



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS
MECÂNICAS

NICOLE HEPP HANNES

**MEDIÇÃO DE ONDAS EM TANQUE DE PROVAS VIA
RASTREAMENTO DE ALVOS FLUTUANTES**

JOINVILLE

2020

Nicole Hepp Hannes

**MEDIÇÃO DE ONDAS EM TANQUE DE PROVAS VIA
RASTREAMENTO DE ALVOS FLUTUANTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da
Universidade Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de mestre em Engenharia e
Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hannes, Nicole Hepp

Medição de ondas em tanque de provas via rastreamento de alvos flutuantes / Nicole Hepp Hannes ; orientador, André Luis Condino Fugarra, 2020.

122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Engenharia e Ciências Mecânicas. 3. Sistema de rastreamento óptico. 4. Medição de ondas. 5. Instrumentação experimental. I. Fugarra, André Luis Condino. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

NICOLE HEPP HANNES
**MEDIÇÃO DE ONDAS EM TANQUE DE PROVAS VIA RASTREAMENTO DE
ALVOS FLUTUANTES**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fabiano Gilberto Wolf, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Régis K. Scalice, Dr
Coordenador do Programa

Prof. André Luís Condino Fugarra, Dr
Orientador

Joinville, 2020.

Este trabalho é dedicado ao meu companheiro, meus queridos pais e a persistência do meu orientador.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer por todas as oportunidades que a realização deste mestrado me proporcionou. Principalmente ao meu orientador, Dr. André Luís Condino Fajarra, que me incentivou a iniciar essa graduação, e me deu suporte durante todos os momentos que culminaram na qualificação e defesa deste trabalho, mesmo quando minha dedicação ao mestrado deixou de ser exclusiva e o desenvolvimento da dissertação começou a estagnar.

Gostaria de agradecer aos colegas da academia Pedro Cardozo de Mello, que além de me fornecer todos os dados necessários para a execução deste estudo e ainda se disponibilizou a ajudar durante a execução do mesmo, e Monique Ellen Bruner, que me auxiliou durante o processo de análise dos dados e produção das discussões. Ambos se fizeram disponíveis e aceitaram todos os desafios que eu levantava.

Aproveitar para mencionar o corpo de docentes do programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina, que sempre se dedicou para elevar o padrão e qualidade do programa e ensino.

Meus pais, que fizeram todo o possível para que eu pudesse me dedicar sempre à minha qualificação e aperfeiçoamento, me ensinaram que o crescimento pessoal e profissional é o melhor investimento de tempo e recursos que uma pessoa pode fazer. São pequenos sacrifícios que valem para a vida toda. Sempre foram exemplos de ética, moral e amor, me auxiliando e suportando para que pudesse seguir meus objetivos.

Ao meu esposo, companheiro e carrasco. Sempre ao meu lado, cobrando minha atitude quando percebia que eu estava me desviando e me dando incentivo quando eu me deixava levar pelo desânimo e desacreditava na minha capacidade.

Um grande aprendizado de como devemos aprender a confiar e depender dos outros.

But we have reason to think that the annihilation of work is no less a physical impossibility than its creation, that is, than perpetual motion. (Sir George Stokes, 1st Baronet)

RESUMO

O presente trabalho visa a validação de um sistema para medição de ondas utilizando rastreamento óptico. Os sistemas que são aplicados na medição da elevação da superfície durante experimentos em laboratórios necessitam em sua maioria interferir no meio medido, e rotinas extensas ou adicionais para calibração. As limitações apresentadas pelos sistemas de medição resistivos, capacitivos e por ultrassom implicam na necessidade de um sistema menos invasivo e com boa precisão. O sistema óptico já é utilizado para as medições de deslocamento dos modelos, contudo para a medição da altura de onda ele não é empregado. Com isso neste trabalho o sistema óptico foi testado, em paralelo com um sistema capacitivo, para avaliar sua resposta quando submetido a ondas geradas em uma base oceânica. O ensaio foi realizado no Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo. Foram testadas ondas regulares e irregulares, em que o sistema óptico apresentou boa correlação quando confrontado com o sistema capacitivo. Apenas nas ondas regulares de maior frequência testadas, aproximadamente 1,88 Hz, o sistema óptico apresentou cavados mais acentuados do que o esperado, fazendo com que a diferença entre as amplitudes de onda para ambos os sistemas fosse mais relevante. Os fatores que podem afetar a qualidade dos resultados são avaliados nesse trabalho e futuras análises para compreensão dos fenômenos e melhor caracterização do sistema para aplicações laboratoriais são sugeridas.

Palavras-chave: Sensores de onda. Medição de onda. Rastreamento óptico. Alvo flutuante.

ABSTRACT

The present work aims to validate a system for measuring waves using optical tracking. The systems applied in the measurement of the water surface elevation during experiments in laboratories usually need to interfere in the measured medium, and extensive or additional routines for calibration. The limitations presented by resistive, capacitive and ultrasound measuring systems imply the need for a less invasive and accurate system. The optical system is already used for the displacement measurements of the models, however for the measurement of the wave height it is not applied. In this work, the optical system was tested, in parallel with a capacitive system, to evaluate its response when subjected to waves generated on an oceanic basis. The test was carried out in the Hydrodynamic Calibrator of the Numerical Prove Tank at the University of São Paulo. Regular and irregular waves were tested, the optical system showed good correction with the capacitive system. Only in the regular waves tested with the highest frequency, approximately 1.88 Hz, the optical system showed more accentuated troughs than expected, making the difference between the wave amplitudes for both systems more relevant. The factors that can affect the quality of the results are evaluated in this work and future analysis to understand the phenomena and better characterize the system for laboratory applications are suggested.

Keywords: Wave probe. Wave measurement. Optical tracking. Floating target.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de geração de ondas, faixas de frequência e energia contida.....	21
Figura 2 Características da Onda.....	22
Figura 3 Condições de Contorno para Ondas Progressivas.....	24
Figura 4 Influência da profundidade relativa na trajetória de uma partícula na onda.	28
Figura 5 Exemplo de perfil de onda e das propriedades cinemáticas e dinâmicas.....	30
Figura 6 Perfil da onda de gravidade para as diversas teorias de onda.	31
Figura 7 Superposição de duas ondas unidirecionais regulares.	32
Figura 8 Registro no tempo de um mar irregular com as diversas alturas de onda.....	32
Figura 9 Definição da altura de onda para ondas irregulares.	33
Figura 10 Análise do registro de onda irregular	33
Figura 11 Bases Oceânicas pelo Mundo.....	35
Figura 12 Esquema representativo do sensor resistivo.....	36
Figura 13 Esquema representativo de um sensor capacitivo.	37
Figura 14 Esquema representativo do sensor acústico e funcionamento da guia de ondas.....	39
Figura 15 Alvos reflexivos utilizados nos sistemas óptico.	40
Figura 16 Princípio de funcionamento do sistema a laser para medição de ondas, (a) quando no cavado da onda e (b) na crista.	42
Figura 17 Experimento realizado para determinação da superfície livre com alvos flutuantes e sensor resistivo; (a) esquema geral; (b) detalhes dos sensores na superfície livre.	43
Figura 18 Sensores utilizados na medição de altura de onda, sensor capacitivo e sensor óptico com alvo flutuante.	45
Figura 19 Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico, SP.	47
Figura 20 Modelo dos alvos flutuantes para o sistema óptico, detalhe do tubo transpassado..	47
Figura 21 Esquema representativo de como atua o alvo para sensor óptico.	48
Figura 22 Alvos reflexivos utilizados nos sensores ópticos.....	48
Figura 23 Disposição dos pares de sensor em relação a geração de onda na base oceânica. ...	49
Figura 24 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O1, par 2.....	54
Figura 25 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O2, par 2.....	54
Figura 26 Incertezas por sensor para o registro de onda O1.	55
Figura 27 Incertezas por sensor para o registro de onda O2.	55
Figura 28 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O3, par 6.....	56
Figura 29 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O4, par 6.....	57

Figura 30 Incertezas por sensor para o registro de onda O3.	57
Figura 31 Incertezas por sensor para o registro de onda O4.	58
Figura 32 Resultados para o par de sensores 3 com o registro de onda O8.	61
Figura 33 Movimento de um cilindro sob efeito de ondas.	63
Figura 34 RAO para um cilindro sob efeito de ondas.	64
Figura 35 Termos dominantes na amplitude de resposta com relação a frequência	65
Figura 36 Resposta dos sensores a onda irregular O14.....	67
Figura 37 Recorte aproximado do registro no tempo para a onda O14.....	67
Figura 38 Resposta dos sensores a onda irregular O15	68
Figura 39 Recorte aproximado do registro no tempo para a onda O15.....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Simplificação para a teoria linear em função da profundidade relativa	29
Quadro 2 Características dos sensores de onda do tipo capacitivo, resistivo e ultrassônico....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Matriz das ondas regulares ensaiadas no experimento.	50
Tabela 2 Registro de ondas irregulares ensaiadas.	50
Tabela 3 Resultados para o registro de onda O1, H = 12,98 mm e T = 0,53 s.....	53
Tabela 4 Resultados para o registro de onda O2, H = 12,98 mm e T = 0,53 s.....	53
Tabela 5 Resultados para o registro de onda O3, H = 23,18 mm e T = 0,73 s.....	56
Tabela 6 Resultados para o registro de onda O4, H = 23,18 mm e T = 0,73 s.....	56
Tabela 7 Resultados para o registro de onda O5, H = 34,95 mm e T = 0,94 s.....	58
Tabela 8 Resultados para o registro de onda O6, H = 59,65 mm e T = 1,35 s.....	59
Tabela 9 Resultados para o registro de onda O7 H = 70,86 mm e T = 1,55 s.....	59
Tabela 10 Resultados para o registro de onda O8, H = 80,12 mm e T = 1,76 s.....	59
Tabela 11 Resultados para o registro de onda O9, H = 86,55 mm e T = 1,96 s.....	59
Tabela 12 Resultados para o registro de onda O10, H = 89,22 mm e T = 2,17 s.....	60
Tabela 13 Resultados para o registro de onda O11, H = 87,14 mm e T = 2,37 s.....	60
Tabela 14 Resultados para o registro de onda O12, H = 200 mm e T = 1,5 s.....	60
Tabela 15 Resultados para o registro de onda O13, H = 200 mm e T = 1,25 s.....	60
Tabela 16 Relação de comprimento de onda em função do período.....	62
Tabela 17 Resultados para o registro de onda O14, Hs = 44.44 mm e Tp = 1,05 s.	66
Tabela 18 Resultados para o registro de onda O15, Hs = 44.44 mm e Tp = 1,9 s.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP *Acoustic Doppler Current Profilers*

BOEM *Bureau of Ocean Energy Management*

CCCSL *Condição de Contorno Cinemática na Superfície Livre*

CCDSL *Condição de Contorno Dinâmica da Superfície Livre*

CCF *Condição de Contorno do Fundo*

CCLP *Condição de Contorno Lateral Periódica*

CEM *Coastal Engineering Manual*

DNV GL *Det Norske Veritas Holding AS*

FFT *Fast Fourier Transform*

ISO *International Organization for Standardization*

ITTC *International Towing Tank Conference*

JONSWAP *Joint North Sea Wave Project*

LED *Light Emitting Diodes*

METOCEAN *Abreviação silábica para Meteorologia e Oceanografia*

NEA *Nível Estável da Água*

QTM *Qualisys Track Manager*

RAO *Response Amplitude Operator*

TPN *Tanque de Provas Numérico*

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b, c	Constantes para um sistema massa, mola e amortecedor, respectivamente
C	Velocidade com que a onda se propaga, celeridade
F_h	Força hidrodinâmica
F_w	Força exercida pela onda
g	Aceleração da gravidade
h	Profundidade da água
H	Altura de onda
$H_{1/3}$	Altura significativa de onda, ou H_S
k	Número de onda
L	Comprimento de onda
m	Massa
p	Pressão
S_ζ	Espectro da onda
T	Período de onda
T_p	Período equivalente a maior frequência
T_z	Período médio de zero ascendente
u, v, w	Componentes da velocidade nos eixos x, y e z, em coordenadas cartesianas
\mathbf{V}	Vetor velocidade
α	Periodicidade da onda
γ	Fator de intensificação da resposta de pico para ondas irregulares, JONSWAP
ε	Declividade da onda
ζ	Elevação da onda
η	Superfície livre da água
μ	Valor médio
ρ	Densidade do fluido
P	Coefficiente de correlação, ou coeficiente de Pearson
σ	Desvio padrão
Φ	Potencial de velocidade
Ψ	Função de fluxo
ω	Frequência da onda
ω_p	Maior frequência equivalente para onda irregular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	TEORIA DE ONDAS	20
2.1.1	Características de Ondas	21
2.1.2	Hidrodinâmica da onda	22
2.1.2.1	Condições de Contorno	24
2.1.3	Teoria Linear de Ondas	26
2.2	SENSORES PARA MEDIÇÃO DA ALTURA DE ONDA.....	34
2.2.1	Sensor Resistivo	35
2.2.2	Sensor Capacitivo	37
2.2.3	Sensor por Ultrassom.....	38
2.3	MÉTODO DE CAPTURA ÓPTICA DE MOVIMENTO	40
3	METODOLOGIA	46
3.1	CALIBRADOR HIDRODINÂMICO.....	46
3.2	EXPERIMENTO: MONTAGEM E EQUIPAMENTOS.....	47
3.2.1	Calibração	49
3.3	EXPERIMENTO: PROCEDIMENTO	50
3.3.1	Metodologia de Análise	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – Rotina Matlab	75
	APÊNDICE B – Resultados para todos os pares de sensores.....	78

1 INTRODUÇÃO

As primeiras teorias envolvendo o estudo das ondas dos oceanos datam do século XIX, e devido a sua complexidade, maneiras de estimar seus parâmetros, modos de geração e dispersão, são estudados até os dias atuais. As ondas são definidas em Roditi (2005), como um fenômeno que consiste numa perturbação periódica que se propaga num meio material ou no espaço, transportando energia e não massa. Devido a essas características as ondas que se propagam nos oceanos (meio material) apresentam uma vasta forma de energia, tornando-as grande foco de pesquisa nas áreas de engenharia, desde sua interação com estruturas fixas ou que se deslocam pelos oceanos, até como fonte geradora de energia renovável (FALCÃO, 2009).

Os aspectos que envolvem o estudo de ondas podem ser divididos em três frentes, como apresentado em Massel (2018), uma que se destina puramente ao problema matemático, (STOKES, 1847, 1880; LAMB, 1932 entre outros); o segundo é destinado aos estudos da dinâmica das ondas, com principal foco na estimativa das cargas resultantes das ondas nas estrutura em alto mar e costeiras. Esse aspecto é tratado nas engenharias naval, oceânica e costeira, e nos estudos de Sarpkaya e Isaacson (1981), Dean e Dalrymple (1991), e outros apresentados neste trabalho. O último aspecto é mais recente, e se deve ao estudo dos efeitos climáticos no planeta. Diz respeito as interações entre atmosfera e oceano, e as trocas energéticas que ocorrem e sua influência na temperatura da terra, assim como nas trocas de oxigênio e nutrientes entre as camadas dos oceanos (BABANIN, 2011; BHASKARAN, 2019).

