar uma revolução, sendo estes dois parâmetros descritos pelas variáveis *stepAngle* e *stepsPerRevolution*, respetivamente. A variável *PassoFuso* corresponde, como o próprio nome indica, ao passo do fuso empregue no batedor, sendo este de 50 mm. A variável *stepsPerMilimeter* determina o número de passos necessários a percorrer um deslocamento do batedor igual a 1 mm.

Código 4.4: Função *setup* executada apenas uma vez no início do programa.

```
23 void setup() {

24    //Iniciação do LCD
```

```
25  lcd.init();
26  lcd.backlight();

27  //Estabelecer a comunicação entre os pinos nomeados e o Arduino
28  pinMode(emergencyStopPin1, INPUT);
29  pinMode(emergencyStopPin2, INPUT);
30  pinMode(buttonPin, INPUT);
31  pinMode(enPin, OUTPUT);
32  stepper.connectToPins(stepPin, dirPin);

33  digitalWrite(enPin, LOW); //Impedir passagem de corrente no motor
34  stepper.setStepsPerMillimeter(stepsPerRevolution/PassoFuso); //Transmitir o
    número de passos para o motor percorrer 1 mm
35  stepper.setSpeedInStepsPerSecond(0); //Velocidade nula no motor

36  Serial.begin(115200); //Iniciação da comunicação Serial
37  Serial.println("Program Started");

38  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(emergencyStopPin1), EmergencyFunction,
    CHANGE); //Interrupt do emergencyStopPin1
39  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(emergencyStopPin2), EmergencyFunction,
    CHANGE); //Interrupt do emergencyStopPin2

40  delay(200);
41 }
```

Neste trecho de código 4.4 é exposto o código implementado na função *setup*. Esta função é a primeira a ser executada no arranque do programa e apenas uma única vez.

Nas primeiras linhas de código, o *lcd* é iniciado e a retroiluminação do *lcd* ligada.

Posteriormente, é realizada a comunicação entre os componentes de interação com o utilizador e o Arduino, sendo definidos os pinos digitais utilizados no Arduino como terminais de entrada ou saída de dados, *input* ou *output*, respetivamente.

Na 33ª linha de código é impedida a passagem de corrente ao motor. Isto deve-se ao facto, de o motor de passo não se encontrar em funcionamento nesta primeira fase do código, evitando assim o seu sobreaquecimento.

Nas duas linhas seguintes é dado a conhecer ao objeto *stepper* o número de passos que necessita de executar para percorrer 1 mm e é transmitido ao motor uma velocidade nula.

Seguidamente é iniciada a comunicação *Serial*, com um *baud rate* de 115200 bits por segundo. Esta função permite a escrita no *Serial Monitor* do *Arduino IDE*.

Relativamente aos finais de curso, é fundamental que estes dispositivos tenham a possibilidade de interromper a execução normal do programa, se emitido algum sinal de emergência. Posto isto, recorreu-se à função *attachinterrupt* para a leitura dos pinos de emergência, permitindo, desta forma, ao processador executar as suas tarefas principais sem precisar de verificar constantemente se alguma ação é necessária, o que torna o programa mais eficiente e flexível. O *interrupt* tem a particularidade de apenas ter efeito com os pinos digitais 2 e 3 do Arduino UNO, tendo sido esta a razão de se ter conectado os

emergencyStopPin 1 e 2 a estes terminais. Esta função de interrupção, quando ativa devido a uma alteração do estado pino, chama a função *EmergencyFunction* para executar uma rotina específica, exibida no código seguinte.

Código 4.5: Função de emergência para os finais de curso instalados no batedor.

```
42 void(* resetFunc) (void) = 0; //Reset do Arduino

43 void EmergencyFunction() { //Função de emergência

44     stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(0); //Velocidade nula no motor
45     resetFunc(); //Chama a função de Reset ao Arduino
46 }
```

A função de emergência (código 4.5) permite parar instantaneamente o motor com a função *stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(0)* e proceder ao *RESET* do Arduino, ao chamar a função *resetFunc()*. Quando chamada esta função, é necessário voltar a colocar o batedor na sua posição de início de movimento.

Código 4.6: Função principal do programa, *loop*, a correr repetidamente.

```
47 void loop() {

48     float Stroke; //Curso do batedor
49     float Frequency; //Frequência de onda gerada
50     float H; //Altura de onda
51     float Period; //Período de onda

52     ReadPotentiometers(&H, &Frequency); //Leitura dos potenciómetros
53     WaveVariables(H, Frequency, &Stroke, &Period); //Obtenção das variáveis
        relativas às ondas a ser geradas
54     buttonStartStop(Stroke, Frequency); //Leitura do botão de início de ciclo
55 }
```

A função *loop*, como o próprio nome indica, irá correr as instruções iterativamente. Esta função tem um carácter de "distribuição", uma vez que o seu papel é apenas chamar outras funções, por uma determinada ordem, para o desempenho de diferentes tarefas.

Nas primeiras linhas de código foram declaradas as principais variáveis relativas às ondas que se pretende gerar.

Seguidamente, foram chamadas diversas funções, onde o conteúdo será exposto e clarificado nos blocos de código respetivos às funções chamadas.

Código 4.7: Função de leitura dos potenciómetros.

```
56 void ReadPotentiometers(float* H, float* Frequency) {
```

```
57 int val1 = analogRead(A0); //Leitura do potenciômetro para a Altura de Onda
58 int Altura = map(val1,0,1023,1,100); //Altura em mm

59 int val2 = analogRead(A1); //Leitura do potenciômetro para a Frequência
60 int f = map(val2,0,1023,500,2000); //Frequência em mHz

61 *H = Altura/1000.0; //Conversão da altura em m
62 *Frequency = f/1000.0; //Conversão da frequência em Hz

63 return;
64 }
```

Nesta função procedeu-se à leitura dos dois potenciômetros implementados na tampa da caixa. A leitura das portas analógicas do Arduino, onde se encontram conectados os potenciômetros, permite ao utilizador definir tanto a altura de onda, como a frequência da onda a gerar.

Consecutivamente, os valores definidos para a altura e frequência são guardados, em unidades *SI*, nas variáveis *H* e *Frequency*, respetivamente. Estas variáveis são devolvidas à função *loop* em forma de "apontadores". Optou-se por utilizar apontadores para o *return* das variáveis das funções, pois na linguagem Arduino uma função apenas tem capacidade de devolver uma única variável.

Código 4.8: Função para obter as variáveis de modelação das ondas.

```
65 void WaveVariables(float H, float Frequency, float* Stroke, float* Period) {

66     const float d = 13/100.0; //Profundidade de água no canal de 13 cm
67     *Period = 1/Frequency; //Período de onda (s)
68     float w = 2*Pi/(*Period); //Frequência angular da onda (rad/s)
69     float k = sqrt(pow(w,2)/(g*d)); //Número de onda (rad/m)
70     float L = g*(*Period)/w*tanh(k*d); //Comprimento de onda (m)
71     float A = H/2; //Amplitude de onda (m)
72     *Stroke = H/((2*(cosh(2*k*d)-1))/(sinh(2*k*d)+(2*k*d))); //Curso do batedor
        (m)
73     lcdDisplay(*Stroke,Frequency,H,*Period); //Chama a função de escrita no LCD
74     return;
75 }
```

A segunda função a ser chamada pela função *loop* é a função *WaveVariables*. Esta função permite obter as restantes variáveis necessárias à modelação das ondas, tendo sido utilizado as equações apresentadas no subcapítulo 2.1.3, onde foi aplicada a relação de dispersão simplificada para ondas de baixa profundidade $\omega^2 = gk^2d$.

A coluna de água definida no canal é igual a 13 cm, sendo este valor guardado na variável *d*.

Para conhecer o curso do batedor, consoante a altura e frequência de onda definida, foi utilizada a Equação (2.18).

No fim desta função, antes de devolver as variáveis calculadas à função *loop*, foi chamada a função *lcdDisplay*, que permite a escrita no LCD.

Código 4.9: Função para visualizar os parâmetros definidos no *LCD*.

```
76 void lcdDisplay(float Stroke, float Frequency, float H, float Period) {  
  
77   lcd.setCursor(0, 0);  
78   lcd.print("Altura: ");  
79   lcd.print(H*1000);  
80   lcd.print(" mm ");  
81   lcd.setCursor(0, 1);  
82   lcd.print("Frequencia: ");  
83   lcd.print(Frequency);  
84   lcd.print(" Hz");  
85   lcd.setCursor(0, 2);  
86   lcd.print("Periodo: ");  
87   lcd.print(Period);  
88   lcd.print(" s ");  
89   lcd.setCursor(0, 3);  
90   lcd.print("Curso: ");  
91   lcd.print(Stroke*1000);  
92   lcd.print(" mm ");  
93 }
```

Esta função (código 4.9) visa configurar o *LCD* para exibir os parâmetros escolhidos, permitindo que o utilizador visualize, em tempo real, os valores definidos nos potenciômetros.

Código 4.10: Função para leitura do botão e início de ciclo de movimentos.

```
94 void buttonStartStop(float Stroke, float Frequency) {  
  
95   //Variáveis relativas ao estado do buttonPin  
96   int CurrentbuttonState;  
97   PressedButtonStop = LOW;  
  
98   CurrentbuttonState = digitalRead(buttonPin); //Estado atual do Botão  
99   if (CurrentbuttonState == HIGH){  
100    while(CurrentbuttonState == HIGH){ //Verifica se o botão ainda se  
        encontra pressionado  
101      CurrentbuttonState = digitalRead(buttonPin);  
102    }  
103    digitalWrite(enPin, HIGH); //Permite a passagem de corrente para o motor  
104    while(PressedButtonStop == LOW) { //Verifica se o botão foi de novo  
        pressionado  
105      motorStep(Frequency, Stroke); //Chama a função motorStep para acionar  
        o motor de passo  
106    }
```

```
107 }
108 digitalWrite(enPin, LOW); //Impede a passagem de corrente para o motor
109 delay(50);
110 }
```

A última função (código 4.10), chamada pela função *loop*, é responsável pela leitura do botão para dar início ao movimento do batedor. Esta função começa com a leitura do pino, *buttonPin*, onde se encontra ligado o botão. A variável *CurrentbuttonState* armazena o estado do *buttonPin* e no instante em que o estado desta variável for igual a *HIGH*, o programa entra no ciclo *while*, como demonstrado na linha 100. Este ciclo *while* tem o objetivo de aguardar que o botão deixe de ser pressionado pelo utilizador, ou seja, aguarda até a variável *CurrentbuttonState* alterar o seu estado para *LOW*.

Uma vez terminado este ciclo *while*, é permitida a passagem de corrente ao motor de passo, alterando o estado do *enPin* para *HIGH*.

Continuamente, o programa entra num novo ciclo *while*, devido à variável *Pressed-ButtonStop* ter sido definida anteriormente como *LOW*. De seguida é chamada a função *motorStep* que controla a rotação do motor. Os ciclos de movimento do batedor irão repetir-se até ser pressionado novamente o botão, alterando o estado da variável *Pressed-ButtonStop* para *HIGH*. O código que possibilita esta alteração de estado encontra-se na função *motorStep*, apresentado posteriormente.

Terminado o movimento do batedor, após o utilizador ter pressionado o botão, é impedida novamente a passagem de corrente para o motor, com a alteração do estado do *enPin* para *LOW*. O programa volta à função *loop* e uma vez que não existe mais funções a chamar, o programa é reencaminhado para o início do *loop*, começando a correr todo o código novamente.

Código 4.11: Função de controlo da rotação do motor de passo.

```
111 void motorStep(float f, float S){ //Código para controlo do motor de passo

112     int CurrentbuttonState; //Estado do botão
113     int Avan_Recuo = 0; //Variável para percorrer um ciclo completo (ida/volta)

114     S = S*1000.0; //Curso do batedor em milímetros
115     int StepMax = stepsPerMilimeter*S/2; //Número de steps que o batedor
        percorre até atingir S/2

116     const int intervSteps = 1; //Taxa de atualização da velocidade do motor, em
        steps
117     float intervMilim = (float) intervSteps/stepsPerMilimeter; //Taxa de
        atualização da velocidade do motor, em mm
118     int n_intervalos = 2; //Contagem do Número de Atualizações

119     stepper.setCurrentPositionInMillimeters(-S/2); //Posição inicial do motor
```

```

120 while (Avan_Recuo < 2) { //Condição para completar os 2 ciclos

121     if(Avan_Recuo == 0) { //Ciclo de avanço
122         stepper.setTargetPositionInMillimeters(S/2); //Posição S/2 a alcançar
123     }
124     else { //Ciclo de recuo
125         stepper.setTargetPositionInMillimeters(-S/2); //Posição -S/2 a alcançar
126     }

127     InitialSpeedCalculation(f, S, intervMilim); //Cálculo da velocidade e
    aceleração inicial do motor

128     while(!stepper.motionComplete()) { //Condição de movimento completado
129         stepper.processMovement(); //Movimento do motor

130         CurrentbuttonState = digitalRead(buttonPin); //Estado do buttonPin
131         if(CurrentbuttonState == HIGH){
132             PressedButtonStop = HIGH;
133         }

134         if(Avan_Recuo == 0) { //Ciclo de avanço
135             if(stepper.getCurrentPositionInSteps() == -StepMax + intervSteps*
n_intervalos) {
136                 CurrentSpeedCalculation(f, S, intervMilim, n_intervalos); //Cá
    lculo da velocidade e aceleração neste intervalo
137                 n_intervalos += 1;
138             }
139         }
140         else { //Ciclo de recuo
141             if(stepper.getCurrentPositionInSteps() == StepMax - intervSteps*
n_intervalos) {
142                 CurrentSpeedCalculation(f, S, intervMilim, n_intervalos); //Cá
    lculo da velocidade e aceleração neste intervalo
143                 n_intervalos += 1;
144             }
145         }
146     }
147     Avan_Recuo += 1; //Ciclo completado
148     stepper.setSpeedInStepsPerSecond(0); //Velocidade nula no motor
149     n_intervalos = 2;
150 }
151 }

```

No código 4.11, a função *motorStep* é responsável pelo movimento sinusoidal da placa do batedor. Na produção deste tipo de movimento foi utilizada a Equação (2.17) para definir o deslocamento do batedor, com $\delta = -\frac{\pi}{2}$. Para uma melhor compreensão deste tipo de movimento, é apresentado na Figura 4.6 o perfil de deslocamento do batedor em ordem ao tempo, para um curso do batedor $S = 0,2$ m e um período de onda $T = 1$ s.

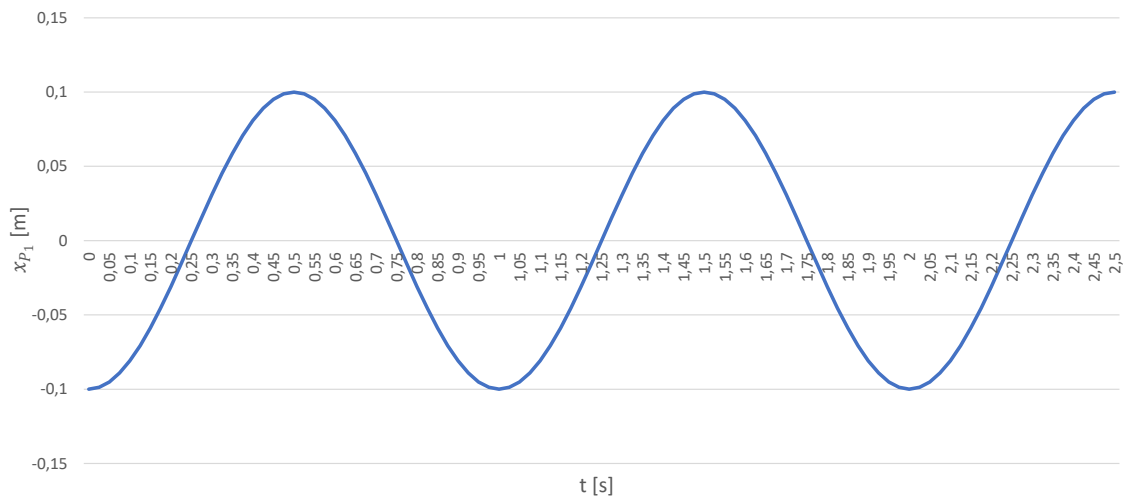


Figura 4.6: Perfil de deslocamento do batedor em ordem ao tempo.

Retomando ao código implementado, no início da função procedeu-se à declaração das variáveis que irão ser utilizadas. Algumas destas carecem de especial atenção e serão explicadas ao longo do programa.

Após a declaração das variáveis é chamada a função *stepper.setCurrentPositionInMillimeters* na linha 119, definindo a posição atual do motor em $-\frac{S}{2}$.

Consecutivamente, se a condição da linha 120 for verdadeira, ou seja, ainda não foram completados os movimentos de avanço e recuo do batedor, o programa entra no ciclo *while*. Nas linhas 122 e 125, conforme o movimento que o batedor irá realizar, avanço ou recuo, é transmitido ao objeto *stepper* a posição final a atingir.

Antes de dar início ao movimento do motor é necessário o cálculo inicial da velocidade e aceleração, deste modo, é chamada a função da linha 127. O conteúdo desta função encontra-se no código 4.12. Estes dois parâmetros iniciais são calculados segundo a taxa de atualização definida no início do código. Esta taxa representa o intervalo de *steps* em que ocorrerá uma atualização da velocidade e aceleração do motor de passo. O intervalo de *steps* é representado pela variável *intervSteps*, sendo posteriormente convertido em milímetros e o valor guardado na variável *intervMilim*.

Calculado e definido a velocidade e aceleração iniciais ao objeto *stepper*, é dada a ordem para o começo do movimento do batedor de ondas através da função *stepper.processMovement*. O término do movimento do batedor ocorre quando este conclui o percurso definido anteriormente, dado pela função *stepper.setTargetPositionInMillimeters*, ou até ser pressionado o botão. Na linha 130 é feita a verificação do estado do botão, para se conhecer se este foi pressionado de forma a parar a rotação do veio do motor. Esta paragem, ativada pelo botão, é apenas efetuada no fim do motor ter completado os dois ciclos, avanço e recuo.

Durante o movimento do batedor consoante o ciclo de avanço ou recuo, a atualização da velocidade e aceleração do motor apenas é realizada com uma condição verdadeira

das condições impostas nas linhas 135 e 141, respetivamente. Estas condições têm a responsabilidade de atualizar a velocidade e aceleração no preciso momento em que o motor de passo, relativamente à sua última posição, percorre o número de *steps* definido na variável *intervSteps*. O cálculo da velocidade e aceleração são realizados no código 4.12.

Terminado o ciclo de movimento, a velocidade do motor é definida para zero e é incrementada a variável *Avan_Recuo*, para se proceder ao movimento de recuo ou saída do programa do ciclo *while* (*Avan_Recuo* < 2), devolvendo o programa à linha 105 da função *buttonStartStop*.

Código 4.12: Funções de cálculo para a velocidade e aceleração do motor.

```

152 float InitialSpeedCalculation(float f, float S, float intervMilim){

153     float t; //Tempo respetivo ao intervalo inicial
154     float speed; //Velocidade do motor
155     float acceleration; //Aceleração do motor

156     t = abs((asin((-S/2) + intervMilim)*2/S)+(Pi/2))/(2*Pi*f));
157     speed = abs(S/2*cos((2*Pi*f*t)-(Pi/2))*(2*Pi*f));
158     acceleration = abs(-(S/2)*pow((2*Pi*f),2)*sin(2*Pi*f*t-Pi/2));
159     stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(speed);
160     stepper.setAccelerationInMillimetersPerSecondPerSecond(acceleration);
161 }

162 float CurrentSpeedCalculation(float f, float S, float intervMilim, int
    n_intervalos) {

163     float t; //Tempo respetivo ao intervalo atual
164     float speed; //Velocidade do motor
165     float acceleration; //Aceleração do motor

166     t = abs((asin((-S/2+intervMilim*n_intervalos)*2/S)+(Pi/2))/(2*Pi*f));
167     speed = abs(S/2*cos((2*Pi*f*t)-(Pi/2))*(2*Pi*f));
168     acceleration = abs(-(S/2)*pow((2*Pi*f),2)*sin(2*Pi*f*t-Pi/2));
169     stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(speed);
170     stepper.setAccelerationInMillimetersPerSecondPerSecond(acceleration);
171 }

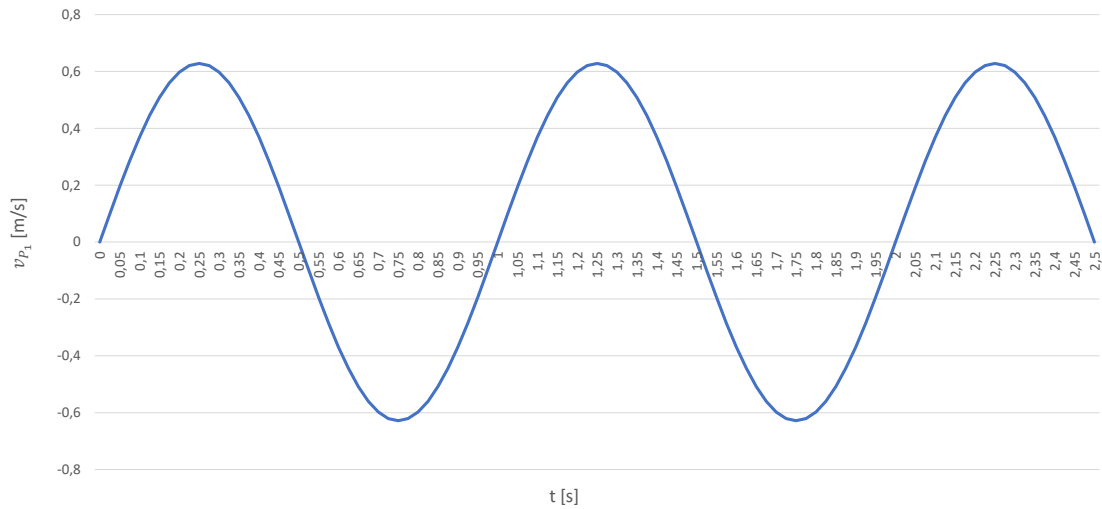
```

As duas funções apresentadas no código 4.12 servem para o cálculo da velocidade e aceleração, segundo o intervalo que o motor se encontra naquele instante. No primeiro intervalo de cada ciclo é utilizada a função *InitialSpeedCalculation*, enquanto que para os restantes é utilizada a função *CurrentSpeedCalculation*.