Para as engenharias, considerando o aspecto dinâmico, as ondas de gravidade são de maior interesse por serem responsáveis pela grande maioria das cargas impostas as estruturas de alto mar, tornando o estudo dessas interações vital para segurança e economia dos projetos das estruturas. Cada campo da engenharia se dedica as suas características de interesse da onda, e isso influencia diretamente no tipo de instrumentação utilizada.

Para os estudos de estruturas em alto mar e costeiras a criação de uma base de dados de onda se faz necessária, normalmente denominada metocean (abreviação silábica para meteorologia e oceanografia), reúne dados de vento, temperatura do ar, umidade, nível da água, estados de mar, entre outros. As ondas são caracterizadas por estatísticas de altura da onda,

período, direção de propagação e espectro. Nesses casos, a medição das ondas pode ser feita utilizando diversos equipamentos. Para medição no local tem-se o sistema de “bastão”, tipicamente composto por um ou dois cabos elétricos, podendo ser resistivo, capacitivo ou por transmissão de corrente; outro modelo é a boia, equipada com acelerômetros e sensores de direção.

Para medições indiretas tem-se o sensor de pressão, instalado abaixo da superfície da água, e o perfilador de corrente Doppler acústico (ADCP, *Acoustic Doppler Current Profilers*), o qual emite feixes de sinais acústicos e pelo efeito Doppler medem as velocidades orbitais da onda nesse feixe, em diferentes camadas. Usando um sistema ADCP medindo duas componentes de velocidade, juntamente com o um sensor de pressão (método P-U-V) é possível determinar as características de ondas direcionais.

Outros sistemas remotos também são utilizados, como o radar de microondas, laser e o radar de alta frequência. Esses sensores são avaliados no estudo realizado pela DNV GL, em colaboração com o BOEM (*Bureau of Ocean Energy Management*) em 2018, sob o título *Metocean Characterization Recommended Practices for U.S. Offshore Wind Energy*. Para embarcações projetadas para atravessar oceanos, sistemas embarcados que preveem os deslocamentos do navio com base na medição de ondas também são utilizados, como visto em Giron-Sierra e Jimenez (2010).

Contudo o estudo da superfície dos oceanos não se limita a apenas as áreas relacionadas ao ambiente marítimo, como reflete o artigo de Katz (1964). Devido ao interesse na propagação de ondas de rádio, quando emitidas através dos oceanos, surgiu a necessidade de compreender a transferência de momento da atmosfera para a superfície da água, resultando no desenvolvimento de um instrumento para medição de ondas com o uso do sistema de radar.

Os dados coletados pelos sensores mencionados são específicos para cada região onde esses instrumentos são aplicados. Essas informações são então utilizadas para determinar as cargas que estruturas em alto mar sofrem por influência do meio em que se encontram. Os dados do metocean são então aplicados para as análises das estruturas em ensaios de modelos, em escala reduzida, em bases oceânicas. Bases oceânicas são tanques de prova compostos por sistemas de geração e absorção de ondas, as quais fazem extenso uso de sensores para a medição da elevação de superfície de ondas. A principal função desses sensores nos tanques é a retroalimentação do sistema de controle para garantir a absorção ativa das ondas geradas. Porém, em alguns casos se faz necessário a medição das ondas entre as estruturas ensaiadas, ou

próximas aos modelos, para caracterizar a relação fluido-estrutura, tornando o uso de alguns modelos de sensores ineficaz.

Atualmente os sensores mais utilizados são os capacitivos, devido a sua praticidade e precisão, porém apresentam algumas limitações referentes as interferências das características da água, assim como eletromagnéticas. O sensor de ultrassom não apresenta tais desvantagens, por depender apenas da velocidade de propagação do som na água, e como esse fator é afetado pela temperatura da água, a qual não varia muito, apresenta maior confiabilidade. Contudo, dependendo da posição do sensor o pulso enviado não é refletido diretamente ao transdutor, sendo necessário a utilização de um guia de ondas, o que torna esses sensores muito intrusivos para serem instalados em determinados teste, pois sua presença poderia alterar a propagação das ondas, assim como a interação fluido estrutura dos modelos ensaiados nos tanques de testes.

A interferência das propriedades da água, e as algumas das limitações físicas de se introduzir os sensores no fluido avaliado, faz com que o uso de sensores por radar ou imagem sejam uma alternativa cada vez mais atrativa. Diversos estudos têm sido realizados com a utilização desses sistemas para monitorar as ondas em alto mar, contudo sua aplicação em laboratórios não é extensamente avaliada. Em 2009 alguns trabalhos surgiram no âmbito de validar tais sistemas para aplicação em laboratórios, entre eles Payne et al. (2009), onde um sistema óptico é desenvolvido utilizando o reflexo de um laser na superfície da água. Outro trabalho, de extrema importância para o presente desenvolvimento foi apresentado por Fugarra et al. (2009), onde o sistema empregado é o de captura de movimento, o mesmo utilizado neste trabalho, e será abordado em maior detalhe a seguir. O sistema de rastreamento de imagem, ou captura óptica, é uma das técnicas não intrusivas aplicadas em laboratório, porém não para a medição das características da onda.

O sistema de captura óptica de movimento é amplamente utilizado nas áreas da biomecânica, esporte de alta performance, engenharia e entretenimento (TOMASEVICZ et al., 2019; ZHU et al., 2018; BURGER; PUUPPONEN; JANTUNEN, 2018; MENACHE, 2010). Com o avanço da tecnologia esse sistema permite a determinação da posição de objetos que se movimentam rapidamente com uma alta precisão. Composto por câmeras de captura de movimento, alvos infravermelhos e programas para tratamento e análise dos dados, o sistema é

de fácil montagem e flexível, podendo ser utilizado nos mais diversos formatos de corpos e posições, não afetando o objeto em estudo.

Dentro da engenharia esse sistema pode ser aplicado em operações de maquinário, cibernética, aerodinâmica, sistemas de controle, robótica, e sistemas marinhos e submarinhos. Na área naval já são aplicados no rastreamento do movimento de corpos em condições de onda, correnteza e vento diferentes, normalmente rastreando deslocamentos com seis graus de liberdade, em bases oceânicas e tanques de reboque.

Este trabalho analisa a utilização do sistema óptico para medição da altura de onda. Os objetivos almejados nesse trabalho são expostos no item seguinte, seguidos de uma revisão bibliográfica. Nesta revisão primeiramente é abordada a teoria de ondas, focando principalmente em ondas de gravidade, e na teoria linear, ou de Airy, principal simplificação utilizada quando se estuda ondas de superfície. Uma breve introdução aos sistemas mais utilizados de medição de onda é realizada, discorrendo sobre os sensores resistivos, capacitivos e ultrassônico, com um breve resumo das características de cada um e suas vantagens e desvantagens. O sistema óptico é apresentado e seguido pela metodologia aplicada para o desenvolvimento deste trabalho. A demonstração dos resultados, e conclusões compõe os capítulos finais do presente trabalho.

1.1 OBJETIVOS

No desenvolvimento de um trabalho de pesquisa é necessário estabelecer claramente qual é o resultado desejado com essa iniciativa, para que a mesma seja produtiva. Para tanto, um objetivo geral, num âmbito macro, é estabelecido e, conseqüentemente, são definidos os objetivos específicos com maior detalhamento das ações necessárias para atingí-lo.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e validar os resultados obtidos com o sistema de medição de ondas por rastreamento óptico para futuras aplicações em experimentos navais e oceânicos em escala reduzida, conduzidos em tanques de provas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Investigar as vantagens e limitações dos métodos utilizados para a medição de ondas por meio de uma revisão bibliográfica.

Realizar um experimento comparando as respostas de um sistema já consolidado, neste caso o sensor capacitivo, com o novo equipamento proposto de um sistema de rastreamento óptico de alvos flutuantes;

Realizar o experimento com ondas regulares e irregulares, para qualificar os resultados obtidos tanto no domínio do tempo, comparação das séries temporais, como no domínio da frequência para as características estatísticas das ondas;

Identificar as limitações que restringem o novo sistema e quais futuras investigações se fazem necessárias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

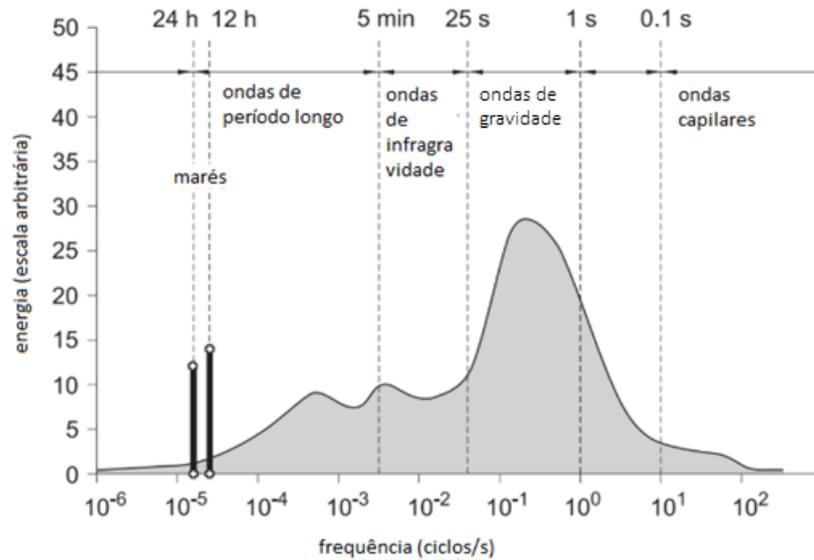
Tendo em vista o tema abordado se faz necessário a revisão de alguns conceitos importantes para o desenvolvimento adequado deste trabalho. Para tanto será revisado o conceito de onda, suas principais características, assim como a teoria de onda e quais aproximações são comumente aplicadas em análises, sendo a principal a teoria linear que geralmente é aplicada aos sensores de onda. Maior foco é dado ao estudo de ondas de gravidade, com atenção especial para ondas planas progressivas.

Uma breve revisão é feita referente aos principais métodos de medição de ondas aplicados em experimentos envolvendo o estudo de ondas oceânicas. São eles, resistivo, capacitivo e acústico, os modelos apresentados são baseados em sensores que podem ser encontrados nos laboratórios brasileiros. Para finalizar a revisão uma introdução ao sistema óptico e sua aplicabilidade.

2.1 TEORIA DE ONDAS

As ondas presentes no oceano podem ser classificadas em cinco tipos, sonoras, capilares, gravidade, internas e planetárias. As sonoras decorrem da compressibilidade da água, sendo muito pequenas, a combinação de da turbulência do vento e da tensão superficial gera ondas capilares curtas de alta frequência. A variação no equilíbrio do potencial de vorticidade, devida a mudanças de profundidade ou latitude geral ondas planetárias, ou Rossby, que são lentas e de larga escala, por fim, a força da gravidade agindo nas partículas da água na superfície ou em um ponto interno do fluido geram as ondas de gravidade, ou internas respectivamente (Massel, 2018). A Figura 1 a seguir representa as faixas de período e frequência referentes a cada tipo de onda, e representa a importância deles com uma escala de energia, que não reflete quantitativamente a energia da onda, serve apenas par efeito comparativo entre os mesmos.

Figura 1 Tipos de geração de ondas, faixas de frequência e energia contida



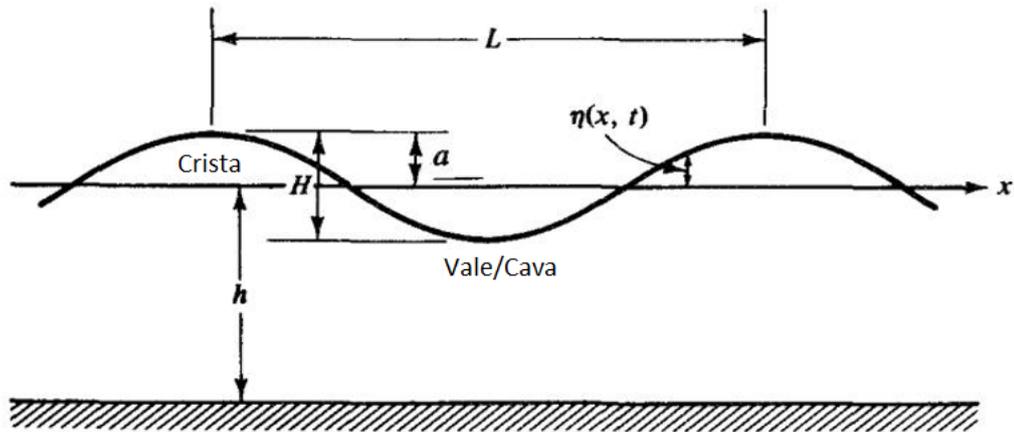
Fonte: Adaptado de Massel (2018).

O foco desse estudo, como apresentado em Elmore e Heald (1969), são as ondas que ocorrem na interface água-ar sob a influência da gravidade, denominadas ondas de gravidade. Segundo Chakrabarti (1987), a maior parte das teorias de ondas utilizadas para projetos de estruturas oceânicas são baseadas em parâmetros específicos do ambiente; a profundidade da água, a altura da onda e a sua periodicidade. Ao contrário das ondas que ocorrem nos oceanos, todas as teorias de ondas em água consideram que as ondas são periódicas e uniformes, e as aqui apresentadas ainda consideram um fundo plano e com profundidade uniforme e constante.

2.1.1 Características de Ondas

Segundo Dean e Dalrymple (1991), os principais parâmetros para descrever uma onda são seu comprimento, altura e a profundidade da água onde ela se propaga, os outros parâmetros podem ser determinados a partir desses.

Figura 2 Características da Onda



Fonte: Adaptado de Chakrabarti (1987)

O comprimento da onda, L , é determinado pela distância entre duas cristas sucessivas da onda, ou duas cavas. A altura, H , pela distância entre o ponto mais alto (na crista) e o ponto mais baixo (na cava), como mostra a figura acima (Figura 2).

O comprimento de onda pode ser relacionado com a profundidade da água, h , e com o período da onda, T , determinado pelo tempo que leva para duas cristas sucessivas passarem por um ponto fixo. Com isso pode-se determinar a velocidade com que a onda se propaga, também denominada de celeridade, $C = L/T$.

Existe certa variedade de teorias de onda, as quais são aplicadas para diferentes situações dependendo das condições onde a onda se propaga, para poder avaliar a movimentação da onda e qual teoria utilizar é necessário desenvolver as equações que tratam a hidrodinâmica de um fluido ideal.

2.1.2 Hidrodinâmica da onda

Segundo Elmore e Heald (1969) as equações que descrevem as características hidrodinâmicas das ondas podem ser divididas em três categorias: (1) equações essencialmente cinemáticas; (2) uma equação que expressa a conservação da massa quando um fluido se desloca, *equação da continuidade*; (3) uma equação dinâmica, *equação de Bernoulli*, que sumariza a aplicação da segunda lei de Newton para fluidos.

Seguindo a abordagem em Chakrabarti (1987), ao desenvolver a teoria de ondas a água é assumida como incompressível e o fluxo é contínuo. A equação da continuidade da origem a equação diferencial básica do movimento da onda. Como o fluido é considerado incompressível a expressão equivale a conservação do volume, que nos termos da velocidade do fluido ficam

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

onde u , v , e w são as três componentes de velocidade de uma partícula do fluido, num sistema de coordenadas cartesianas $OXYZ$. Escrevendo a velocidade como um vetor, $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$, a equação de continuidade ficará,

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.2)$$

A velocidade e aceleração da partícula do fluido, cinemática, pode ser tratada nas funções de fluxo e de potencial, as quais devem satisfazer a equação da continuidade. A função de fluxo, *stream function*, considera apenas duas dimensões, OXY , o que faz com que a crista da onda seja infinitamente longa e não varie em Z . Levando em conta a variação no tempo, a função de fluxo, $\Psi(x, y, t)$, é introduzida de modo que

$$u = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (2.3)$$

e

$$v = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2.4)$$

A equação da continuidade fica então

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} = 0 \quad (2.5)$$

A existência de uma função de fluxo implica na satisfação da continuidade e vice e versa, além disso, $\Psi = \text{constante}$ define uma linha de corrente.

A função de potencial, ou potencial de velocidade Φ , implica no movimento irrotacional, sendo assim,

$$\mathbf{V} = -\nabla \Phi \quad (2.6)$$

Substituindo na equação da continuidade temos a equação de Laplace,

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.7)$$

Para a solução da cinética da onda, pressão e forças, a equação de Bernoulli é utilizada. Partindo da equação de Navier-Stokes, ou aplicando a segunda lei de Newton, e aplicando as suposições de que o fluxo é irrotacional e fluido ideal, temos a equação de Bernoulli.

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + p + \rho g y + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = f(t) \quad (2.8)$$

onde $f(t)$ é uma função qualquer. Como mencionado anteriormente, se o fluxo for considerado contínuo e estável, ou seja $\partial \Phi / \partial t = 0$, a equação fica,

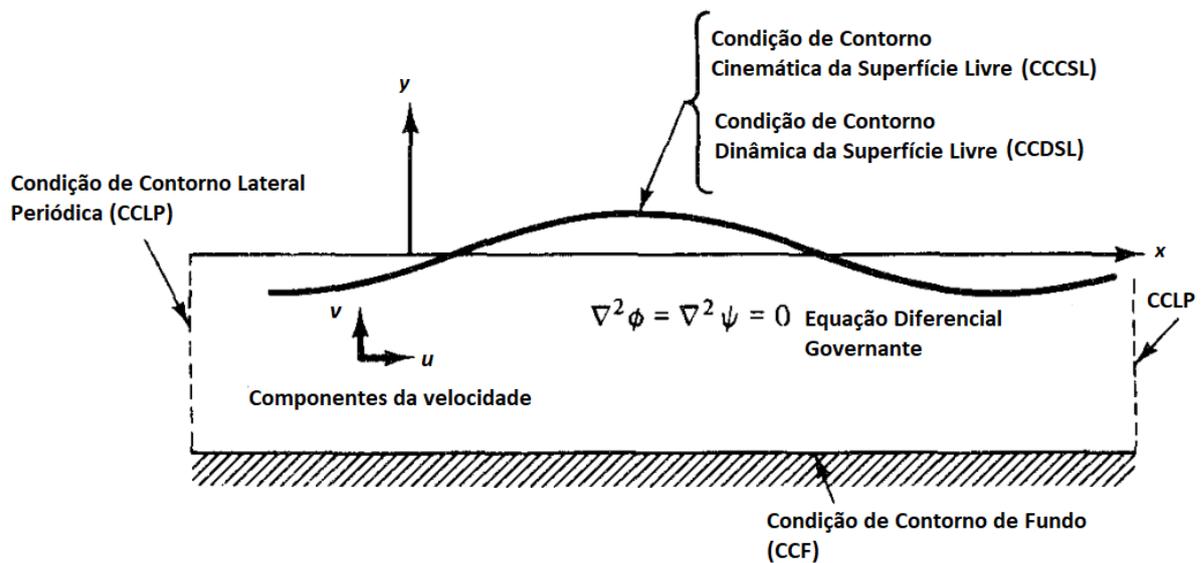
$$p + \rho g y + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) = \text{constante} \quad (2.9)$$

Como todo problema de valor limite, além das equações diferenciais são necessárias condições de contorno que permitam o desenvolvimento de solução, utilizados na elaboração das teorias de onda.

2.1.2.1 Condições de Contorno

As condições de contorno são apresentadas em Dean e Dalrymple (1991) e resumidas em Carneiro (2007), na forma apresentada na Figura 3, onde as condições de contorno estão aplicadas a uma onda que se propaga na interface água-ar.

Figura 3 Condições de Contorno para Ondas Progressivas



Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple (1991).

Como o fundo é considerado plano, aplica-se a condição de velocidade vertical nula, condição de contorno do fundo (CCF):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \text{ em } y = -h \quad (2.10)$$

O valor de h é negativo pois a origem do sistema está na superfície da água. Na superfície livre são aplicadas duas condições, condição de contorno cinemática na superfície livre (CCCSL) e a condição de contorno dinâmica da superfície livre (CCDSL).

A CCCSL dita que se uma partícula está na superfície livre em um determinado instante de tempo, a mesma irá permanecer na superfície livre, ou a componente normal da velocidade das partículas da superfície é a mesma da velocidade da componente normal ao contorno do fluido, onde η é a superfície livre da água,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \text{ em } y = \eta(x, t) \quad (2.11)$$

A CCDSL determina que a pressão relativa é constante, o que significa que a pressão atmosférica fora do fluido é constante, sendo derivada da equação de Bernoulli na forma,

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \text{ em } y = \eta(x, t) \quad (2.12)$$

A condição de contorno lateral periódica (CCLP), representada espacial e temporal, o que implica na periodicidade do escoamento:

$$\Phi(x, t) = \Phi(x + L, t) \quad (2.13)$$

$$\Phi(x, t) = \Phi(x, t + T) \quad (2.14)$$

Estabelecidas as condições de contorno o desenvolvimento das teorias de onda depende da determinação do potencial de velocidade, Φ , para um caso bidimensional a equação diferencial fica,

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.15)$$

e assim o potencial de velocidade deve satisfazer as condições de controle apresentadas acima e a equação de Laplace. A solução desse problema não é simples, visto que as condições de contorno são não-lineares e devem ser satisfeitas para a superfície livre que muda constantemente. Uma das maneiras mais simples e útil de resolver o problema é a utilização da teoria de pequena amplitude, ou teoria de Airy. Como visto em Chakrabarti (1987), ela se baseia

na suposição de que a amplitude da onda é pequena se comparada ao comprimento da onda ou a profundidade, com isso as condições de contorno da superfície livre podem ser linearizadas quando os termos além da primeira ordem são desconsiderados.

2.1.3 Teoria Linear de Ondas

Também conhecida como teoria de Airy, ou onda senoidal, a solução para o potencial de velocidade é assumida na forma de série de potências de uma perturbação não dimensional ε , que é definida nos termos da declividade da onda (H/L) como

$$\varepsilon = \frac{kH}{2} \quad (2.16)$$

onde k é o número de onda, $k = 2\pi/L$. Assim, o potencial pode ser escrito como,

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad (2.17)$$

De forma similar o perfil de onda, ou forma da superfície livre, η , é definido como,

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta_n \quad (2.18)$$

Considerando apenas o primeiro termo das séries e aplicando as condições de contorno da superfície livre, combinando as respostas tem-se,

$$\eta_1 = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \right) \text{ em } y = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

Para uma onda progressiva com velocidade c , a periodicidade é dada por $\alpha = x - Ct$, solucionando o problema de valor limite com a separação de variável o potencial pode ser escrito da forma,

$$\Phi_1 = Y(y)\Lambda(\alpha) \quad (2.21)$$

aplicando a condição inicial de que em $x = 0$ e $t = 0$, $\eta_1 = H/2$, a expressão para o potencial de velocidade de primeira ordem, $\Phi = \varepsilon \Phi_1$, fica,

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} \text{sen } \theta \quad (2.22)$$

onde $\omega = kc$, frequência da onda, e $\theta = k(x - Ct)$.

Pela Equação (2.19) temos,

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta \quad (2.23)$$

Substituindo o valor de Φ na equação combinada das condições de contorno, Equação (2.20), é obtida a relação de dispersão,

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (2.24)$$

A relação de dispersão pode ser escrita em função da velocidade da onda, ou celeridade, visto que $c = \omega/k$, assim,

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \quad (2.25)$$

Indicando que ondas com períodos diferentes se propagam com velocidades diferentes, sendo assim, numa situação onde mais de uma onda está presente a onda com maior período viajará mais rápido (CEM, 2002). A relação de dispersão da onda descreve, então, a maneira como um campo de ondas progressivas, constituído de várias frequências irá se separar, ou dispersar devido as diferentes velocidades de cada frequência diferente (Dean e Dalrymple, 1991).

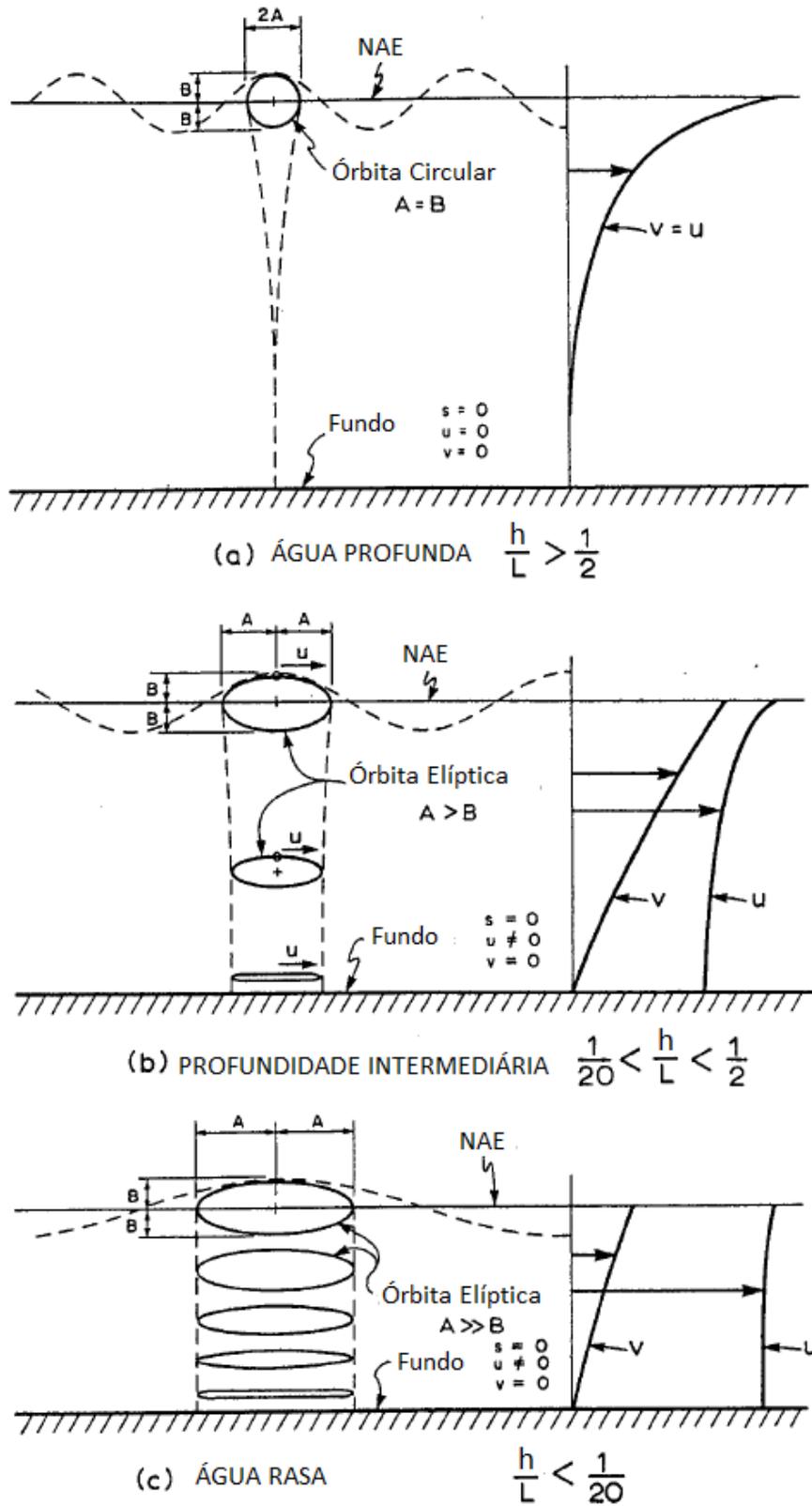
O comprimento de onda, L , pode então ser escrito como,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh \quad (2.26)$$

O comprimento de onda é dependente do período, T , e da profundidade, k , e como $k = 2\pi/L$, o comprimento não pode ser obtido diretamente e requer um processo iterativo, partindo do valor de comprimento de onda para águas profundas. Uma simples aproximação considera $L = L_0 [\tanh(2\pi h/L_0)]^{1/2}$, sendo L_0 , o comprimento de onda para águas profundas.

O comprimento de onda para águas profundas pode ser obtido quando o valor de kh tende ao infinito, com isso a $\tanh kh \approx 1$, esta suposição é válida, com um erro menor que 0,4%, para valores de $kh > \pi$, assim como $\tanh kh \approx kh$ para valores de $kh < \pi/10$ (Chakrabarti, 1987). Essa relação da profundidade com as características da onda influencia a trajetória das partículas, como pode ser visto na Figura 4. Conforme a profundidade diminui a órbita realizada pela partícula passa de uma forma circular para uma forma elíptica, quanto mais próximo ao fundo mais achatada a órbita, e com isso os perfis de velocidade vertical e horizontal se diferenciam.

Figura 4 Influência da profundidade relativa na trajetória de uma partícula na onda.



Fonte: Adaptado de Chakrabarti (1987).

Dessa forma a teoria linear permite o uso de algumas simplificações em função da profundidade relativa, h/L , como mostra o Quadro 1, retirado de Mello (2002).

Quadro 1 Simplificação para a teoria linear em função da profundidade relativa

Condição	Limites	Simplificação assintótica	L	C
Águas Rasas	$\frac{h}{L} < 1/20$ $kh < \pi/10$	$\tanh kh \approx kh$	$L = \frac{gT^2 kh}{2\pi}$	\sqrt{gh}
Águas Intermediárias	$1/20 < \frac{h}{L} < 1/2$ $\pi/10 < kh < \pi/2$	$\tanh kh$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$
Águas Profundas	$\frac{h}{L} > 1/2$ $kh > \pi/2$	$\tanh kh \approx 1$	$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$	$C_0 = \frac{gT}{2\pi}$

Fonte: Adaptado de Mello (2012).