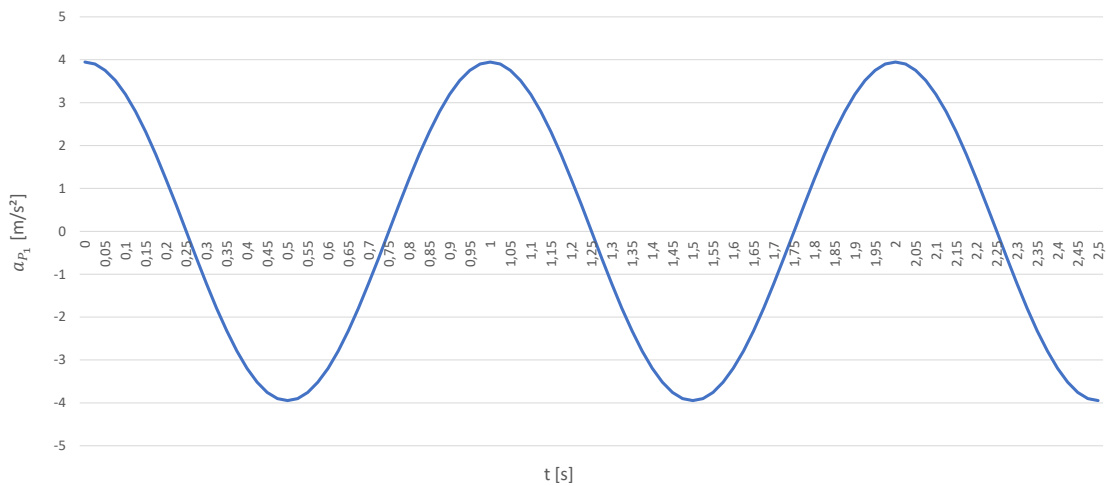
Este cálculo é iniciado através da função de deslocamento sinusoidal do batedor representado na Figura 4.6. Esta função é transformada para o instante de tempo em que o batedor se encontra em ordem à posição *x*, que é convertida para o número de *steps* que o motor percorreu até ao momento.

Obtido o tempo correspondente ao intervalo que o motor se encontra, é realizada a derivação da Equação (2.17) para conhecer as equações sinusoidais de 1ª ordem da velocidade e aceleração do batedor. A função de velocidade do batedor, $v_{p_1}(t)$, obtida é: $v_{p_1}(t) = \frac{S}{2} \times \omega \times \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$. Derivando uma vez mais, obtém-se a função de aceleração do batedor: $a_{p_1}(t) = -\frac{S}{2} \times \omega^2 \times \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$.

Na Figura 4.7 apresenta-se a velocidade e aceleração do batedor, com os mesmos parâmetros iniciais definidos na Figura 4.6, $S = 0,2$ m e $T = 1$ s.



(a)



(b)

Figura 4.7: Perfil de velocidade (Figura 4.7(a)) e aceleração (Figura 4.7(b)) de 1ª ordem do batedor em ordem ao tempo.

VERIFICAÇÃO DO MECANISMO DE GERAÇÃO

Neste capítulo são realizados vários ensaios para validar o mecanismo de geração de ondas construído. Esta validação permite verificar se as ondas geradas pelo batedor correspondem ao perfil ondulatório determinado teoricamente. Após a realização dos testes experimentais ao movimento do batedor, no final do capítulo são comparados e discutidos os resultados obtidos para diferentes valores de altura e período de onda.

5.1 Ensaios Experimentais

O domínio de trabalho encontra-se limitado entre duas fitas métricas verticais implementadas no canal de ondas, como mostra a Figura 5.1. Estas duas fitas métricas permitem medir a elevação da superfície livre da água.

A primeira fita, colocada imediatamente a seguir ao batedor, é denominada ao longo do trabalho como *fita 1*. Esta fita permite medir a elevação numa zona distante à extremidade final do canal, assegurando que não ocorre um amortecimento das ondas geradas pela praia dissipativa, como também não são perturbadas mediante pequenas ondas refletidas que possam existir junto à fase final do canal.

Para o caso da segunda fita métrica, *fita 2*, uma vez que se encontra muito próxima da praia dissipativa, esta possibilita retirar um coeficiente de amortecimento na comparação entre os valores experimentais e analíticos, devido à dissipação de energia das ondas por parte da praia.

Por fim, a fita métrica horizontal permite medir o comprimento de onda.

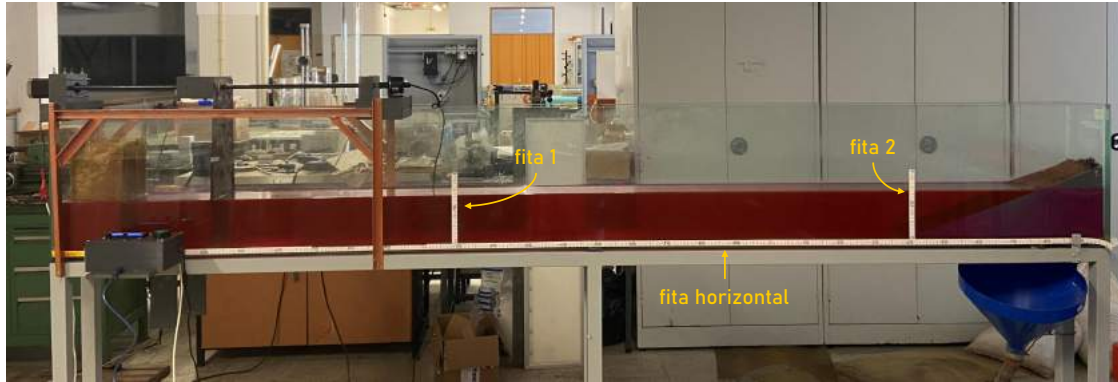


Figura 5.1: Domínio de aplicação dos ensaios experimentais no canal de ondas.

Outros fatores a mencionar, antes da realização dos testes experimentais, é o facto de a placa do batedor iniciar sempre o seu movimento na marca dos 60 cm da fita horizontal. As fitas verticais encontram-se a uma distância de 50 cm e 180 cm dessa posição inicial da placa, respetivamente. Deste modo, através da Teoria de Galvin [24] demonstrada esquematicamente na Figura 2.11, determina-se, para cada ensaio, as posições das fitas 1 e 2 colocadas no canal. Estas são dadas da seguinte forma, $x_1 = 0,5 - (S/2)$ e $x_2 = 1,8 - (S/2)$, respetivamente.

De modo a obter uma visualização mais clara, que facilite a retirada de dados através das fitas utilizadas, foi empregue no canal o corante líquido *Rhodamine B*, concedendo o aspeto avermelhado à água.

Os ensaios experimentais foram realizados para uma profundidade de água no canal igual a 13 cm e diferentes alturas e períodos de onda. Definidos estes três parâmetros, foram calculados, para cada ensaio, a frequência de onda (f), frequência angular (ω), número de onda (k), comprimento de onda (L) e curso do batedor (S). Na Tabela 5.1 encontram-se resumidas as condições definidas para cada teste.

Tabela 5.1: Parâmetros calculados para cada ensaio.

Ensaio	d [m]	H [m]	T [s]	f [Hz]	ω [rad/s]	k [rad/m]	L [m]	S [m]
1		0,01						0,006
2	0,13	0,02	0,50	2,00	12,57	16,54	0,38	0,012
3		0,03						0,017
4		0,01						0,009
5	0,13	0,02	0,75	1,33	8,38	8,78	0,72	0,018
6		0,03						0,027
7		0,01						0,013
8	0,13	0,02	1,00	1,00	6,28	6,10	1,03	0,025
9		0,03						0,038

Como referido na programação do código do motor de passo, foi realizada uma implementação linear na geração de ondas. No entanto, na Tabela 5.2 é apresentado o tipo

de onda teórico correspondente às características das ondas produzidas para cada ensaio, de acordo com a Figura 2.7.

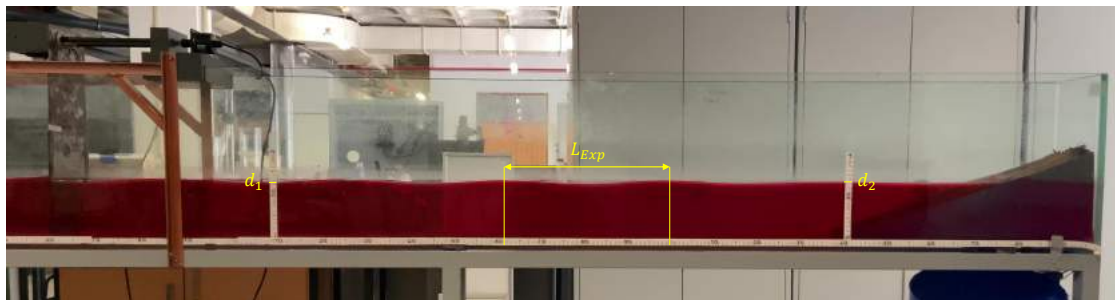
Tabela 5.2: Tipo de onda respetivo a cada ensaio experimental.

Ensaio	d [m]	H [m]	T [s]	$\frac{H}{gT^2}$	$\frac{d}{gT^2}$	Tipo de Onda
1	0,13	0,01	0,50	0,0041	0,053	Stokes 2 ^a ordem
2		0,02		0,0082		Stokes 3 ^a ordem
3		0,03		0,0122		Stokes 3 ^a ordem
4	0,13	0,01	0,75	0,0018	0,024	Stokes 2 ^a ordem
5		0,02		0,0036		Stokes 2 ^a ordem
6		0,03		0,0054		Stokes 3 ^a ordem
7	0,13	0,01	1,00	0,0010	0,013	Stokes 2 ^a ordem
8		0,02		0,0020		Stokes 2 ^a ordem
9		0,03		0,0031		Stokes 3 ^a ordem

A análise das ondas geradas pelo batedor foi feita a partir de vídeo. Foi cortada uma fotografia para posterior medição dos valores da profundidade de água através das fitas métricas. Consoante o número de ensaio, a fotografia retirada corresponde a um determinado instante de tempo, relativamente ao início do movimento do batedor em vídeo. Este instante torna-se fundamental conhecer, uma vez que é necessário para determinar analiticamente a elevação da superfície livre da água, permitindo comparar os dados teóricos obtidos com os retirados experimentalmente.

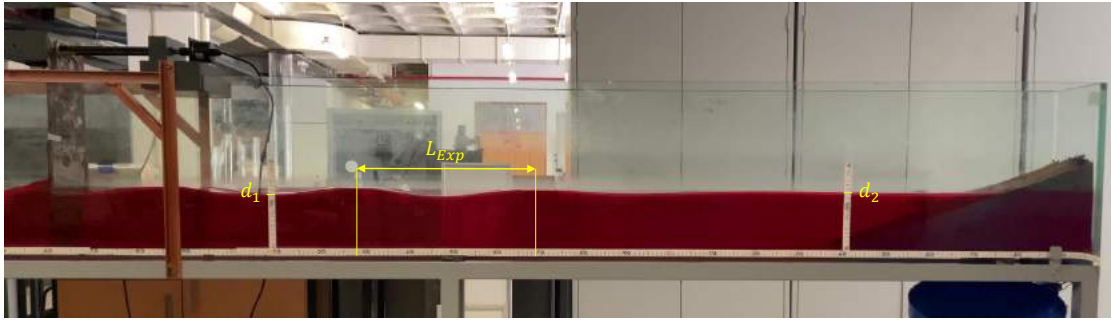
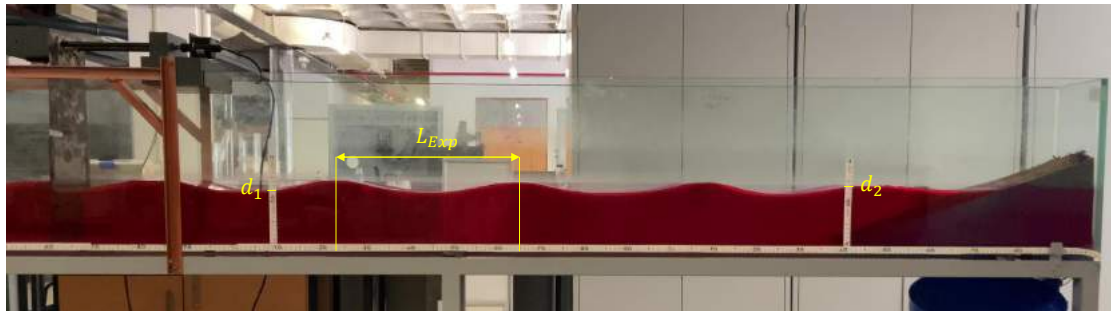
5.1.1 Ensaios 1, 2 e 3

No ensaio 1, a fotografia escolhida, representada na Figura 5.2(a), corresponde ao instante $t = 4$ s, desde o início do movimento do batedor. Para o caso dos ensaios 2 e 3, as fotografias correspondem ao instante $t = 3$ s, representados nas Figuras 5.2(b) e 5.2(c), respetivamente. A escolha destes instantes deve-se ao facto, de a primeira onda gerada para cada ensaio ter já percorrido as posições das duas fitas, sem que ocorresse reflexão da onda na extremidade final do canal.



(a) Ensaio 1 - $H = 0,01$ m.

Figura 5.2: Ensaios experimentais realizados para $T = 0,5$ s.

(b) Ensaio 2 - $H = 0,02$ m.(c) Ensaio 3 - $H = 0,03$ m.Figura 5.2: Ensaios experimentais realizados para $T = 0,5$ s (cont.).

A partir das fotografias da Figura 5.2 retira-se o comprimento de onda, L_{Exp} e a profundidade de água no canal para a posição da fita mais próxima e mais distante do batedor, d_1 e d_2 , respetivamente. O cálculo das elevações experimentais obtêm-se através da equação $\eta = d_{Medido} - d$, com $d = 0,13$ m.

A Tabela 5.3 apresenta uma síntese dos parâmetros obtidos experimentalmente para os instantes dos ensaios representados na Figura 5.2.

Tabela 5.3: Parâmetros experimentais dos Ensaios 1, 2 e 3.

Ensaio	d_1 [m]	d_2 [m]	$\eta_{1_{Exp}}$ [m]	$\eta_{2_{Exp}}$ [m]	L_{Exp} [m]
1	0,124	0,132	-0,006	0,002	0,39
2	0,120	0,133	-0,010	0,003	0,41
3	0,119	0,138	-0,011	0,008	0,42

O cálculo das elevações da superfície livre da água realizaram-se através da Equação (2.16). As funções de elevação, respetivas a cada ensaio, encontram-se representadas na Figura 5.3, onde se obtêm η_1 e η_2 , relativas às posições das fitas x_1 e x_2 calculadas. O comprimento de onda encontra-se também nas figuras apresentadas, apesar de já ter sido determinado na Tabela 5.1.

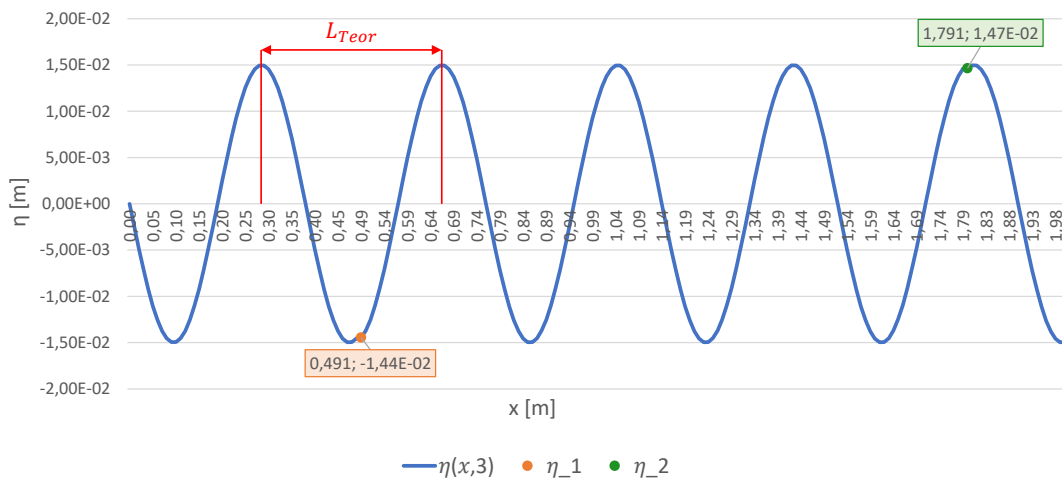
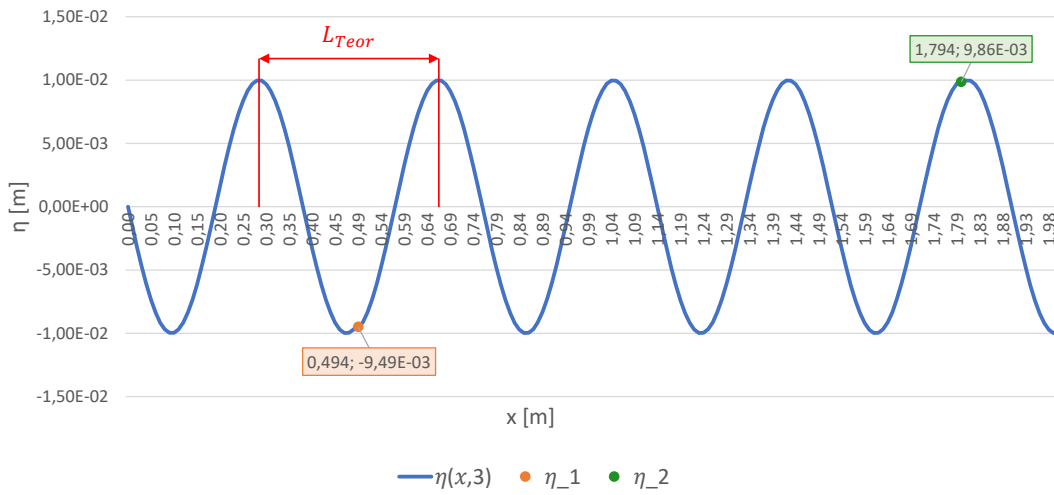
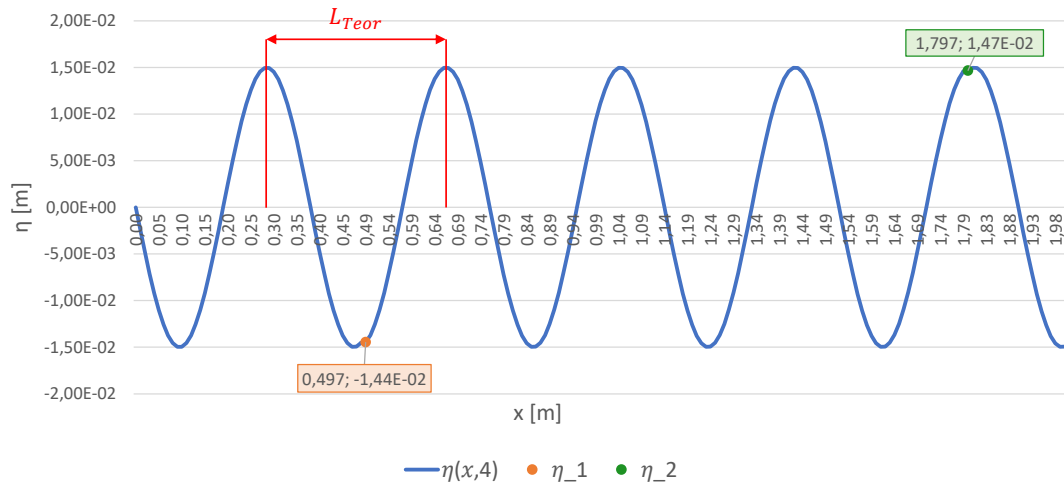


Figura 5.3: Funções de elevação da superfície livre para $T = 0,5$ s.

Na Tabela 5.4 resumem-se estes parâmetros obtidos a partir das soluções analíticas anteriores.

Tabela 5.4: Parâmetros teóricos dos Ensaios 1, 2 e 3.

Ensaio	x_1 [m]	x_2 [m]	η_{1Teor} [m]	η_{2Teor} [m]	L_{Teor} [m]
1	0,497	1,797	-0,0047	0,0050	0,38
2	0,494	1,794	-0,0095	0,0099	0,38
3	0,491	1,791	-0,0144	0,0147	0,38

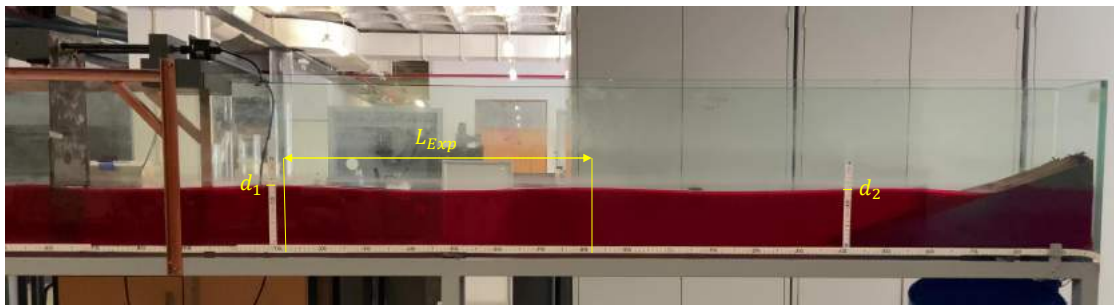
Determinados os parâmetros de comparação entre a parte experimental e teórica, estes encontram-se apresentados na Tabela 5.5. Posteriormente, na secção 5.2 foram determinados os erros relativos, para cada ensaio, para o comprimento de onda e para a elevação da superfície livre de acordo com as posições das fitas 1 e 2.

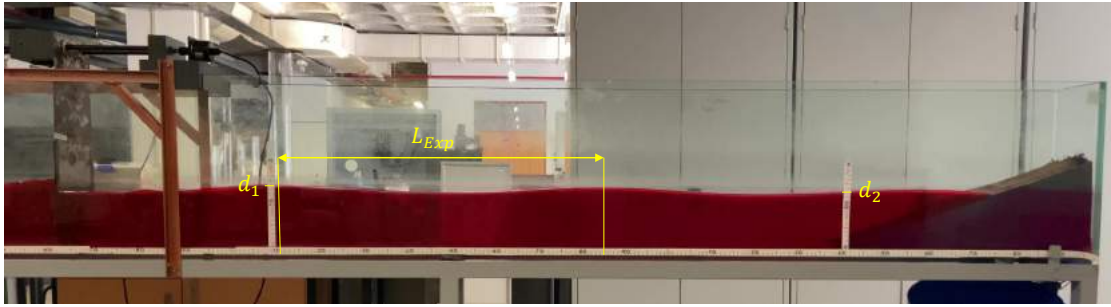
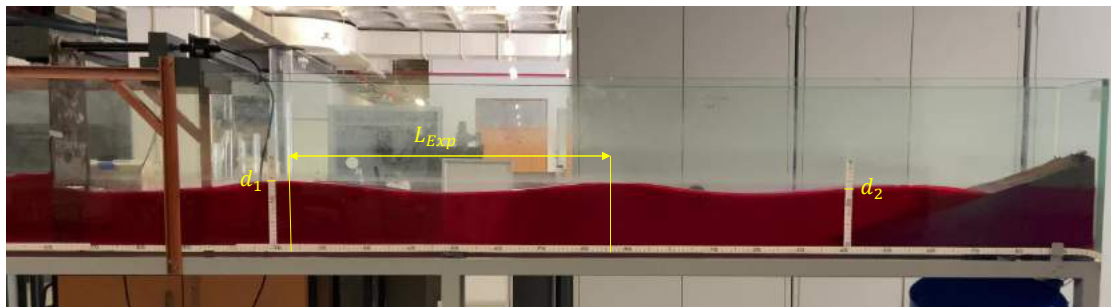
Tabela 5.5: Parâmetros experimentais e teóricos dos Ensaios 1, 2 e 3.