Diferenciando a equação do potencial para x e y , temos as velocidades para uma partícula de água na onda, e posteriormente no tempo, as acelerações, como segue,

$$u = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} \cos \theta \quad (2.27)$$

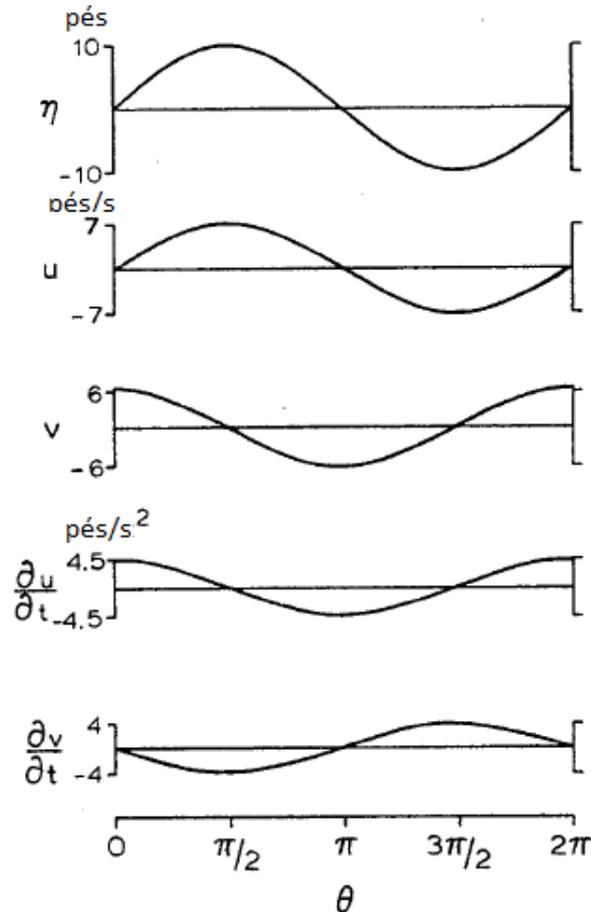
$$v = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\sinh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} \sin \theta \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{gkH}{2} \frac{\cosh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} \sin \theta \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{gkH}{2} \frac{\sinh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} \cos \theta \quad (2.30)$$

A Figura 5 apresenta um exemplo das velocidades e acelerações de uma onda, comparada com a sua elevação, de acordo com a teoria linear. A altura de onda é de 10 pés, o período de 10 segundos e a profundidade de 100 pés, as quantidades são computadas para $x = 0$ no nível estável da água (NEA). É possível notar que u e $\partial v/\partial t$ estão em fase e deslocadas 180° em relação ao perfil da onda, enquanto v e $\partial u/\partial t$ estão deslocadas 90° .

Figura 5 Exemplo de perfil de onda e das propriedades cinemáticas e dinâmicas.



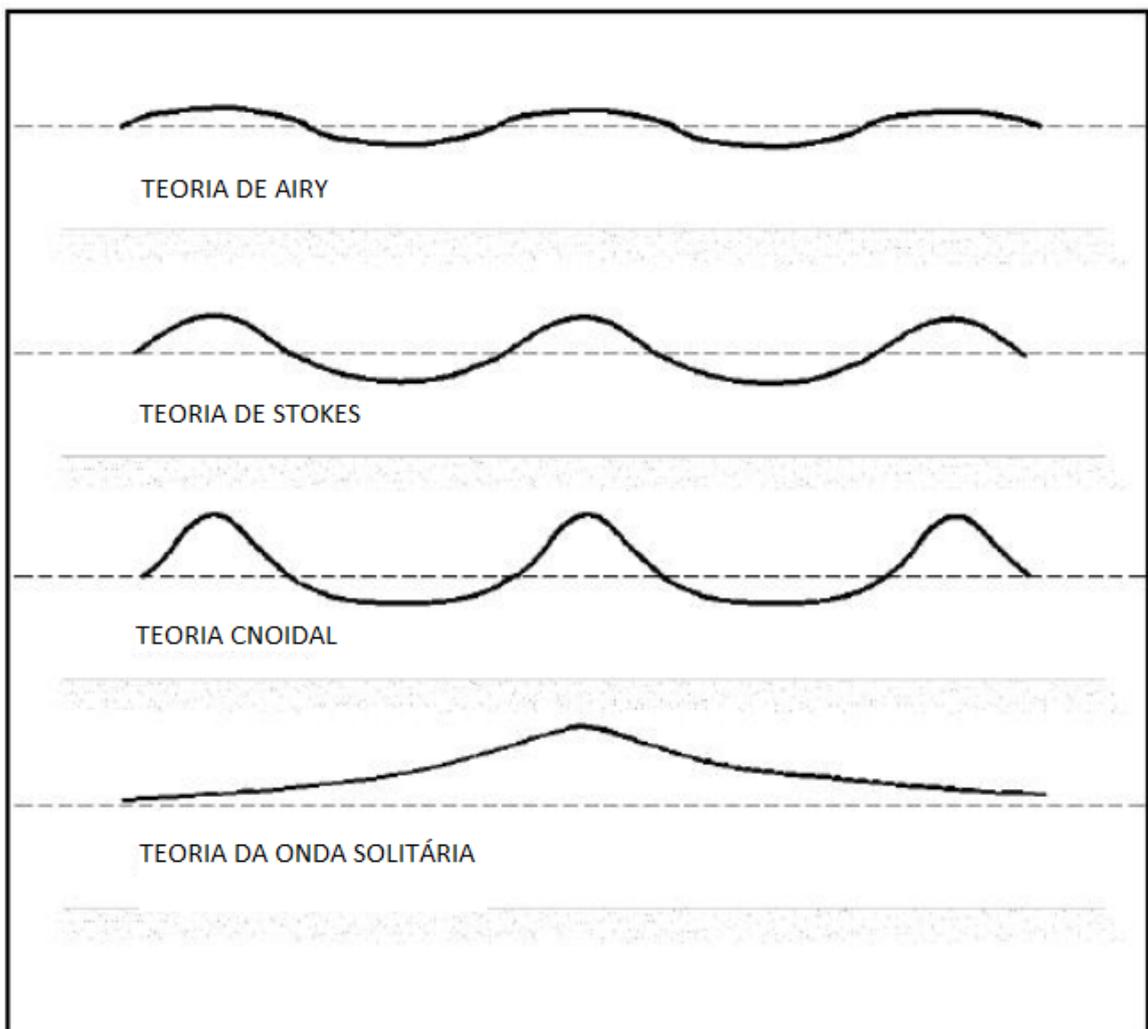
Fonte: Adaptado de Chakrabarti (1987).

A validação analítica da teoria não garante que ela represente da melhor maneira o fenômeno físico, por isso se faz necessário a comparação com dados experimentais. A teoria linear fornece um perfil de onda simétrico em relação ao nível estável da água, como pode ser visto na Figura 6, outras teorias não lineares acrescentam assimetrias na forma da crista e cava, essas diferenças ficam mais evidentes para teorias de maior ordem (Chakrabarti, 1987).

Uma das maneiras de validar analiticamente uma teoria é determinar o quão bem ela satisfaz as duas condições de contorno da superfície livre, Dean (1968) apresenta uma análise dos erros adimensionais para as diversas teorias considerando as condições de contorno cinemáticas e dinâmicas da superfície livre. Já a validade experimental é baseada na correlação dos perfis de pressão dinâmica, apresentados em Chakrabarti (1980), onde a teoria linear se mostrou aplicável além do limite previamente estabelecido pela validade analítica.

O estudo desenvolvido nesse trabalho abordará inicialmente a questão das ondas regulares que se enquadram no perfil de água profunda, $h/L > 1/2$, e para tanto a teoria linear é satisfatória, contudo, mais detalhes sobre as outras teorias podem ser vistos em Elmore e Heald (1969), Dean (1968), Dean e Dalrymple (1991), Chakrabarti (1980,1987), entre outros estudiosos da hidrodinâmica de ondas.

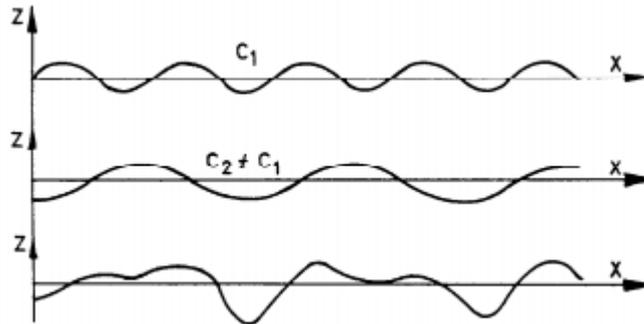
Figura 6 Perfil da onda de gravidade para as diversas teorias de onda.



Fonte: Adaptado de CEM (2002).

As ondas irregulares podem ser tratadas como a soma de várias ondas regulares, como apresenta a Figura 7, onde as ondas regulares c_1 e c_2 são somadas obtendo uma onda irregular.

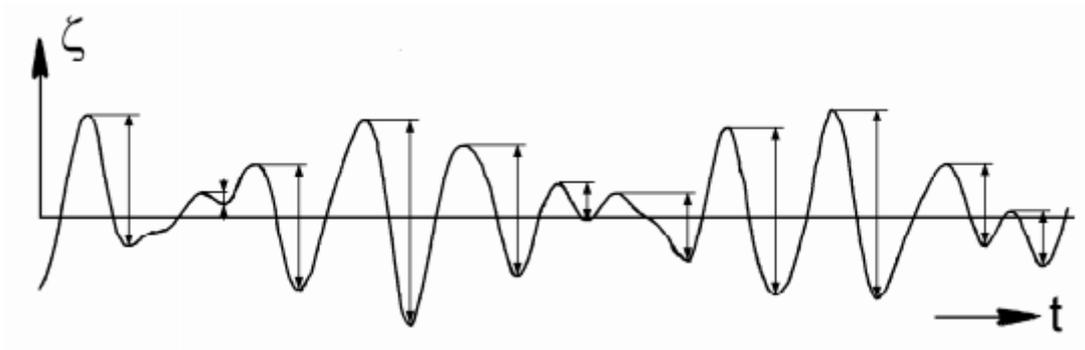
Figura 7 Superposição de duas ondas unidirecionais regulares.



Fonte: Journée; Massie, 2001

Com isso as ondas irregulares apresentam diferentes alturas de onda e períodos, como representado na Figura 8.

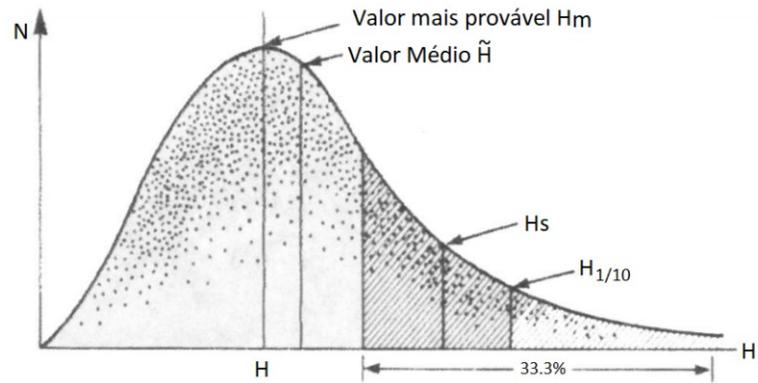
Figura 8 Registro no tempo de um mar irregular com as diversas alturas de onda.



Fonte: Journée; Massie, 2001

Alguns parâmetros para as ondas irregulares podem ser obtidos com análises estatísticas simples, como o período médio de zero ascendente, T_z e a altura de onda significativa, $H_{1/3}$ ou H_s , definida como a média de $1/3$ dos valores de pico (Figura 9). Os parâmetros, como a altura de onda por exemplo, podem ser classificados de acordo com a distribuição que seguem, como a Gaussiana e Rayleigh.

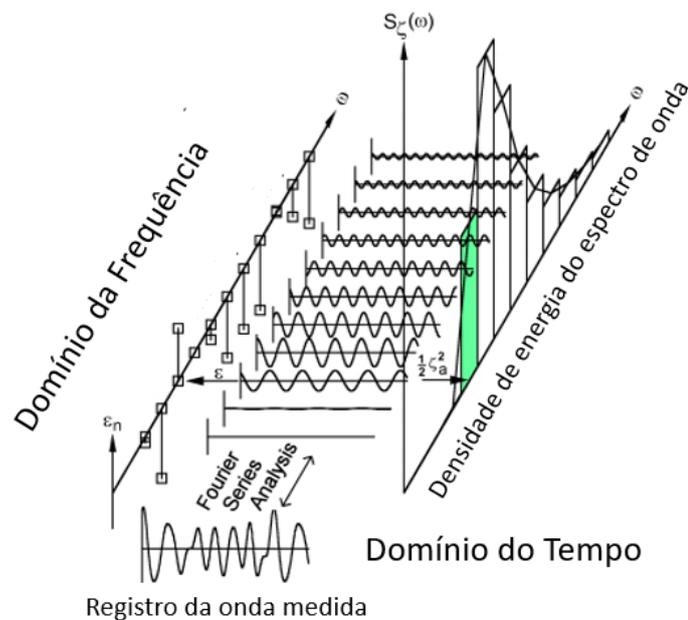
Figura 9 Definição da altura de onda para ondas irregulares.



Fonte: Adaptado de Bretschneider, 1964

Como as ondas irregulares apresentam um somatório de ondas regulares o meio mais comum de acessar seus parâmetros se faz utilizando a análise dos espectros de onda. Para isso o sinal é transformado para o domínio da frequência, e assim as amplitudes e a quantidade de energia envolvida em cada onda regular que faz parte do somatório pode ser identificada, como vista na Figura 10.

Figura 10 Análise do registro de onda irregular



Fonte: Adaptado de Journée; Massie, 2001

Quando se fala de mares normalmente se refere ao espectro que melhor se aproxima desse mar, e o mais comum é o JONSWAP. JONSWAP foi um programa dedicado a determinar as características do Mar do Norte, aprovado pelo ITTC é um dos mais aplicados em análises se ondas irregulares. O espectro é definido pela equação,

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320H_{1/3}^2}{T_P^4} \omega^{-5} \exp\left\{\frac{-1950}{T_P^4} \omega^{-4}\right\} \gamma^A \quad (2.31)$$

$$A = \exp\left\{-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_P} - 1}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right\} \quad (2.32)$$

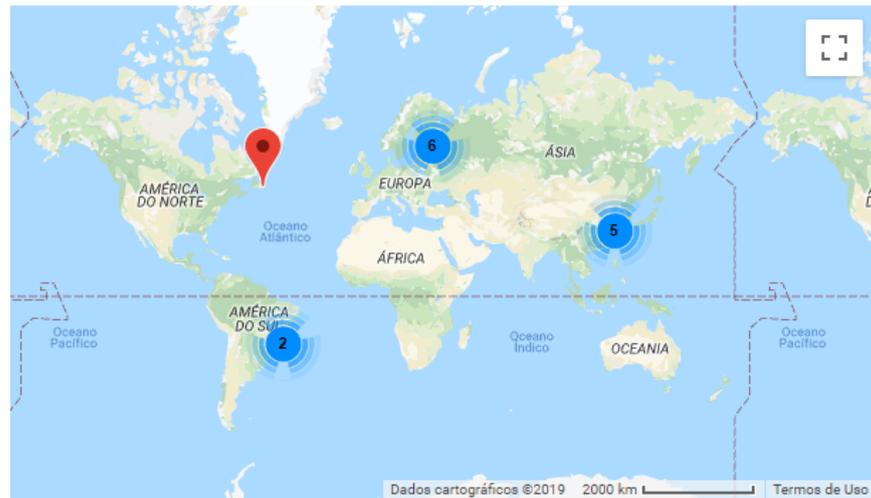
Onde γ representa o fator de intensificação da resposta de pico.