Ensaio	H [m]	T [s]	η_{1Exp} [m]	η_{2Exp} [m]	η_{1Teor} [m]	η_{2Teor} [m]	L_{Exp} [m]	L_{Teor} [m]
1	0,01	0,50	-0,006	0,002	-0,0047	0,0050	0,39	0,38
2	0,02	0,50	-0,010	0,003	-0,0095	0,0099	0,41	0,38
3	0,03	0,50	-0,011	0,008	-0,0144	0,0147	0,42	0,38

5.1.2 Ensaios 4, 5 e 6

Analogamente aos ensaios anteriores, nos restantes ensaios é utilizado o mesmo método para determinar os parâmetros experimentais e teóricos. Para este grupo de ensaios, o período de onda definido inicialmente, foi alterado para 0,75 s. A altura de onda retoma a mesma sequência de valores utilizados nos ensaios anteriores. As fotografias dos testes experimentais, representadas na Figura 5.4, correspondem ao instante $t = 3$ s.

(a) Ensaio 4 - $H = 0,01$ m.Figura 5.4: Ensaios experimentais realizados para $T = 0,75$ s.

(b) Ensaio 5 - $H = 0,02$ m.(c) Ensaio 6 - $H = 0,03$ m.Figura 5.4: Ensaios experimentais realizados para $T = 0,75$ s (cont.).

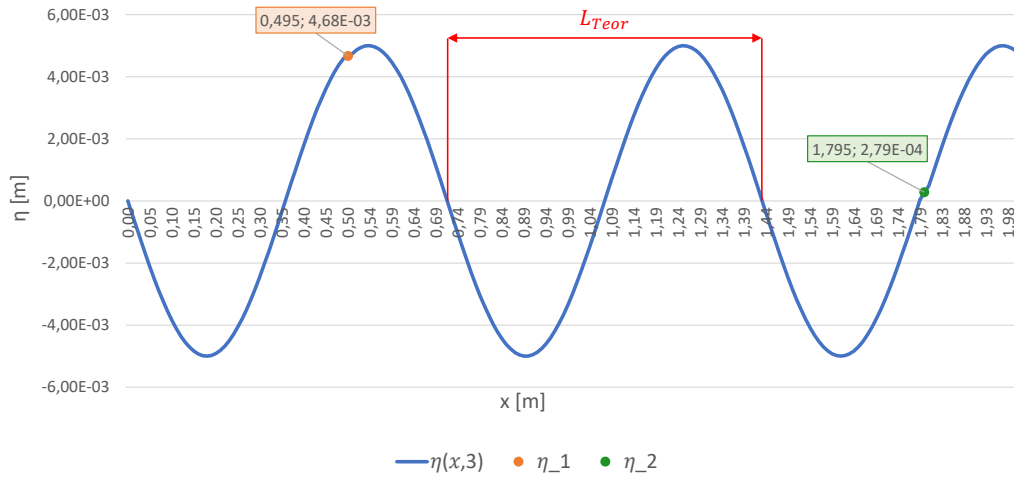
Na Tabela 5.6 são apresentadas as elevações de superfície livre calculadas e os comprimentos de onda medidos respectivos aos ensaios 4, 5 e 6.

Tabela 5.6: Parâmetros experimentais dos Ensaios 4, 5 e 6.

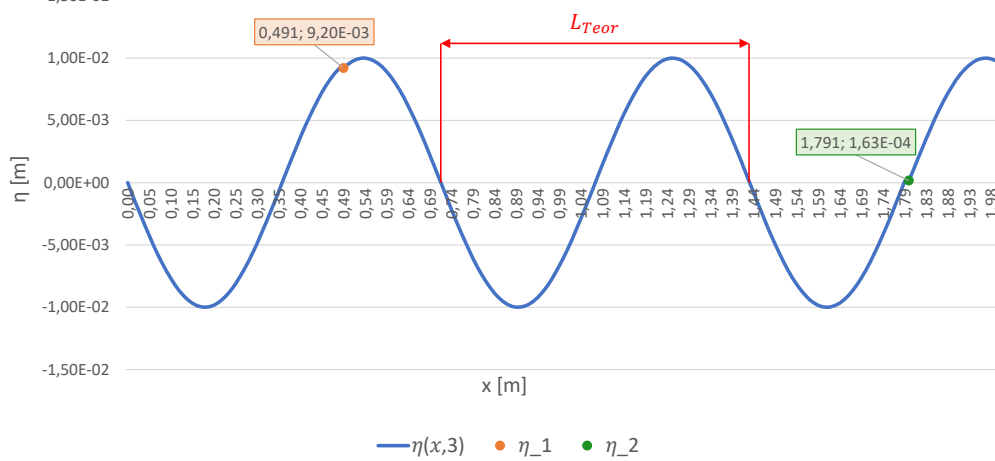
Ensaio	d_1 [m]	d_2 [m]	$\eta_{1_{Exp}}$ [m]	$\eta_{2_{Exp}}$ [m]	L_{Exp} [m]
4	0,134	0,131	0,004	0,001	0,70
5	0,138	0,130	0,008	0,000	0,74
6	0,142	0,130	0,012	0,000	0,73

As funções de elevação correspondentes a estes ensaios 4, 5 e 6 encontram-se representadas na Figura 5.5.

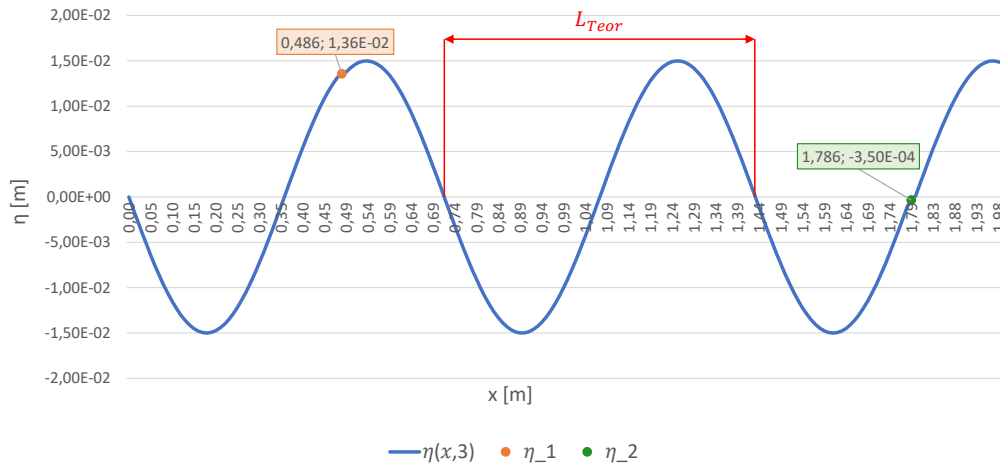
As variáveis teóricas obtidas encontram-se sintetizadas na Tabela 5.7. Estas soluções obtidas analiticamente serão, posteriormente, utilizadas na comparação com os resultados experimentais respectivos e calculados os erros relativos associados.



(a) Função de elevação relativa ao Ensaio 4 - $H = 0,01$ m.



(b) Função de elevação relativa ao Ensaio 5 - $H = 0,02$ m.



(c) Função de elevação relativa ao Ensaio 6 - $H = 0,03$ m.

Figura 5.5: Funções de elevação da superfície livre para $T = 0,75$ s.

Tabela 5.7: Parâmetros teóricos dos Ensaios 4, 5 e 6.

Ensaio	x_1 [m]	x_2 [m]	$\eta_{1_{Teor}}$ [m]	$\eta_{2_{Teor}}$ [m]	L_{Teor} [m]
4	0,495	1,795	0,0047	0,0003	0,72
5	0,491	1,791	0,0092	0,0002	0,72
6	0,486	1,786	0,0136	-0,0004	0,72

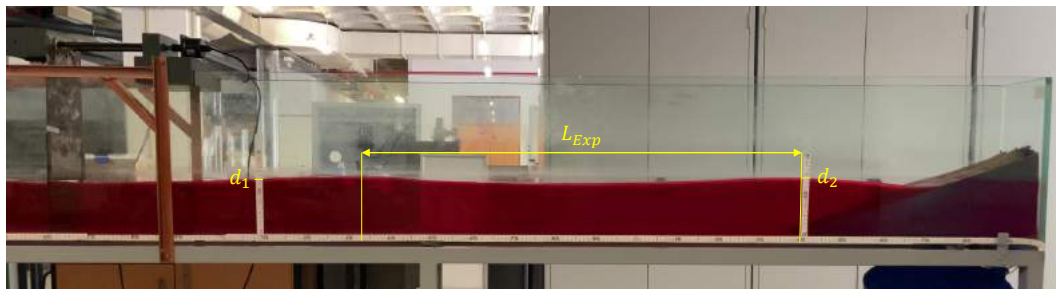
Da análise experimental e teórica, sintetizam-se na Tabela 5.8 as respectivas variáveis obtidas para cada caso.

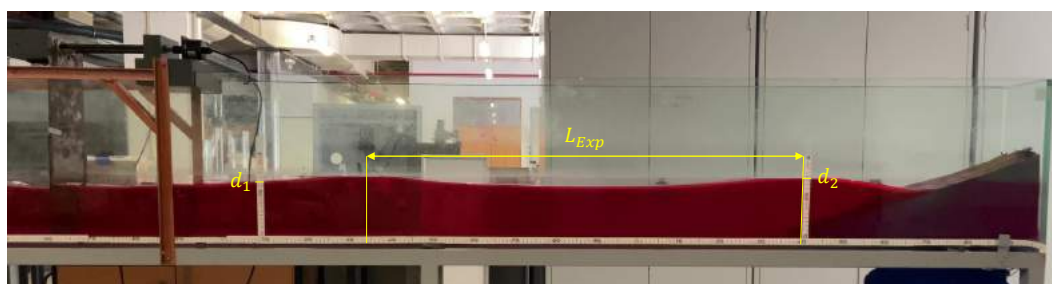
Tabela 5.8: Parâmetros experimentais e teóricos relativos aos Ensaios 4, 5 e 6.

Ensaio	H [m]	T [s]	$\eta_{1_{Exp}}$ [m]	$\eta_{2_{Exp}}$ [m]	$\eta_{1_{Teor}}$ [m]	$\eta_{2_{Teor}}$ [m]	L_{Exp} [m]	L_{Teor} [m]
4	0,01	0,75	0,004	0,001	0,0047	0,0003	0,70	0,72
5	0,02	0,75	0,008	0,000	0,0092	0,0002	0,74	0,72
6	0,03	0,75	0,012	0,000	0,0136	-0,0004	0,73	0,72

5.1.3 Ensaios 7, 8 e 9

Nestes ensaios, o período de onda é alterado para 1,00 s e a altura de onda volta de novo a percorrer a mesma sequência. Estes parâmetros encontram-se definidos na Tabela 5.1, mostrada anteriormente. As fotografias escolhidas dos ensaios, representadas na Figura 5.6, correspondem ao instante $t = 3$ s.

(a) Ensaio 7 - $H = 0,01$ m.(b) Ensaio 8 - $H = 0,02$ m.Figura 5.6: Ensaios experimentais realizados para $T = 1,00$ s.