2.2 SENSORES PARA MEDIÇÃO DA ALTURA DE ONDA

Sensores são dispositivos que respondem a um estímulo físico em uma grandeza que pode ser manipulada, normalmente proveniente de outra forma física da medida. São ferramentas que permitem controlar ou monitor sistemas, de forma passiva para não causar distúrbios no sistema aplicado.

Estes dispositivos são amplamente utilizados na engenharia oceânica e naval, tanto em medições em campo quanto em ambientes controlados durante experimentos. Nos experimentos realizados em tanques de reboque e bases oceânicas é de extrema importância garantir a qualidade da onda gerada, e que a mesma represente com precisão os espectros selecionados para os ensaios. Isso torna a medição das ondas para controle do processo essencial. De acordo com o ITTC (International Towing Tank Conference), existem no mundo 14 bases oceânicas, em sua maioria na Europa e Ásia (Figura 11), no Brasil temos o LabOceano na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e o Tanque de Provas Numéricas (TPN) da Universidade de São Paulo (USP). Em sua maioria, esses laboratórios apresentam sistemas de medição para a altura de onda na forma de sensores resistivos, capacitivos e em alguns casos acústicos, mais comum por ultrassom.

Figura 11 Bases Oceânicas pelo Mundo



Fonte: Disponível em <<https://itc.info/facilities/>>.

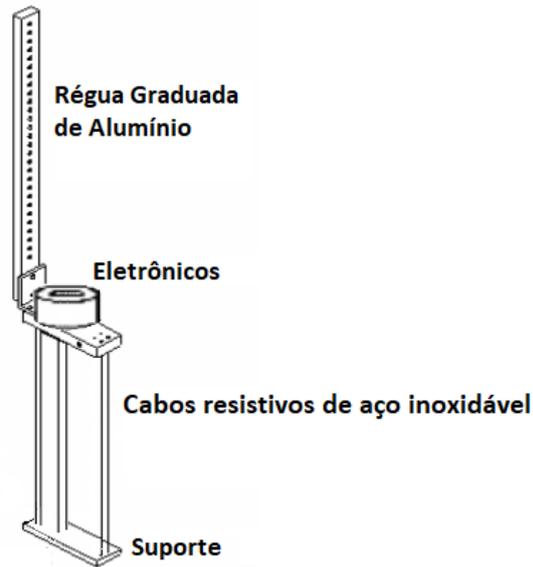
Como a demanda por sensores para medição de onda no Brasil é baixa, os laboratórios em geral tem que importar os dispositivos, ou desenvolvê-los (MARTINS et al., 2007). Neste tópico será abordado algumas características dos principais sensores, assim como suas vantagens e desvantagens. Como já comentado nesse trabalho e visto nas obras de Carneiro (2007) e Mello (2012), esses sensores são de extrema importância para a realimentação dos sistemas de controle da absorção ativa de ondas, assim como para monitorar a altura de ondas durante a realização de experimentos, e analisar a interferência das estruturas no deslocamento do fluido.

2.2.1 Sensor Resistivo

Como o nome já indica, esse sensor muda a sua condutividade conforme a altura da coluna de água sobe ou desce em relação ao sensor, causando uma mudança na tensão, a qual pode ser convertida para o deslocamento do fluido.

Segundo apresentado em Carneiro (2007), os sensores resistivos são formados por um par de eletrodos verticais parcialmente imersos na água, os quais têm como saída uma tensão proporcional ao comprimento imerso. A Figura 12 apresenta um esquema desse tipo de sensor.

Figura 12 Esquema representativo do sensor resistivo.



Fonte: Adaptado de Martins et al. (2007).

Martins et al. (2007) descreve a os componentes eletrônicos, analógicos, divididos em dois grupos, o primeiro contendo uma fonte de energia, conversor, amplificador e modulador, dentro de um container resistente a água. A segunda composta de um demodulador e ganho variável, filtro, ajuste zero e amplificador na banca dos instrumentos. Cada sensor tem a sua frequência de operação, o que permite que muitos sejam usados ao mesmo tempo com pouca interferência sem acionar outro componente eletrônico de outro instrumento na bancada.

A calibração pode ser feita manualmente ou automática, utilizando a régua graduada ou o sensor de deslocamento como referência, o sinal é então tratado por um programa de computador que fornece os valores para o ganho de calibração, este sensor apresenta uma resolução melhor que 1mm.

Estes sensores sofrem grande influência da condutividade da água, que por sua vez sofre alterações dependendo da temperatura e presença de contaminantes na água. Por isso deve ser calibrado sempre antes da realização do experimento. Além da interferência por condutividade, também existe um erro de leitura referente a tensão superficial da água, a qual insere um erro na medição da elevação, pois a água permanece mais tempo aderida ao sensor, causando uma histerese na resposta, como comentado por Carneiro (2007) e Mello (2012).

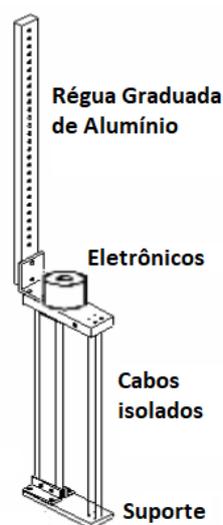
2.2.2 Sensor Capacitivo

Os eletrodos capacitivos por sua vez medem a variação na voltagem conforme a capacitância do sensor varia, de acordo com a altura da coluna de água na qual está imerso. De acordo com Whittenbury, Huber e Newell (1959), um metal dielétrico-isolado, quando colocado em contato com a água age como um capacitor variável, formado entre haste metálica e a água. A capacitância passa a ser linearmente dependente da profundidade que está imersa, considerando que o isolamento da haste é uniforme.

De construção semelhante ao resistivo, apresenta a vantagem de possuir eletrodos isolados, diminuindo a interferência entre os eletrodos, e permitindo assim a utilização de mais sensores operando na mesma frequência de operação (CARNEIRO, 2007).

O princípio de operação do sistema considera o eletrodo e a água como as placas de um capacitor, e a isolação como o dielétrico (Figura 13). A voltagem é então gerada pela diferença entre o eletrodo isolado e o outro eletrodo terra imerso em água. A altura da onda é medida através da medida do tempo que demora para o capacitor atingir um certo percentual da sua capacidade de carga. Esse tempo é relacionado com a capacitância e indiretamente com a mudança do trecho imerso.

Figura 13 Esquema representativo de um sensor capacitivo.



Fonte: Adaptado de Martins et al. (2007).

Ainda de acordo com Chakrabarti (1994), esses sensores possuem uma resposta linear superior ao resistivo, possuindo um erro menor que um por cento, sendo capaz de medir oscilações de 6 milímetros na amplitude da água.

Porém, assim como o resistivo apresenta o problema de histerese, devido a tensão superficial da água, pois alguns contaminantes podem prejudicar a propriedade hidrofóbica dos eletrodos, fazendo com que a água demore mais para deslizar pelo eletrodo, além de depender da condutividade da água, o que afeta a calibração.

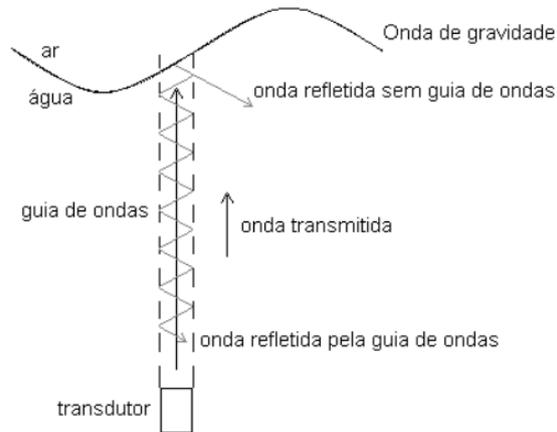
2.2.3 Sensor por Ultrassom

Ao contrário de seus predecessores, este sensor não sofre grande influência das características da água, dependendo apenas da velocidade de deslocamento do som na água. As versões comerciais apresentam sistemas aéreos que dependem da velocidade de deslocamento do som no ar, contudo, considerando as propriedades mais estáveis da água fizeram com que os pesquisadores em Martins et al. (2007) optassem por um design submerso. Embora a velocidade de deslocamento do som na água possa ser afetada pela temperatura dela, a qual não varia muito em tanques de teste não afetando consideravelmente o sensor, os sensores de ultrassom não necessitam de constante calibração, diminuindo assim o tempo necessário para a realização dos ensaios.

Este sensor faz uso da técnica de pulso-eco, medindo o tempo de viagem do pulso acústico de ultrassom para percorrer, ida e volta, a distância entre o transdutor e a linha de água. Segundo Mello (2012), o sensor é composto por três partes, transdutor, guia de ondas e circuito condicionador de sinais. O transdutor converte os sinais elétricos em pressão mecânica e vice-versa, a guia de ondas deve ser utilizada para que o pulso enviado mantenha a trajetória de retorno ao transdutor, visto que a linha da água não é estática e está sujeita a inclinações. A Figura 14 representa a funcionalidade da guia de ondas mencionada.

Os trabalhos de Carneiro (2007) e Mello (2012) apresentam em maior detalhe técnico esse sistema, seu desenvolvimento e modificações realizadas após o que foi apresentado em Martins et al. (2007).

Figura 14 Esquema representativo do sensor acústico e funcionamento da guia de ondas.



Fonte: Adaptado de Mello (2012)

O Quadro 2 apresenta um resumo dos três sensores apresentados, seus princípios de funcionamento, pontos pró e contras.

Quadro 2 Características dos sensores de onda do tipo capacitivo, resistivo e ultrassônico.

Tipo de sensor	Princípio de funcionamento	Prós	Contra
Capacitivo	Capacitância elétrica entre duas hastes revestidas e imersas na água.	Escala de medição contínua. Fácil montagem. Fácil conexão ao sistema de aquisição de dados.	Necessita isolamento galvânica. Precisam de calibração para o uso. Sofrem com histerese por tensão superficial da água. Sujeira que adere nas hastes provoca erro de medição.
Resistivo	Resistência elétrica entre duas hastes imersas na água.	Escala de medição contínua. Fácil montagem. Fácil conexão ao sistema de aquisição de dados.	Necessita isolamento galvânica. Precisam de calibração para o uso. Sofrem com histerese por tensão superficial da água. Sujeira que adere nas hastes provoca erro de medição.
Ultrassônico	Tempo de voo de pulso-eco acústico dentro de uma guia de ondas imersa na água.	Calibração simplificada; a partir da velocidade de propagação do som na água. Estável eletricamente e com a característica físico-química da água.	Necessita uso de guia de ondas. Sensível à desalinhamentos de montagem. Amplitude do eco é sensível à propagação do som dentro da guia de ondas. Menisco da superfície da água pode causar atenuação no eco acústico. Sujeira e bolhas de ar dentro da guia de ondas provocam atenuação acústica, ocasionando perda de leitura ou leitura falsa da linha de água.

Fonte: Mello (2012).

2.3 MÉTODO DE CAPTURA ÓPTICA DE MOVIMENTO

Sistemas ópticos são caracterizados por descrever a localização e formatos das superfícies refletidas ou refratadas. A aplicação destes sistemas como instrumentos de medição não é novidade nos meios de pesquisa, como pode ser visto no estudo de Harris (1988). Contudo avanços recentes tornaram os sistemas de captura óptica e processamento de imagens mais acessíveis e precisos.

O sistema óptico utiliza os dados coletados por sensores de imagem para inferir a posição de um objeto. O sistema é composto por câmeras, normalmente mais de uma são necessárias para a precisão e triangulação das imagens, alvos refletivos passivos (Figura 15), e um programa que identifique e rastreie os alvos nos vídeos. O sistema produz dados com três graus de liberdade para cada alvo, para conseguir inferir seis graus de liberdade deve-se utilizar no mínimo três alvos. Para determinar a posição de um alvo é necessário no mínimo duas câmeras, porém mais câmeras podem ser necessárias para garantir que pelo menos duas câmeras consigam captar o mesmo alvo, se alguma câmera tiver um ponto cego em algum momento do ensaio o rastreamento do alvo é perdido. No entanto, fazer uso de muitas câmeras implica em mais pós processamento dos dados.

As câmeras têm uma frequência de captura de imagem de 30 a 1000 quadros por segundo, possibilitando a captura de objetos se movimentando em altas velocidades. Dependendo do movimento que quer se capturar deve-se aumentar a frequência de amostragem da câmera em detrimento da qualidade da resolução da mesma. As câmeras são configuradas para receber apenas a faixa de luz que é refletida pelos alvos, evitando assim qualquer contaminação de outra fonte, e podem ser sincronizadas com light-emitting diodes (LEDs). Uma explicação breve dos sistemas de captura de movimento pode ser encontrada em Estévez-García et al (2015).

Figura 15 Alvos reflexivos utilizados nos sistemas óptico.



Fonte: Disponível em <<https://www.qualisys.com/hardware/accessories/passive-markers/super-spherical-markers/>>

O pós processamento começa com o programa reproduzindo os quadros com apenas os alvos, alguns tratamentos de imagem podem ser realizados para minimizar os ruídos e separar os alvos do resto da imagem. O mais básico, segundo Maneche (2011), é separar todos os pixels que excedem determinada faixa de luminosidade.

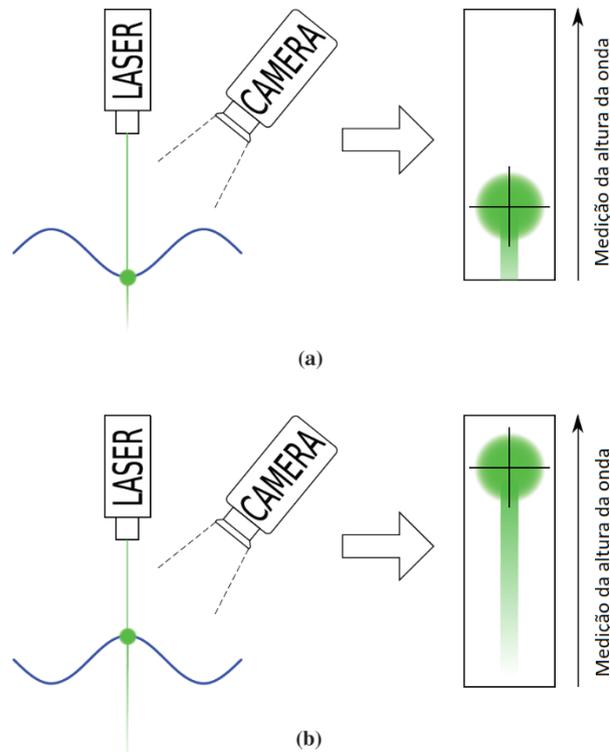
Após esse processo deve-se determinar as coordenadas em duas dimensões para cada alvo em cada câmera, esses dados serão utilizados para determinar as coordenadas em três dimensões. O terceiro passo é rastrear quadro a quadro a posição de cada alvo, ao final desses processos o programa terá um registro no tempo das coordenadas x, y e z de cada alvo.