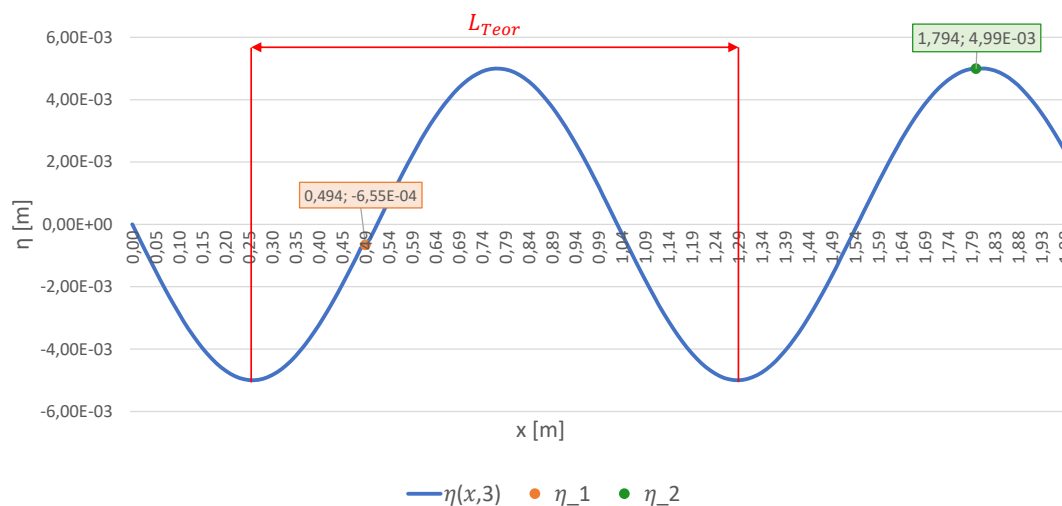
(c) Ensaio 9 - $H = 0,03$ m.Figura 5.6: Ensaios experimentais realizados para $T = 1,00$ s (cont.).

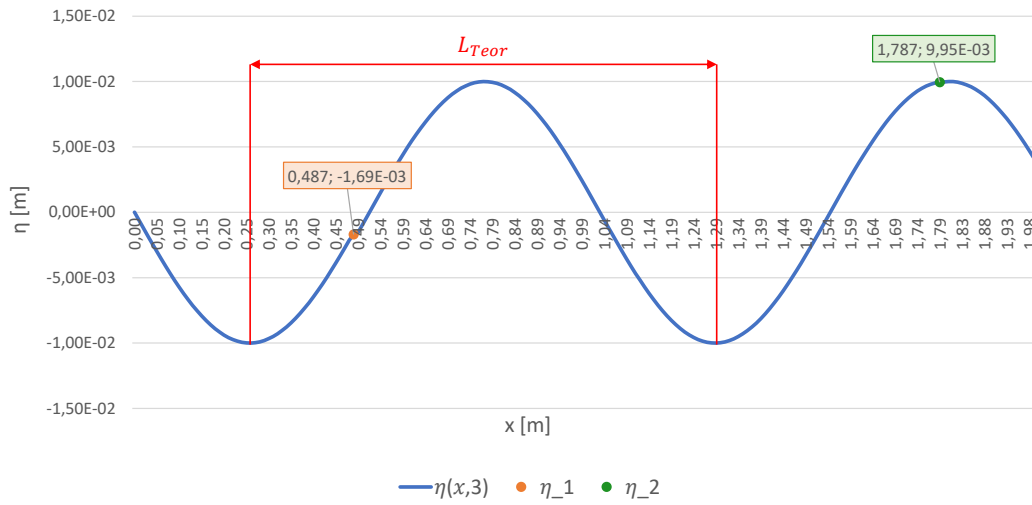
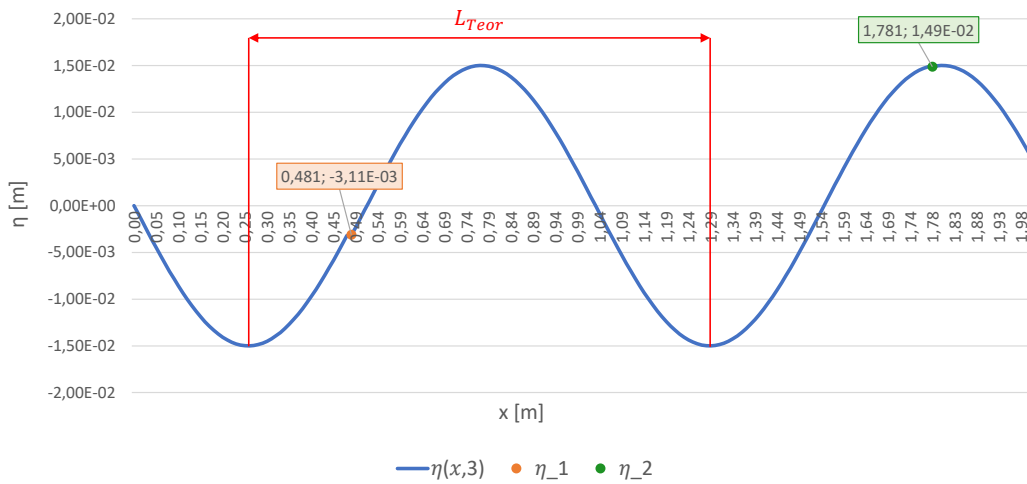
A partir dos testes experimentais realizados, retiram-se os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Parâmetros experimentais dos Ensaios 7, 8 e 9.

Ensaio	d_1 [m]	d_2 [m]	$\eta_{1_{Exp}}$ [m]	$\eta_{2_{Exp}}$ [m]	L_{Exp} [m]
7	0,129	0,135	-0,001	0,005	1,09
8	0,129	0,140	-0,001	0,010	1,07
9	0,129	0,144	-0,001	0,014	1,06

Através das soluções analíticas representadas na Figura 5.7 obtêm-se os parâmetros de comparação teóricos.

(a) Função de elevação relativa ao Ensaio 7 - $H = 0,01$ m.Figura 5.7: Funções de elevação da superfície livre para $T = 1,00$ s.

(b) Função de elevação relativa ao Ensaio 8 - $H = 0,02$ m.(c) Função de elevação relativa ao Ensaio 9 - $H = 0,03$ m.Figura 5.7: Funções de elevação da superfície livre para $T = 1,00$ s (cont.).

Na Tabela 5.10 resumem-se estes valores obtidos a partir das funções anteriores.

Tabela 5.10: Parâmetros teóricos dos Ensaios 7, 8 e 9.

Ensaio	x_1 [m]	x_2 [m]	η_{1Teor} [m]	η_{2Teor} [m]	L_{Teor} [m]
7	0,494	1,794	-0,0007	0,0050	1,03
8	0,487	1,787	-0,0017	0,0100	1,03
9	0,481	1,781	-0,0031	0,0149	1,03

Os parâmetros obtidos para este terceiro grupo de ensaios encontram-se na Tabela 5.11, sendo, posteriormente, comparados e discutidos na secção 5.2.

Tabela 5.11: Parâmetros experimentais e teóricos relativos aos Ensaios 7, 8 e 9.

Ensaio	$H[m]$	$T[s]$	$\eta_{1Exp}[m]$	$\eta_{2Exp}[m]$	$\eta_{1Teor}[m]$	$\eta_{2Teor}[m]$	$L_{Exp}[m]$	$L_{Teor}[m]$
7	0,01	1,00	-0,001	0,005	-0,0007	0,0050	1,09	1,03
8	0,02	1,00	-0,001	0,010	-0,0017	0,0100	1,07	1,03
9	0,03	1,00	-0,001	0,014	-0,0031	0,0149	1,06	1,03

5.2 Análise e Discussão dos Resultados Experimentais

O erro relativo entre as elevações de superfície livre experimental e teórica para a posição da fita 1, η_{1Exp} e η_{1Teor} , é calculado da seguinte forma:

$$E_{R_{\eta_1}} = \frac{|\eta_{1Teor} - \eta_{1Exp}|}{|\eta_{1Teor}|} \times 100 \quad (5.1)$$

A Tabela 5.12 mostra o erro existente para a elevação da superfície livre na posição x_1 , respetivo a cada ensaio realizado.

Tabela 5.12: Erros relativos entre as elevações de superfície livre para a posição da fita 1.

Ensaio	$H[m]$	$T[s]$	$\eta_{1Exp}[m]$	$\eta_{1Teor}[m]$	$E_{R_{\eta_1}} \%$
1	0,01	0,50	-0,006	-0,0047	27,66
2	0,02		-0,010	-0,0095	5,26
3	0,03		-0,011	-0,0144	23,61
4	0,01	0,75	0,004	0,0047	14,89
5	0,02		0,008	0,0092	13,04
6	0,03		0,012	0,0136	11,76
7	0,01	1,00	-0,001	-0,0007	42,86
8	0,02		-0,001	-0,0017	41,18
9	0,03		-0,001	-0,0031	67,74

Da Tabela 5.12 é possível retirar o erro relativo médio entre as elevações de superfície livre para a posição da fita 1, sendo este aproximadamente 27,6%. De notar que os valores de elevação da superfície livre da água experimentais e teóricos são bastante próximos para certos ensaios. No entanto, alguns ensaios apresentam um erro relativo significativo, como é o caso do terceiro grupo de ensaios, para $T = 1,00$ s. Esses erros devem-se, em grande parte, à distorção dos píxeis das fotografias retiradas dos ensaios experimentais, causada pela distorção característica da lente da câmara utilizada na gravação dos ensaios. Esta distorção provoca um desvio dos píxeis das fotografias relativamente às suas posições observadas a partir de um plano 2D, o que produz erros de leitura, através das fitas, dos valores da elevação da superfície livre e comprimento de onda. Também, o facto das

fitas apresentarem uma menor divisão da escala igual a 0,01 m, resulta numa incerteza absoluta de leitura dos valores medidos igual a $\pm 0,005$ m, sendo este valor igual à metade da menor divisão da escala.

Outra razão para os resultados apresentados decorre do cálculo da velocidade e aceleração do batedor durante o seu movimento. Estas atualizações são apenas executadas para os instantes de tempo correspondentes a cada passo realizado pelo motor, existindo, desta forma, um erro associado. A vibração do motor de passo e, consequentemente, perda de binário durante o arranque e paragem do motor representa outro aumento dos erros relativos apresentados, uma vez que esta vibração provoca um movimento incerto da placa do batedor nestes instantes.

Seguidamente, procedeu-se à comparação dos parâmetros de elevação da superfície livre obtidos para a posição da fita 2, x_2 .

Analogamente à comparação dos valores respetivos à fita 1, o erro relativo ou percentagem de amortecimento foi calculado, utilizando a Equação (5.1) adaptada para os parâmetros relativos à fita 2. Na Tabela 5.13 são descritos para cada ensaio, os erros de elevação da superfície livre na posição x_2 .

Tabela 5.13: Erros relativos entre as elevações de superfície livre para a posição da fita 2.

Ensaio	H [m]	T [s]	$\eta_{2_{Exp}}$ [m]	$\eta_{2_{Teor}}$ [m]	$E_{R_{\eta_2}}$ %
1	0,01	0,50	0,002	0,0050	60,00
2	0,02		0,003	0,0099	69,69
3	0,03		0,008	0,0147	45,58
4	0,01	0,75	0,001	0,0003	350,00
5	0,02		0,000	0,0002	100,00
6	0,03		0,000	-0,0004	100,00
7	0,01	1,00	0,005	0,0050	0,00
8	0,02		0,010	0,0100	0,00
9	0,03		0,014	0,0149	6,04

Para este caso, o erro relativo médio entre as elevações de superfície livre para a posição da fita 2 é aproximadamente 81,3%. Através da análise da tabela acima mostrada, o terceiro grupo de ensaios, com o período de onda igual a 1,00 s, apresentam valores experimentais muito próximos dos teóricos. Os erros relativos mais elevados pertencem ao segundo grupo de ensaios. Uma das razões para esta discrepância é a existência da praia dissipativa instalada no canal, tendo esta o objetivo de amortecer as ondas geradas pelo batedor, provocando modificações na altura de onda esperada. Também, como já referido, a distorção das fotografias e a imprecisão de leitura dos valores medidos nas fitas apresentam um importante papel no aumento destes erros relativos determinados.