Este sistema pode ser extremamente preciso, dependendo da qualidade dos equipamentos utilizados, e da montagem do ensaio. Pode rastrear vários pontos, sem a necessidade de usar nenhum cabo, não limitando assim o movimento dos corpos a serem ensaiados. Possui uma alta taxa de amostragem, possibilitando altas velocidades de movimento, embora isso implique em um pós processamento mais complicado, podendo aumentar significativamente o custo operacional. Caso um dos alvos não seja capturado por mais de uma câmera por muitos quadros não é possível rastrear sua movimentação.

2.3.1 Sensores Ópticos na Medição de Ondas

O emprego de sistemas que fazem uso do rastreamento óptico ou de algum recurso óptico vem sendo explorado por pesquisadores em aplicações laboratoriais devido as suas vantagens de aplicação. Um desses estudos é encontrado em Payne et al. (2009), onde é desenvolvido um sensor óptico para medição de ondas em um tanque de reboque com a utilização de laser. O laser é posicionado direcionado para o fundo do tanque, enquanto uma câmera, fixada com uma inclinação em relação ao raio do laser, capta o ponto onde a luz do laser se dispersa na água. A Figura 16 apresenta o funcionamento desse princípio, conforme a onda passa pelo ponto onde o laser está fixado o ponto de dispersão da luz se move conforme a superfície da água.

Figura 16 Princípio de funcionamento do sistema a laser para medição de ondas, (a) quando no cavado da onda e (b) na crista.



Fonte: Adaptado de Payne et al. (2009).

Como é possível ver na Figura 16 (a) e (b) a mudança da posição do ponto de dispersão da luz conforme o cavado e a crista da onda passam pelo laser.

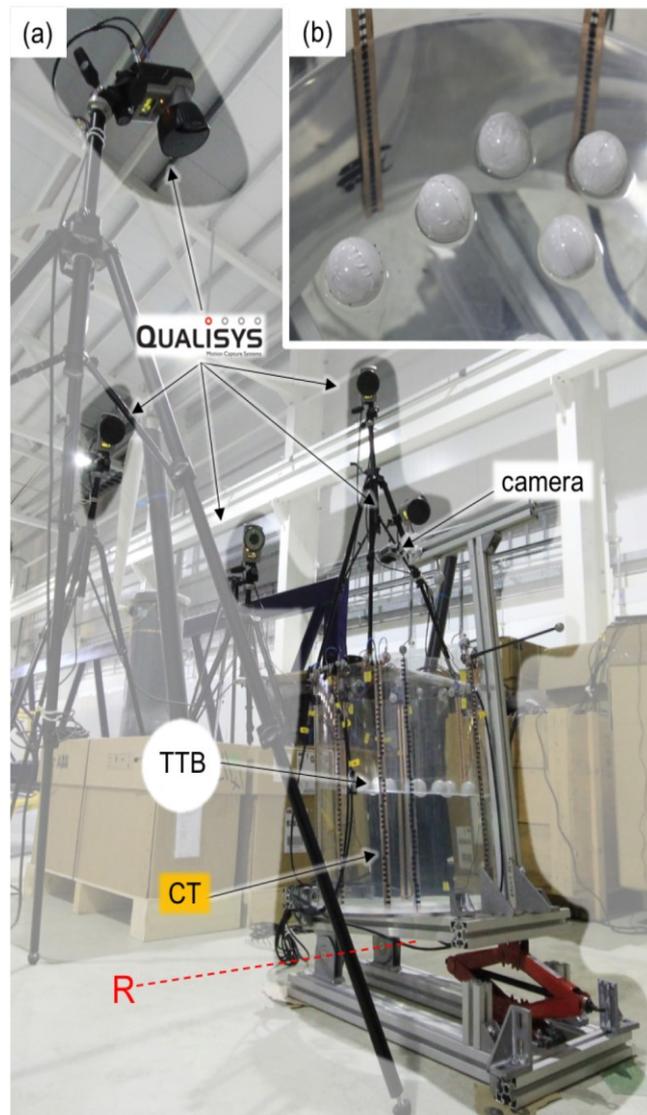
Foram testadas ondas regulares com frequência de 1 Hz, e duas amplitudes diferentes, seguindo uma solução teórica de Stokes de quinta ordem. Os resultados do sensor óptico foram comparados com um sensor condutivo, e foi concluído que o sensor óptico apresentava melhor aproximação com a solução teórica. Sensores que perfuram a superfície da água, como os resistivos e capacitivos, têm a tendência de filtrar algum conteúdo das harmônicas de ordem maior. Com isso, Payne et al. (2009) conclui que o sensor óptico apresenta vantagens quando comparado ao sensor condutivo quando se tem interesse em ondas com componentes de ordem maior, abrindo a discussão para estudos futuros em como aprimorar a captação do ponto de dispersão de luz pela câmera com maior precisão e sem sofrer interferências externas.

Em Erikson (2004) é apresentado o uso de câmeras para a obtenção de dados sobre as ondas e características morfodinâmicas em águas rasas, mais especificamente nas regiões

costeiras de praia, onde ocorre acúmulo ou erosão de areia. No estudo a captação de dados dos vídeos das câmeras é comparado com sensores capacitivos, concluindo que a solução óptica pode ser utilizada como método alternativo na medição de ondas e mudanças no perfil da praia.

O sistema da Qualisys utilizado nesse trabalho foi empregado em Gabl (2018), com o objetivo de determinar a superfície livre dentro de um tanque em uma estrutura flutuante, como tanques de gás liquefeito em navios tanque (Figura 17).

Figura 17 Experimento realizado para determinação da superfície livre com alvos flutuantes e sensor resistivo; (a) esquema geral; (b) detalhes dos sensores na superfície livre.



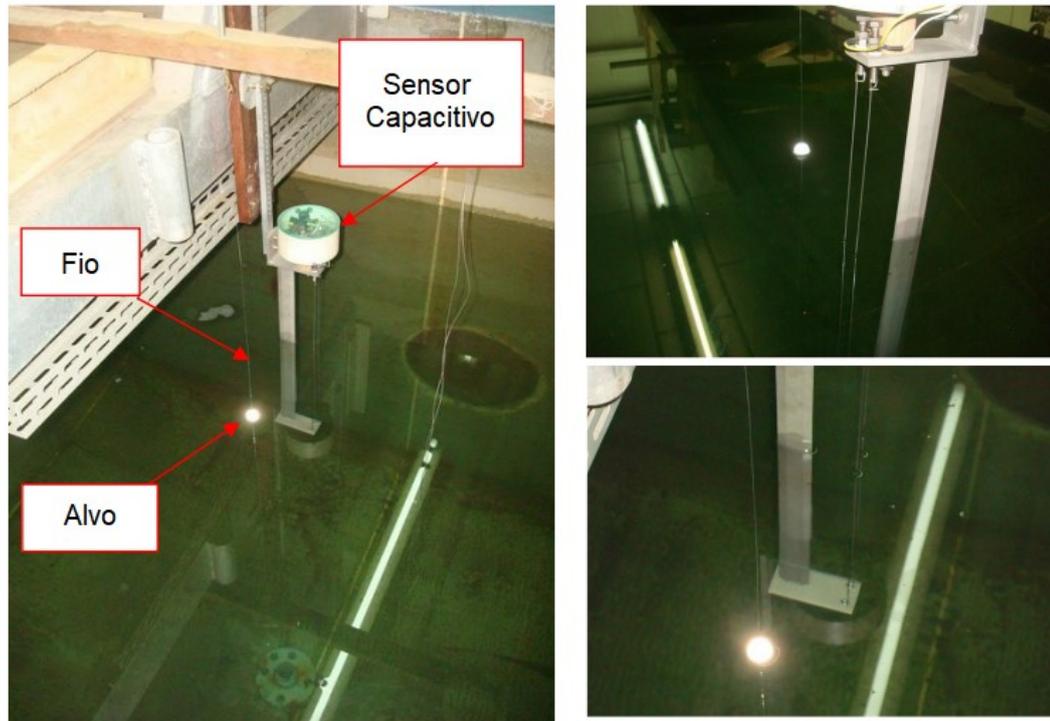
Fonte: Adaptado de Gabl (2018).

No experimento realizado foi utilizado uma combinação de um sensor resistivo no formato de uma fita de cobre posicionado nas laterais do tanque e alvos refletivos flutuantes, como sistemas de medição da superfície livre. A Figura 17 representa o sistema construído em laboratório, foi utilizado um tanque cilíndrico de acrílico montado em uma base inclinada com eixo de rotação representado pela letra R na figura. Os sensores resistivos estão indicados pela sigla CT e os alvos flutuantes pela sigla TTB, é possível verificar com melhor detalhe os sensores na superfície livre da água na Figura 17 (b). Como no experimento realizado neste trabalho os alvos flutuantes foram construídos com bolas de tênis de mesa envoltas em uma fita refletiva, garantindo assim a flutuabilidade, baixa massa inercial e estanqueidade do alvo.

O experimento concluiu que ambos os sistemas são possíveis de se utilizar na medição da superfície livre em estruturas flutuantes. Os alvos flutuantes não apresentaram grande influência na superfície livre devido à baixa massa, contudo a utilização de um número maior de alvos poderia aumentar a interação entre eles e assim influenciar na superfície livre. Os sensores resistivos apresentaram um desvio padrão de 2 milímetros, enquanto o sistema óptico apresentou um desvio padrão de 4 milímetros, é considerado a utilização de alvos menores e em maior número para diminuir as incertezas relacionadas ao sistema óptico.

O trabalho de Fugarra et al. (2009), foi o primeiro experimento que utilizou o sistema óptico para a medição da altura da onda, servindo de base para o desenvolvimento do presente experimento. Em Fugarra et al. (2009), um único sensor capacitivo é colocado em série com um alvo refletivo restrito por um fio tensionado. O par de sensores foi submetido a ondas regulares e a correlação entre os dois foi satisfatória. A Figura 18 representa o par de sensores testados, nela é possível visualizar o fio tensionado que restringe o movimento do alvo flutuante apenas na direção vertical e o sensor capacitivo.

Figura 18 Sensores utilizados na medição de altura de onda, sensor capacitivo e sensor óptico com alvo flutuante.



Fonte: Adaptado de Fajarra et al. (2009).

Com isso, no presente trabalho o sistema óptico de rastreamento de alvos flutuantes será aplicado para a medição da altura de onda em tanque de provas numérico, dando continuidade ao estudo iniciado em Fajarra et al. (2009).

3 METODOLOGIA

O experimento foi realizado no Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico (TPN) do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Para assegurar a qualidade dos resultados do experimento e permitir que os resultados apresentados sejam reproduzidos, ou comparados em desenvolvimentos futuros a metodologia de análise experimental padrão para testes de modelos em ondas regulares, recomendada pela ITTC (2017), foi aplicada.

3.1 CALIBRADOR HIDRODINÂMICO

Intitulado Calibrador Hidrodinâmico (Figura 19) pelo fato de ser aplicado na realização de ensaios experimentais e de validação de sistemas oceânicos para calibração de modelos numéricos adotados nos simuladores do TPN, o tanque possui formato quadrado, com laterais de 14 metros por 4,1 metros de profundidade. Usa um sistema gerador de ondas com absorção ativa do tipo *flap* em todo o perímetro, constituído por múltiplos atuadores conectados a 148 batedores de onda de 0,36 metros de largura e 1,75 metros de altura, que atuam de forma independente. O acionamento é feito por servomotores de 0,75 kW, podendo gerar ondas com período entre 0,4 segundos a 2,5 segundos com altura máxima de 0,4 metros em 1,4 segundos.

O sistema pode gerar ondas regulares, irregulares e transientes. Por possuir batedores de onda em todo o seu perímetro o tanque permite a geração de ondas em quaisquer direções, podendo simular mudança de direção e mares bimodais. Maiores detalhes sobre o sistema de atuadores podem ser obtidos no trabalho de Mello (2012).

Figura 19 Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico, SP.

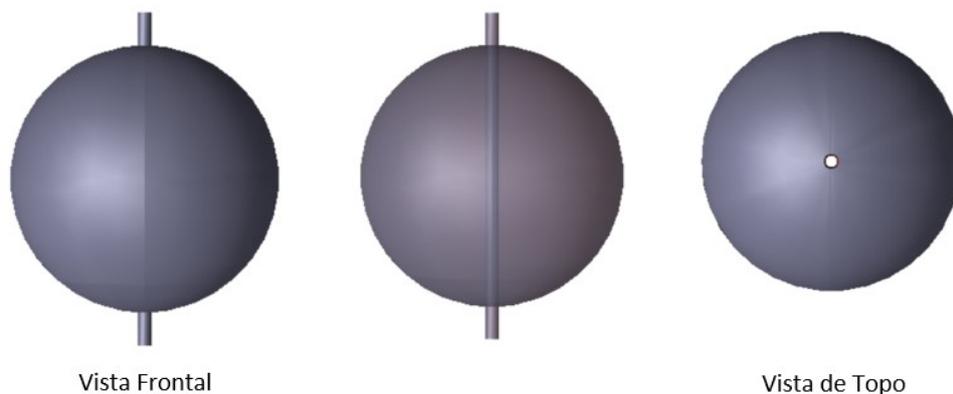


Fonte: Disponível em <<http://tpn.usp.br/calibrador-hidrodinamico/>>.

3.2 EXPERIMENTO: MONTAGEM E EQUIPAMENTOS

Foram utilizados seis pares de sensores capacitivos e alvos refletivos para o sensor óptico, montados em série perpendicular a direção de propagação das ondas. Os alvos flutuantes foram construídos com bolas de tênis de mesa, de aproximadamente 2,7 g e 40 mm de diâmetro. As bolas foram envoltas com uma fita refletiva e perfuradas para a passagem de um tubo. A Figura 20 apresenta um modelo de como são os alvos e do tubo, nas vistas frontal e de topo é possível ver que o tubo transpassado está posicionado no meio da esfera.

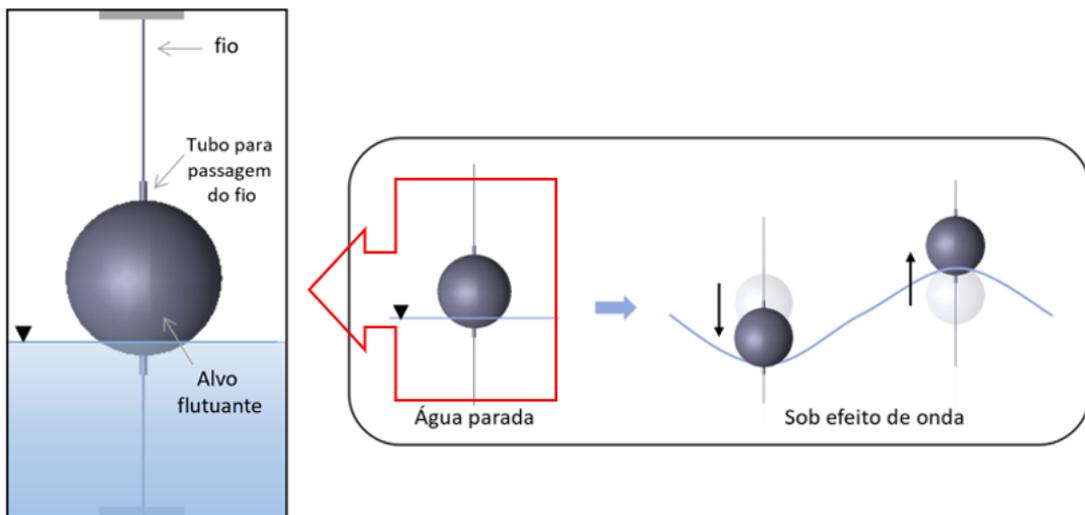
Figura 20 Modelo dos alvos flutuantes para o sistema óptico, detalhe do tubo transpassado.



Fonte: Autora.

Como pode ser visto no esquema da Figura 21, os alvos foram presos por um fino fio tensionado posicionado perpendicularmente a direção do fundo do tanque, com o intuito de deixar o alvo oscilar livremente apenas na direção vertical. Quando sobre influência da onda o alvo se desloca verticalmente conforme a superfície livre.

Figura 21 Esquema representativo de como atua o alvo para sensor óptico.



Fonte: Autora.

A Figura 22 apresenta uma foto dos alvos utilizados nesse experimento, possuindo diâmetro de uma bola de tênis de mesa, aproximadamente 40 mm. Os efeitos de fricção e capilaridade dos alvos foram considerados de impacto insignificante para os resultados.

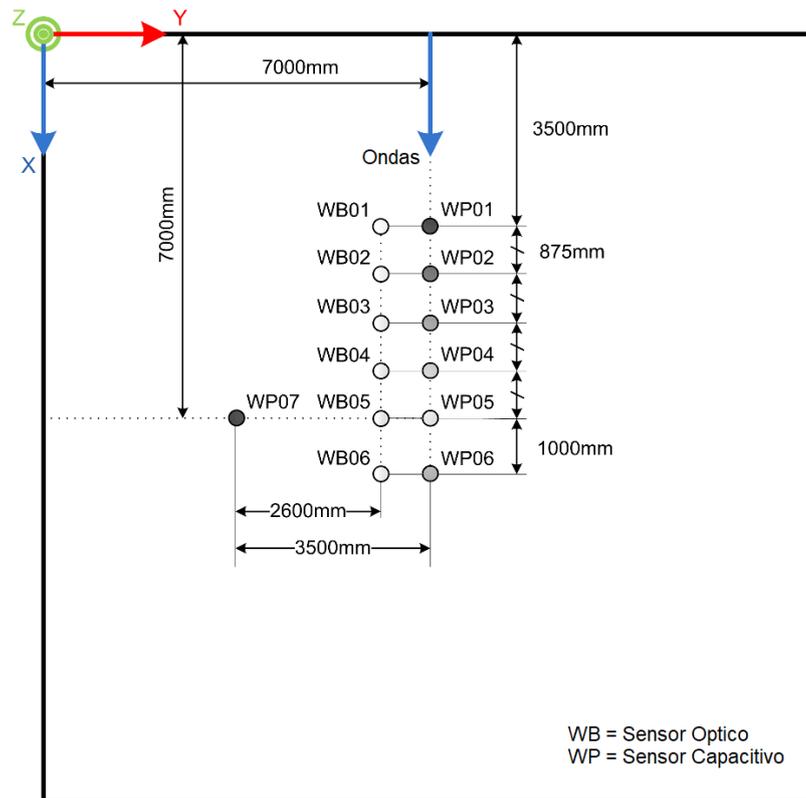
Figura 22 Alvos reflexivos utilizados nos sensores ópticos.



Fonte: Autora.

Os alvos flutuantes foram posicionados em série em relação um ao outro, enquanto a série dos sensores capacitivos estava em paralelo com os mesmos. A distância entre os alvos e o posicionamento em relação a direção das ondas é apresentado na Figura 23.

Figura 23 Disposição dos pares de sensor em relação a geração de onda na base oceânica.



Fonte: Autora.

3.2.1 Calibração

Os sensores capacitivos foram calibrados pelo procedimento padrão de deslocar o suporte uma distância vertical precisa e verificar com a resposta obtida. O sistema óptico foi calibrado por um método dinâmico, onde uma vara com tamanho conhecido, com alvos posicionados em cada ponta, foi movimentada em volta do volume definido para o experimento comparando com um ponto de referência estacionário que representa a origem dos eixos.

3.3 EXPERIMENTO: PROCEDIMENTO

Para avaliar a resposta dos sensores ópticos foram ensaiadas ondas regulares e irregulares, os dados das ondas regulares, como o período e altura de onda, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Matriz das ondas regulares ensaiadas no experimento.

Registro	Período, T [s]	Altura de onda, H[mm]
Onda-1	0,53	12,98
Onda-2	0,53	12,98
Onda-3	0,73	23,18
Onda-4	0,73	23,18
Onda-5	0,94	34,95
Onda-6	1,35	59,65
Onda-7	1,55	70,86
Onda-8	1,76	80,12
Onda-9	1,96	86,55
Onda-10	2,17	89,22
Onda-11	2,37	87,14
Onda-12	1,50	200
Onda-13	1,25	200

As ondas irregulares testadas apresentam o espectro de JONSWAP, com período de pico, altura significativa e fator de intensificação apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Registro de ondas irregulares ensaiadas.

Registro	Período, Tp [s]	Altura de onda, Hs[mm]	γ
Onda-14	0,53	12,98	2.066
Onda-15	0,53	12,98	1.548

Os dados produzidos pelos sensores capacitivos foram captados por um sistema padrão ADS, enquanto para o sensor óptico foi utilizado um programa de rastreamento desenvolvido pela Qualisys, o Qualisys Track Manager (QTM). Foram utilizadas 4 câmeras posicionadas com ângulos e elevações diferentes garantindo que durante os intervalos analisados todos os alvos ficassem visíveis em pelo menos duas das câmeras.

3.3.1 Metodologia de Análise

Os registros no tempo dos sensores ópticos foram comparados com os registros obtidos para os sensores capacitivos. Para realizar as análises estatísticas alguns tratamentos no sinal foram necessários, primeiramente colocando ambos no mesmo zero, e selecionando a parte estacionária do sinal. Os sinais foram analisados entre os 20 até os 60 segundos, garantindo assim 40 segundos de observações e um número acima de 10 ciclos por sinal.

Com o sinal já tratado realiza-se a Transformada Rápida de Fourier para transformar do domínio do tempo para o da frequência. Os resultados obtidos foram comparados entre os pares de sensores, assim como o coeficiente de correlação das respostas do sensor óptico ao sinal do sensor capacitivo. O coeficiente de correlação, ou coeficiente de Pearson, entre dois sinais, A e B , representa a existência de uma dependência linear entre os sinais, e pode ser obtido pela fórmula abaixo, onde μ_A e σ_A representam a média e o desvio padrão do sinal A , e respectivamente para o sinal B , μ_B e σ_B .

$$P(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (3.1)$$

O coeficiente pode ser definido também pela covariância de A e B .

$$P(A, B) = \frac{\text{cov}(A, B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (3.2)$$

As incertezas relacionadas a testes com modelos são provenientes de diversas fontes, como propriedades físicas do fluido, condições iniciais do teste, definição do modelo, ambiente, escalas, fator humano e instrumentação. Como apresentado por Qiu et al. (2014), instrumentos como sensores, transdutores e sistemas óticos, podem embutir incertezas quanto a precisão,

calibração, estabilidade do instrumento, vibrações parasitas e ruídos, posição dos transdutores e precisão do sistema ótico. Essas incertezas são classificadas em dois tipos, A e B, seguindo a metodologia ISO-GUM, nesse trabalho são apresentadas apenas as incertezas tipo A nas medições, sem entrar em mais detalhes das contribuições de cada componente que influencia a geração dos resultados. Como apresentado em ITTC (2016), as incertezas do tipo A são componentes obtidas por métodos utilizando análises estatísticas das séries observadas. As incertezas tratadas nesse trabalho são as incertezas padrões determinadas pelo desvio padrão dividido pela raiz quadrada do número de observações. Por esse motivo o tempo de realização dos testes resultara em incertezas maiores para as ondas de período maior, quanto maior o período menor o número de ciclos observados para o mesmo tempo de duração do teste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as ondas regulares testadas foram avaliados os valores médios de cada sinal, sensor ótico e capacitivo, para a altura de onda, o período obtido, desvio padrão e o coeficiente de correlação entre eles. As comparações para os resultados obtidos são apresentados nos seguintes itens, Tabela 3 à

Tabela 15, o índice c representa os sensores convencionais, capacitivos, e o índice i, o sensor óptico, por captura de imagem. Os resultados são apresentados referenciando os pares de sensores, óptico e capacitivo. Os valores para altura de onda são apresentados em H, período T e desvio padrão com a letra S. A correlação trata da linearidade entre o sinal do sensor óptico com o sensor capacitivo, e a diferença é sobre as alturas de onda.

Tabela 3 Resultados para o registro de onda O1, H = 12,98 mm e T = 0,53 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	12.96	13.62	0.53	0.53	4.67	4.98	0.94	5%
2	11.67	14.23	0.53	0.53	4.19	5.13	0.68	22%
3	12.31	15.08	0.53	0.53	4.42	5.41	0.71	22%
4	11.53	13.40	0.53	0.53	4.12	4.80	0.92	16%
5	11.98	11.99	0.53	0.53	4.30	4.48	0.93	0%
6	12.15	12.28	0.53	0.53	4.40	4.48	0.97	1%

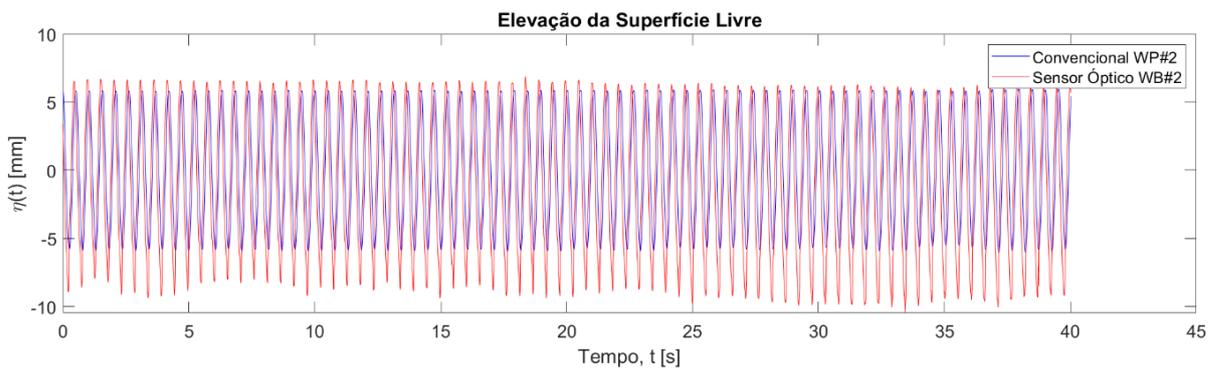
Tabela 4 Resultados para o registro de onda O2, H = 12,98 mm e T = 0,53 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	12.55	11.34	0.53	0.53	4.51	4.06	0.93	-10%
2	11.53	14.94	0.53	0.53	4.13	5.39	0.96	30%
3	12.47	15.72	0.53	0.53	4.46	5.63	0.95	26%
4	11.61	14.97	0.53	0.53	4.15	7.20	0.72	29%
5	11.89	12.00	0.53	0.53	4.27	4.30	0.96	1%
6	12.00	13.12	0.53	0.53	4.33	4.75	0.97	9%

Os resultados para as ondas de período igual a 0,53 segundos apresentam boa correlação entre os dois sinais. Contudo, há uma considerável diferença entre as alturas de onda média dos sinais, chegando a 22% para o par de sensores 2 e 3 no registro O1 (Tabela 3), e 30% para o par 2 no registro O2 (Tabela 4). Ao se avaliar os registros no tempo, Figura 24 e Figura

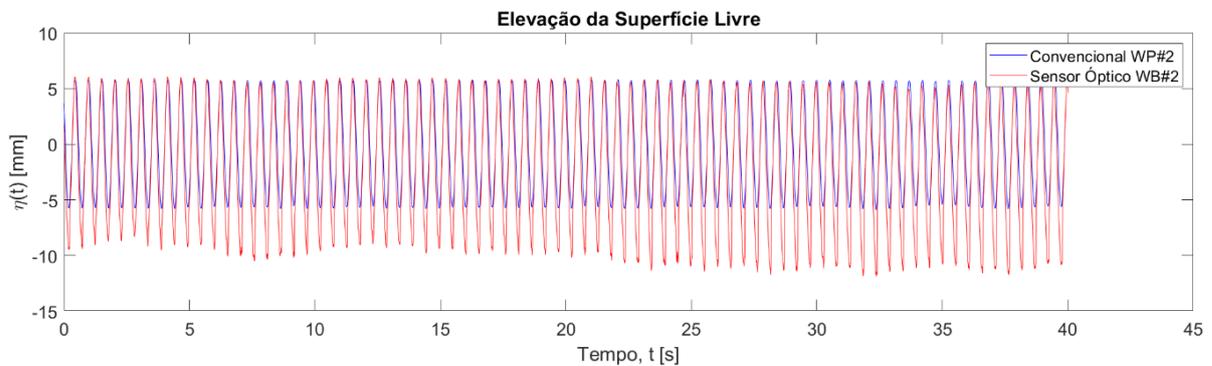
25, é possível notar que o sinal para o sensor óptico apresenta cavados maiores que o sinal do sensor capacitivo. Os registros para os outros pares de sensores podem ser vistos no Apêndice B, e em sua maioria apresentam o mesmo comportamento visto para os pares de sensores apresentados nas Figura 24 e Figura 25.

Figura 24 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O1, par 2.



Fonte: Autora.

Figura 25 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O2, par 2.



Fonte: Autora.

Ao analisar as incertezas associadas a cada sensor (Figura 26 e Figura 27), é possível notar que para a ambas as ondas O1 e O2 os sensores que apresentam maior diferença entre as alturas de onda estão bem distantes. Enquanto os valores para os sensores capacitivos se encontram dentro do envelope de suas incertezas, os sensores ópticos posicionados nos pares 2, 3 e 4 estão consideravelmente fora do valor esperado, mesmo considerando as margens de incerteza dos outros sensores.

Figura 26 Incertezas por sensor para o registro de onda O1.