Por fim, para a validação do sistema de geração implementado, apenas falta comparar os comprimentos de onda experimentais e teóricos, relativos a cada ensaio realizado, L_{Exp} e L_{Teor} , respetivamente. No cálculo deste erro relativo recorre-se à Equação (5.1), adaptada

para estes parâmetros a comparar, resultando na Equação (5.2).

$$E_{R_L} = \frac{|L_{Exp} - L_{Teor}|}{|L_{Teor}|} \times 100 \quad (5.2)$$

Na Tabela 5.14 são apresentados os erros relativos entre o comprimento de onda experimental e teórico, obtidos para cada ensaio.

Tabela 5.14: Erros relativos entre os comprimentos de onda experimentais e teóricos.

Ensaio	H[m]	T[s]	L_{Exp} [m]	L_{Teor} [m]	E_{R_L} %
1	0,01	0,50	0,39	0,38	2,63
2	0,02		0,41		7,89
3	0,03		0,42		10,53
4	0,01	0,75	0,70	0,72	2,78
5	0,02		0,74		2,78
6	0,03		0,73		1,39
7	0,01	1,00	1,09	1,03	5,83
8	0,02		1,07		3,88
9	0,03		1,06		2,91

Dados os erros determinados para o comprimento de onda, estes revelam-se relativamente reduzidos. O erro relativo médio entre os comprimentos de onda experimentais e teóricos é aproximadamente 4,51%. Nesta tabela é possível visualizar que os erros mais elevados (Ensaio 2 e 3) pertencem ao primeiro grupo de ensaios, com um período de onda igual a 0,50 s. A falta de exatidão na medição do comprimento de onda deve-se, novamente, à distorção dos píxeis das fotografias retiradas dos ensaios experimentais, à imprecisão de leitura dos valores medidos através da fita horizontal, como também devido à vibração e atualização intermitente da velocidade e aceleração do motor.

O fator da distorção mencionado pode ser dissipado através de um melhor tratamento das fotografias retiradas dos ensaios experimentais. As fotografias devem sofrer um processo de correção de imagem. Neste sentido, existe diferentes programas de processamento de imagem que permitem o ajuste dos píxeis para as suas posições previstas num plano 2D. Consecutivamente, estas fotografias devem ser calibradas e processadas, de modo a adquirirem uma melhor resolução. Desta forma, uma maior quantidade de píxeis contribui para uma melhor qualidade e nitidez das fotografias, permitindo um maior rigor na medição dos valores de elevação da superfície livre e comprimento de onda.

No entanto, a presente dissertação focou-se maioritariamente no desenvolvimento e construção do batedor de ondas do tipo pistão e na programação do código para o controlo do motor de passo, pelo que não houve uma maior incidência no processo de tratamento de imagem das fotografias retiradas dos ensaios experimentais.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Principais conclusões

Esta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um batedor de ondas do tipo pistão para um canal.

A modelação do batedor foi feita inicialmente no programa *SolidWorks*. O batedor construído é constituído por uma placa vertical, estruturalmente rígida, apoiada em duas guias e parcialmente imersa na água. O método de geração de ondas deste batedor ocorre com base no princípio mecânico de movimentação de um fuso. O movimento da placa do batedor é acionado com recurso a um motor de passo. Este provoca um movimento horizontal da placa e, por sua vez, o deslocamento de toda a coluna de água presente no canal.

O desenvolvimento do código de controlo do motor de passo focou-se na geração de agitação regular. Para a validação do movimento deste mecanismo de geração de ondas, foram realizados vários ensaios experimentais que compreenderam alturas de onda iguais a 0,01, 0,02 e 0,03 metros e períodos de onda iguais a 0,50, 0,75 e 1,00 segundos.

Estes ensaios permitiram medir o comprimento de onda e a elevação da superfície livre das ondas geradas para duas posições específicas do canal. A comparação entre os resultados experimentais e as soluções analíticas permitiu determinar os erros relativos respetivos a cada ensaio realizado. Para o parâmetro do comprimento de onda verificou-se uma diferença aproximadamente igual a 4,51% entre os valores experimentais e teóricos. Contrariamente, para a elevação da superfície livre retiraram-se erros relativos mais elevados, apresentando uma diferença de 27,6% para a posição da fita 1 e 81,3% para a posição da fita 2.

A imprecisão na leitura dos valores medidos experimentalmente é um dos fatores responsáveis pelos erros relativos apresentados. Esta imprecisão deve-se à distorção das

fotografias dos ensaios e à elevada incerteza absoluta de leitura através das fitas. A vibração do motor de passo durante o arranque e paragem, bem como o intervalo de tempo entre atualizações da velocidade e aceleração do batedor contribuíram também para o aumento destes erros relativos.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

De forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido na presente dissertação, do ponto de vista de trabalhos futuros, seria interessante um melhor tratamento das fotografias retiradas dos ensaios experimentais para a obtenção de resultados mais fidedignos. Também, a realização de testes para diferentes profundidades de água seria uma opção de estudo.

Analogamente à implementação linear no código para o controlo do motor de passo, seria relevante a otimização do código para agitação não linear, que fosse ao encontro do tipo de onda a ser produzido pelo batedor no canal.

A geração de agitação irregular no canal seria também uma proposta interessante a estudar.

Por último, nesta dissertação utilizou-se estruturas de dissipação de energia para a absorção das ondas geradas. Desta forma, seria útil capacitar o canal de ondas com um sistema eficaz de absorção ativa, que permitisse ao batedor a geração e a absorção conjunta, adicionando ao sinal de controlo do batedor o sinal de correção relativo às ondas refletidas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. M. Lourenço. *The NOVAtesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf>.
- [2] F. M. Marques Machado, A. M. Gameiro Lopes e A. D. Ferreira. «Numerical simulation of regular waves: Optimization of a numerical wave tank». Em: *Ocean Engineering* 170 (2018), pp. 89–99. ISSN: 0029-8018. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2018.10.002](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.002).
- [3] M. Beneduce. «Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino». Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica. Tese de mestrado. Politecnico di Torino, 2019.
- [4] A. Lal e M. Elangovan. «CFD Simulation and Validation of Flap Type Wave-Maker». Em: *International Journal of Mathematical and Computational Sciences* 2.10 (2008), pp. 708–714.
- [5] W. H. Munk. «Origin and Generation of Waves». Em: *Coastal Engineering Proceedings* 1.1 (1951). DOI: [10.9753/icce.v1.1](https://doi.org/10.9753/icce.v1.1).
- [6] A. Toffoli e E. M. Bitner-Gregersen. «Types of Ocean Surface Waves, Wave Classification». Em: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering* (2017). DOI: [10.1002/9781118476406.emoe077](https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe077).
- [7] A. P. dos Recursos Hídricos. *Glossário da Revista de Gestão Costeira Integrada - Ondas Marinhas*. 2007. URL: <https://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html> (acedido em 2023-01).
- [8] E. Santos. «Caracterização do padrão de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento no complexo estuarino de São Marcos (MA).» Departamento de Oceanografia. Tese de mestrado. Universidade Federal do Maranhão, 2018.
- [9] H. S. Jeffreys. «On the Formation of Water Waves by Wind». Em: *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 107 (1925), pp. 189–206. DOI: [10.1098/rspa.1925.0015](https://doi.org/10.1098/rspa.1925.0015).
- [10] Z. Demirbilek e C. Vicent. «Water Waves Mechanics». Em: *Coastal Engineer Manual, U.S. Army Corps of Engineers*. Washington, D.C., 2002. Cap. II-1.

- [11] R. G. Dean e R. A. Dalrymple. Em: *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Vol. 2. World Scientific, 1991. Cap. 2 e 3. DOI: [10.1142/1232](https://doi.org/10.1142/1232).
- [12] M. Maâtoug e M. Ayadi. «Numerical simulation of the second-order Stokes theory using finite difference method». Em: *Alexandria Engineering Journal* 55.3 (2016), pp. 3005–3013. ISSN: 1110-0168. DOI: [10.1016/j.aej.2016.04.035](https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.04.035).
- [13] M. Khalid. «Laboratory Experiments on Water Wave Generation». Tese de mestrado. University of Dundee, 2020.
- [14] *How to make an artificial wave*. 2021. URL: <https://www.surfertoday.com/surfing/how-to-make-an-artificial-wave> (acedido em 2023-01).
- [15] J. Cruz. «Ocean Wave Energy: Current Status and Future Prespectives». Em: 2008, pp. 147–150. ISBN: 978-3-540-74894-6. DOI: [10.1007/978-3-540-74895-3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3).
- [16] D. Streng, L. Dischinger e J. Niemoller. «Museum Wave Tank Design». Em: (2017), pp. 12–17.
- [17] L. Guilherme. «Controlo de um gerador de ondas hidráulicas em canal com absorção activa». Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Tese de mestrado. Instituto Superior Técnico em parceria com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009.
- [18] R. Capitão e M. Vicente. «Verificação de um sistema de absorção dinâmica de reflexões instalado no canal de ondas irregulares do LNEC». Em: 2007.
- [19] F. Taveira-Pinto et al. «O novo sistema de geração e aquisição de agitação marítima do laboratório de hidráulica da FEUP». Em: 2008, p. 10.
- [20] T. Z. Gireli et al. «Aprimoramento da geração de ondas no canal do Laboratório de Hidráulica da EPUSP visando a modelação do espectro de energia da agitação aplicada à engenharia costeira e portuária». Em: 2003.
- [21] E. Designs. *Wave generators*. URL: <http://www4.edesign.co.uk/waves/some-wave-1/> (acedido em 2023-01).
- [22] P. Michima. «Estudo de um absorvedor de ondas ativo para tanque didático». Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Tese de mestrado. Universidade de São Paulo, 2007. DOI: [10.11606/D.3.2007.tde-22012008-102214](https://doi.org/10.11606/D.3.2007.tde-22012008-102214).
- [23] C. Altomare et al. «Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model». Em: *Coastal Engineering* 127 (2017), pp. 37–54. ISSN: 0378-3839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.06.004>.
- [24] L. Gurnari et al. «The Wave-to-Wire Energy Conversion Process for a Fixed U-OWC Device». Em: *Energies* 13.1 (2020). ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en13010283](https://doi.org/10.3390/en13010283).
- [25] Y. Goda. «Travelling secondary wave crests in wave channels». Em: *Port and harbour research institute, Ministry of transport, Japan* 13 (1967), pp. 32–38.

- [26] O. S. Madsen. «On the generation of long waves». Em: *Journal of Geophysical Research* (1896-1977) 76.36 (1971), pp. 8672–8683. DOI: [10.1029/JC076i036p08672](https://doi.org/10.1029/JC076i036p08672).
- [27] H. Wallingford. *Wavemaker design and manufacture*. URL: <https://www.hrwallingford.com/expertise/equipment-and-technology/wavemaker-design-and-manufacture> (acedido em 2023-01).
- [28] E. D. la Hoz et al. «Fundamentals of the operation of a wave flume; Design and build of a twelve meters long wave flume to be installed at the Faculty of Engineering in Bilbao». Em: *V. Marine Energy Conference*. Joint Research Laboratory on Offshore Renewable Energy, 2018.
- [29] J. Goncalves e A. Pinto. *Motor de Passo - Arduino*. Rel. téc. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade do Minho, 2012.
- [30] Maximous e Instructables. *Controlling a stepper motor with an Arduino*. 2017. URL: <https://www.instructables.com/Controlling-a-Stepper-Motor-with-an-Arduino/> (acedido em 2023-02).
- [31] M. G. Straub. *Motor de Passo Arduino controlado via driver A4988*. 2021. URL: <https://www.usinainfo.com.br/blog/motor-de-passo-arduino-bipolar-controlando-motores-via-driver-a4988/> (acedido em 2023-02).
- [32] S. J. Parmar et al. «Design and Development of Stepper Motor Position Control using Arduino Mega 2560». Em: *International Journal of Science Technology and Engineering* 3.09 (2017), pp. 77–82.
- [33] B. Arango, P. K. Soori e P. Talukder. «Stepper motor drives for robotic applications». Em: *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2012 - Conference Proceedings*, pp. 361–366. ISBN: 978-1-4673-0660-7. DOI: [10.1109/PEOCO.2012.6230890](https://doi.org/10.1109/PEOCO.2012.6230890).
- [34] O. Motor. *PKP264D28A2-R2EL / PLE60-10B / P00028, Stepper Motor with Planetary Gearhead (10:1)*. URL: <https://catalog.orientalmotor.com/item/2-phase-bipolar-stepper-motors/60mm-pkp-series-2-phase-bipolar-stepper-motors/pkp264d28a2-r2el-ple60-10b-p00028> (acedido em 2023-07).
- [35] Stegia. *NEMA 24 Standard Hybrid Stepper Motor*.
- [36] Y. Xie, X. Zhao e Z. Liu. «A simple approach for wave absorbing control of plunger wavemakers using machine learning: Numerical study». Em: *Coastal Engineering* 179 (2023), p. 104253. ISSN: 0378-3839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104253>.



CÓDIGO IMPLEMENTADO NO ARDUINO UNO

Código A.1:

```

1 #include <FlexyStepper.h> //Biblioteca de comandos de controlo para o motor
  de passos
2 #include <Wire.h> //Biblioteca para a comunicação I2C do LCD
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h> //Biblioteca de comandos dedicada ao LCD

4 FlexyStepper stepper; //Criar o objeto stepper
5 LiquidCrystal_I2C lcd = LiquidCrystal_I2C(0x27, 20, 4); //Criar o objeto lcd

6 //Pinos respetivos aos finais de curso do batedor
7 const int emergencyStopPin1 = 2;
8 const int emergencyStopPin2 = 3;

9 //Pinos do motor de passos
10 const int enPin = 4;
11 const int dirPin = 5;
12 const int stepPin = 6;

13 const int buttonPin = 7; //Pino do Botão de start/stop

14 //Variáveis constantes do motor de passos
15 const float stepAngle = 1.8; //Ângulo percorrido por cada step em graus
16 const int stepsPerRevolution = 360/stepAngle; //Número de steps para o motor
  percorrer uma revolução
17 const int PassoFuso = 50; //Passo do Fuso em mm
18 const int stepsPerMilimeter = stepsPerRevolution/PassoFuso; //Número de
  steps necessários para o motor percorrer 1mm

19 int PressedButtonStop;

```

```

20 const float d = 13/100.0;    //Profundidade de água no canal de 13 cm

21 //Variáveis constantes conhecidas
22 const float Pi = 3.141592;    //Valor aproximado da constante pi
23 const float g = 9.80665;      //Valor aproximado da aceleração gravítica

24 void setup() {

25     //Iniciação do LCD
26     lcd.init();
27     lcd.backlight();

28     //Estabelecer a comunicação entre os pinos nomeados e o Arduino
29     pinMode(emergencyStopPin1, INPUT);
30     pinMode(emergencyStopPin2, INPUT);
31     pinMode(buttonPin, INPUT);
32     pinMode(enPin, OUTPUT);
33     stepper.connectToPins(stepPin, dirPin);

34     digitalWrite(enPin, LOW); //Impedir passagem de corrente no motor
35     stepper.setStepsPerMillimeter(stepsPerRevolution/PassoFuso); //Transmitir o
        número de passos para o motor percorrer 1 mm
36     stepper.setSpeedInStepsPerSecond(0); //Velocidade nula no motor

37     Serial.begin(115200);    //Iniciação da comunicação Serial
38     Serial.println("Program Started");

39     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(emergencyStopPin1), EmergencyFunction,
        CHANGE); //Interrupt do emergencyStopPin1
40     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(emergencyStopPin2), EmergencyFunction,
        CHANGE); //Interrupt do emergencyStopPin2

41     delay(200);
42 }

43 void(* resetFunc) (void) = 0; //Reset do Arduino

44 void EmergencyFunction() { //Função de emergência

45     stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(0); //Velocidade nula no motor
46     resetFunc(); //Chama a função de Reset ao Arduino
47 }

48 void loop() {

49     float Stroke; //Curso do batedor
50     float Frequency; //Frequência de onda gerada
51     float H; //Altura de onda
52     float Period; //Período de onda

```

APÊNDICE A. CÓDIGO IMPLEMENTADO NO ARDUINO UNO

```
53  ReadPotentiometers(&H, &Frequency); //Leitura dos potenciômetros
54  WaveVariables(H, Frequency, &Stroke, &Period); //Obtenção das variáveis
    relativas às ondas a ser geradas
55  buttonStartStop(Stroke, Frequency); //Leitura do botão de início de ciclo
56 }

57 void ReadPotentiometers(float* H, float* Frequency) {

58  int val1 = analogRead(A0); //Leitura do potenciômetro para a Altura de Onda
59  int Altura = map(val1,0,1023,1,100); //Altura em mm

60  int val2 = analogRead(A1); //Leitura do potenciômetro para a Frequência
61  int f = map(val2,0,1023,500,2000); //Frequência em mHz

62  *H = Altura/1000.0; //Conversão da altura em m
63  *Frequency = f/1000.0; //Conversão da frequência em Hz

64  return;
65 }

66 void WaveVariables(float H, float Frequency, float* Stroke, float* Period) {

67  *Period = 1/Frequency; //Período de onda (s)
68  float w = 2*Pi/(*Period); //Frequência angular da onda (rad/s)
69  float k = sqrt(pow(w,2)/(g*d)); //Número de onda (rad/m)
70  float L = g*(*Period)/w*tanh(k*d); //Comprimento de onda (m)
71  float A = H/2; //Amplitude de onda (m)
72  *Stroke = H/((2*(cosh(2*k*d)-1))/(sinh(2*k*d)+(2*k*d))); //Curso do batedor
    (m)
73  lcdDisplay(*Stroke,Frequency,H,*Period); //Chama a função de escrita no LCD
74  return;
75 }

76 void lcdDisplay(float Stroke, float Frequency, float H, float Period) {

77  lcd.setCursor(0, 0);
78  lcd.print("Altura: ");
79  lcd.print(H*1000);
80  lcd.print(" mm ");
81  lcd.setCursor(0, 1);
82  lcd.print("Frequencia: ");
83  lcd.print(Frequency);
84  lcd.print(" Hz");
85  lcd.setCursor(0, 2);
86  lcd.print("Período: ");
87  lcd.print(Period);
88  lcd.print(" s ");
89  lcd.setCursor(0, 3);
90  lcd.print("Curso: ");
91  lcd.print(Stroke*1000);
```

```

92  lcd.print(" mm ");
93  }

94  void buttonStartStop(float Stroke, float Frequency) {

95      //Variáveis relativas ao estado do buttonPin
96      int CurrentbuttonState;
97      PressedButtonStop = LOW;

98      CurrentbuttonState = digitalRead(buttonPin); //Estado atual do Botão
99      if (CurrentbuttonState == HIGH){
100         while(CurrentbuttonState == HIGH){ //Verifica se o botão ainda se
            encontra pressionado
101             CurrentbuttonState = digitalRead(buttonPin);
102         }
103         digitalWrite(enPin, HIGH); //Permite a passagem de corrente para o motor
104         while(PressedButtonStop == LOW) { //Verifica se o botão foi de novo
            pressionado
105             motorStep(Frequency, Stroke); //Chama a função motorStep para acionar
            o motor de passos
106         }
107     }
108     digitalWrite(enPin, LOW); //Impede a passagem de corrente para o motor
109     delay(50);
110 }

111 void motorStep(float f, float S){ //Código para controlo do motor de passos

112     int CurrentbuttonState; //Estado do botão
113     int Avan_Recuo = 0; //Variável para percorrer um ciclo completo (ida/volta)

114     S = S*1000.0; //Curso do batedor em milímetros
115     int StepMax = stepsPerMilimeter*S/2; //Número de steps que o batedor
        percorre até atingir S/2

116     const int intervSteps = 1; //Taxa de atualização da velocidade do motor, em
        steps
117     float intervMilim = (float) intervSteps/stepsPerMilimeter; //Taxa de
        atualização da velocidade do motor, em mm
118     int n_intervalos = 2; //Contagem do Número de Atualizações

119     stepper.setCurrentPositionInMillimeters(-S/2); //Posição inicial do motor

120     while (Avan_Recuo < 2) { //Condição para completar os 2 ciclos

121         if(Avan_Recuo == 0) { //Ciclo de avanço
122             stepper.setTargetPositionInMillimeters(S/2); //Posição S/2 a alcançar
123         }
124         else { //Ciclo de recuo

```

APÊNDICE A. CÓDIGO IMPLEMENTADO NO ARDUINO UNO

```
125     stepper.setTargetPositionInMillimeters(-S/2); //Posição -S/2 a alcançar
126 }

127 InitialSpeedCalculation(f, S, intervMilim); //Cálculo da velocidade e
    aceleração inicial do motor

128 while(!stepper.motionComplete()) { //Condição de movimento completado
129     stepper.processMovement(); //Movimento do motor

130     CurrentbuttonState = digitalRead(buttonPin); //Estado do buttonPin
131     if(CurrentbuttonState == HIGH){
132         PressedButtonStop = HIGH;
133     }

134     if(Avan_Recuo == 0) { //Ciclo de avanço
135         if(stepper.getCurrentPositionInSteps() == -StepMax + intervSteps*
n_intervalos) {
136             CurrentSpeedCalculation(f, S, intervMilim, n_intervalos); //Cá
lculo da velocidade e aceleração neste intervalo
137             n_intervalos += 1;
138         }
139     }
140     else { //Ciclo de recuo
141         if(stepper.getCurrentPositionInSteps() == StepMax - intervSteps*
n_intervalos) {
142             CurrentSpeedCalculation(f, S, intervMilim, n_intervalos); //Cá
lculo da velocidade e aceleração neste intervalo
143             n_intervalos += 1;
144         }
145     }
146 }
147 Avan_Recuo += 1; //Ciclo completado
148 stepper.setSpeedInStepsPerSecond(0); //Velocidade nula no motor
149 n_intervalos = 2;
150 }
151 }

152 float InitialSpeedCalculation(float f, float S, float intervMilim){

153     float t; //Tempo respetivo ao intervalo inicial
154     float speed; //Velocidade do motor
155     float acceleration; //Aceleração do motor

156     t = abs((asin(((S/2) + intervMilim)*2/S)+(Pi/2))/(2*Pi*f));
157     speed = abs(S/2*cos((2*Pi*f*t)-(Pi/2))*(2*Pi*f));
158     acceleration = abs(-(S/2)*pow((2*Pi*f),2)*sin(2*Pi*f*t-Pi/2));
159     stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(speed);
160     stepper.setAccelerationInMillimetersPerSecondPerSecond(acceleration);
161 }
```

```
162 float CurrentSpeedCalculation(float f, float S, float intervMilim, int
    n_intervalos) {

163     float t; //Tempo respectivo ao intervalo atual
164     float speed; //Velocidade do motor
165     float acceleration; //Aceleração do motor

166     t = abs((asin((-S/2+intervMilim*n_intervalos)*2/S)+(Pi/2))/(2*Pi*f));
167     speed = abs(S/2*cos((2*Pi*f*t)-(Pi/2))*(2*Pi*f));
168     acceleration = abs(-(S/2)*pow((2*Pi*f),2)*sin(2*Pi*f*t-Pi/2));
169     stepper.setSpeedInMillimetersPerSecond(speed);
170     stepper.setAccelerationInMillimetersPerSecondPerSecond(acceleration);
171 }
```





2023 Ortaokul Öğrenci Bilgi Yarışması Soru Bankası

2023 Ortaokul Öğrenci Bilgi Yarışması Soru Bankası