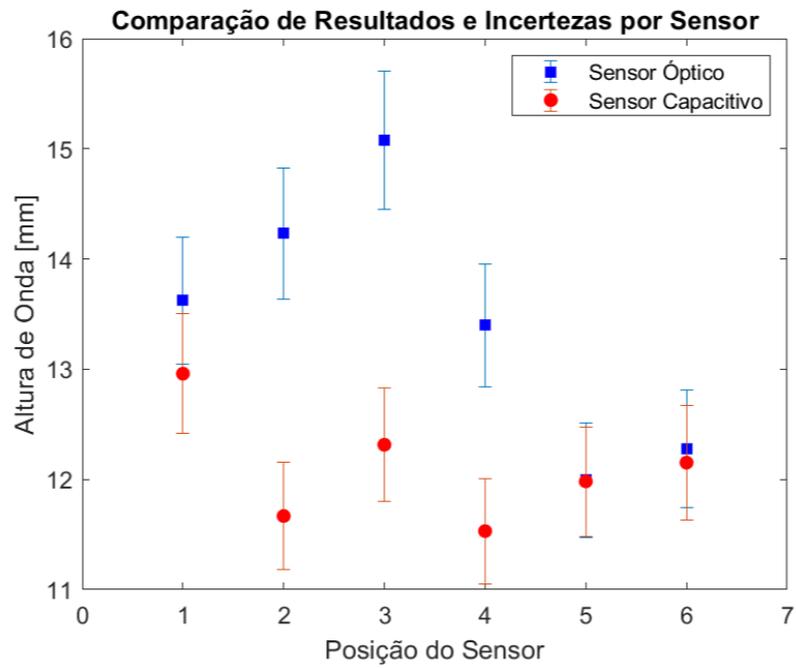
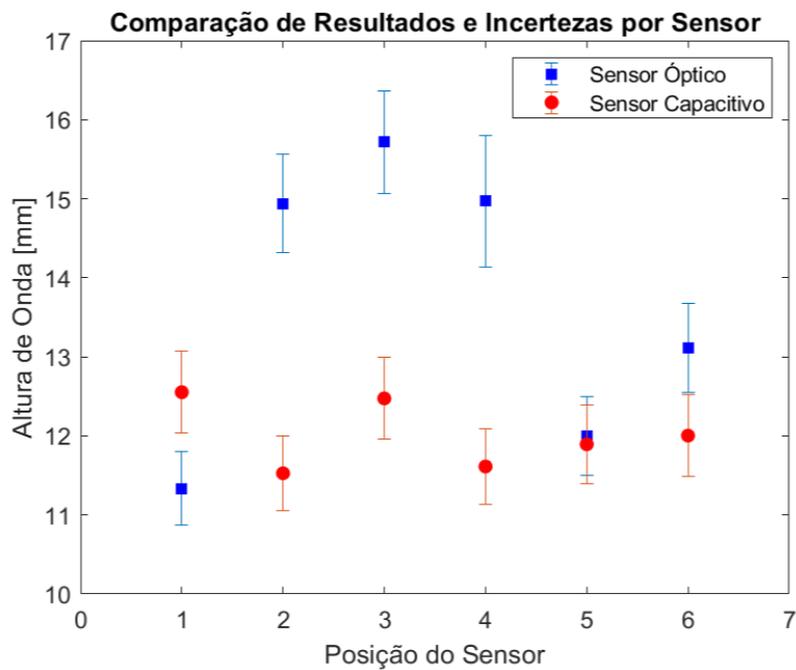


Figura 27 Incertezas por sensor para o registro de onda O2.



O efeito de cavados acentuados também é visto nos registros para as ondas com período igual a 0,73 segundos apresentados na Tabela 5 e Tabela 6, embora em menor importância. A correlação entre os sinais é alta, como para os registros anteriores, contudo as diferenças entre os valores para as alturas de onda são menos acentuadas.

Tabela 5 Resultados para o registro de onda O3, H = 23,18 mm e T = 0,73 s.

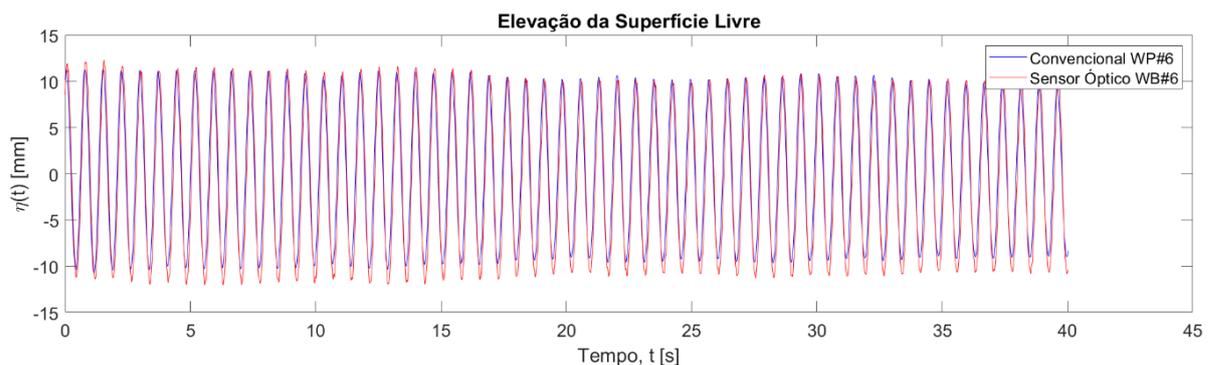
Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	18.58	17.73	0.73	0.73	7.88	7.45	0.96	-5%
2	19.97	19.40	0.73	0.73	8.65	8.20	0.99	-3%
3	16.40	17.04	0.73	0.73	7.30	7.43	1.00	4%
4	16.50	18.09	0.73	0.73	7.23	7.83	0.99	9%
5	19.56	19.38	0.73	0.73	8.41	8.22	0.96	-1%
6	16.62	18.20	0.73	0.73	7.10	7.78	0.96	9%

Tabela 6 Resultados para o registro de onda O4, H = 23,18 mm e T = 0,73 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	18.62	17.65	0.73	0.73	7.89	7.39	0.91	-5%
2	20.02	19.58	0.73	0.73	8.67	8.29	0.67	-2%
3	16.50	17.32	0.73	0.73	7.34	7.52	0.76	5%
4	16.67	18.22	0.73	0.73	7.29	7.85	0.84	9%
5	19.71	19.25	0.73	0.73	8.47	8.16	0.91	-2%
6	16.66	18.46	0.73	0.73	7.13	7.90	0.91	10%

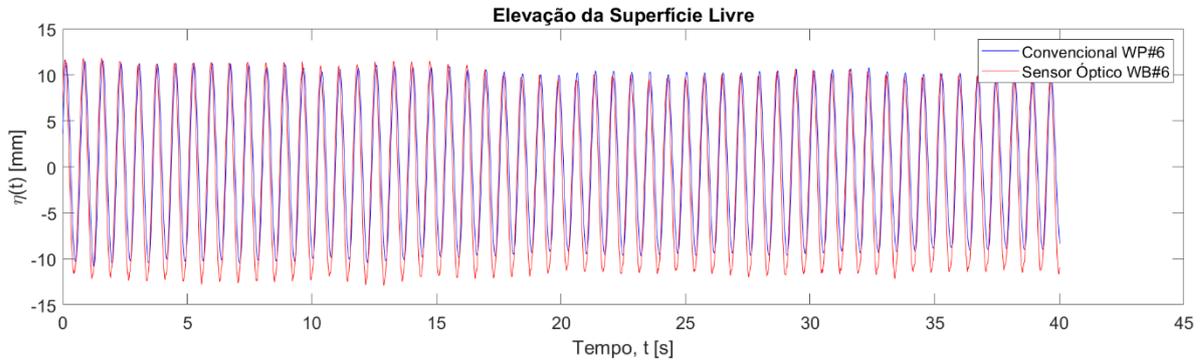
Embora os registros no tempo para as ondas O3 e O4 apresentem as diferenças nos cavados presentes nos registros anteriores, como visto na Figura 28 e na Figura 29, as diferenças obtidas nas médias das alturas é menor do que para os registros das ondas O1 e O2.

Figura 28 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O3, par 6.



Fonte: Autora.

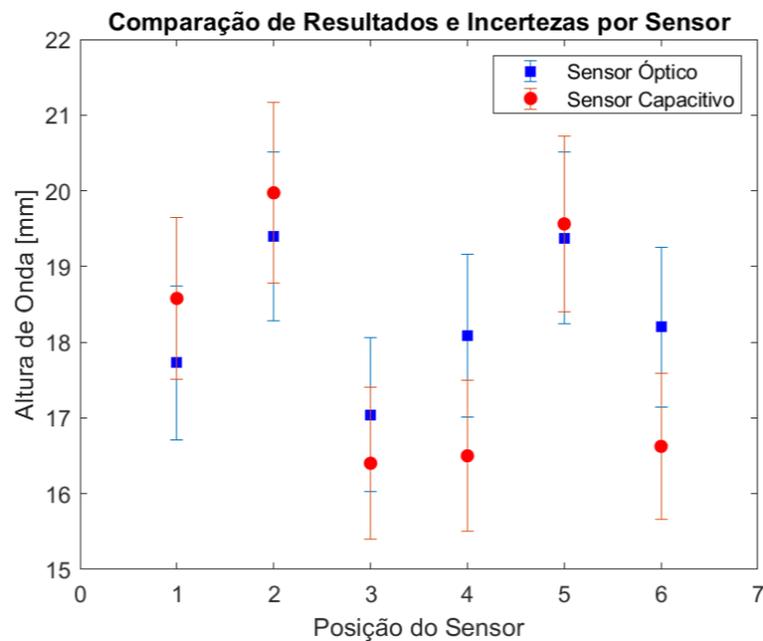
Figura 29 Registro no tempo para os sensores capacitivo e óptico para a onda O4, par 6.



Fonte: Autora.

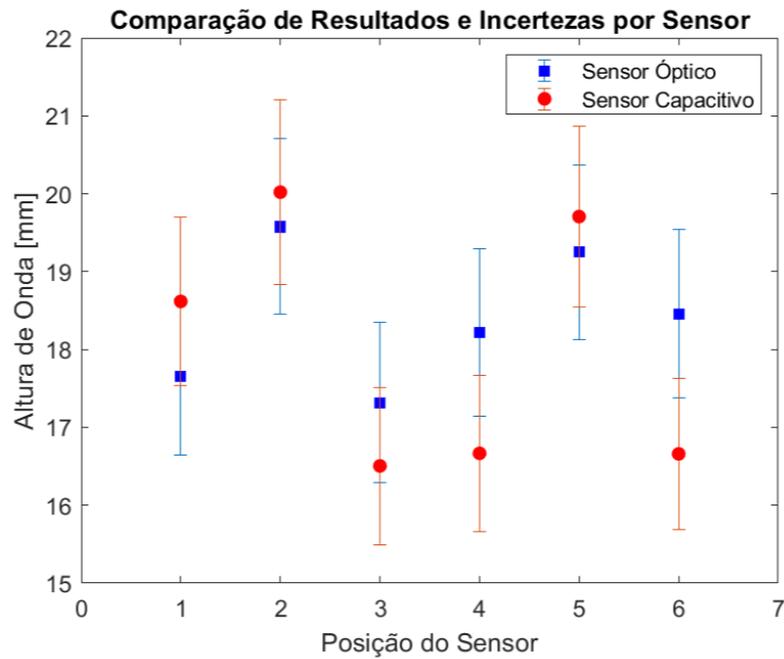
Considerando as diferenças encontradas nas alturas de onda para os sinais das ondas O3 e O4, e avaliando as incertezas é possível notar que os valores embora diferentes encontram-se dentro da margem de incerteza para ambos os sensores. Na Figura 30 estão representados os valores de altura de onda para o registro O3. Os sensores ópticos 4 e 6, que apresentavam maior diferença estão dentro da margem de incerteza comparando com os capacitivos, o mesmo pode ser observado para o registro O4 na Figura 31.

Figura 30 Incertezas por sensor para o registro de onda O3.



Fonte: Autora.

Figura 31 Incertezas por sensor para o registro de onda O4.



Fonte: Autora.

É possível notar que conforme o período aumenta as diferenças tendem a diminuir, como pode ser observado nas tabelas abaixo (Tabela 7 até Tabela 15).

Tabela 7 Resultados para o registro de onda O5, $H = 34,95$ mm e $T = 0,94$ s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	30.05	29.20	0.93	0.93	12.17	11.75	0.95	-3%
2	27.43	28.58	0.93	0.93	11.43	11.72	1.00	4%
3	29.26	30.24	0.93	0.93	12.26	12.61	1.00	3%
4	28.50	31.86	0.93	0.93	11.67	12.94	0.99	11%
5	26.28	29.15	0.93	0.93	10.76	11.91	0.98	10%
6	31.32	32.37	0.93	0.93	12.95	13.14	0.99	3%

Tabela 8 Resultados para o registro de onda O6, H = 59,65 mm e T = 1,35 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	52.80	52.04	1.33	1.33	21.68	21.14	0.99	-1%
2	50.61	49.95	1.33	1.33	21.10	20.65	0.99	-1%
3	46.58	46.37	1.33	1.33	19.39	19.02	0.99	0%
4	51.68	52.51	1.33	1.33	21.30	21.42	1.00	2%
5	47.30	47.38	1.33	1.33	19.67	19.57	1.00	0%
6	46.00	45.46	1.33	1.33	19.09	18.73	1.00	-1%

Tabela 9 Resultados para o registro de onda O7 H = 70,86 mm e T = 1,55 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	79.92	78.34	1.74	1.74	30.72	30.04	0.99	-2%
2	69.73	70.23	1.74	1.74	26.93	27.02	0.99	1%
3	77.75	78.61	1.74	1.74	30.08	30.23	0.99	1%
4	72.52	75.67	1.74	1.74	28.04	29.06	0.99	4%
5	70.81	72.06	1.74	1.74	27.34	27.72	0.99	2%
6	80.61	79.55	1.74	1.74	31.02	30.54	0.99	-1%

Tabela 10 Resultados para o registro de onda O8, H = 80,12 mm e T = 1,76 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	64.91	63.99	2.00	2.00	30.78	30.50	1.00	-1%
2	58.09	58.68	2.00	2.00	27.45	27.84	1.00	1%
3	55.29	55.30	2.00	2.00	26.41	26.62	1.00	0%
4	62.43	62.38	2.00	2.00	29.58	29.81	1.00	0%
5	63.75	62.58	2.00	2.00	29.98	29.69	1.00	-2%
6	56.65	56.12	2.00	2.00	27.12	27.10	1.00	-1%

Tabela 11 Resultados para o registro de onda O9, H = 86,55 mm e T = 1,96 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	54.57	53.58	2.22	2.11	29.95	29.63	0.98	-2%
2	61.10	59.09	2.22	2.22	33.09	32.48	0.97	-3%
3	61.90	60.68	2.22	2.22	33.17	32.83	0.98	-2%
4	55.49	55.88	2.22	2.22	30.08	30.43	0.98	1%
5	54.97	54.30	2.22	2.22	30.33	30.20	0.98	-1%
6	62.72	60.77	2.22	2.22	34.03	33.38	0.98	-3%

Tabela 12 Resultados para o registro de onda O10, H = 89,22 mm e T = 2,17 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	78.46	77.61	2.35	2.35	28.34	28.02	1.00	-1%
2	75.99	75.47	2.35	2.35	27.48	27.25	1.00	-1%
3	74.97	74.51	2.35	2.35	27.10	26.90	0.99	-1%
4	77.58	79.06	2.35	2.35	28.03	28.52	1.00	2%
5	84.35	83.81	2.35	2.35	30.45	30.21	1.00	-1%
6	84.19	82.32	2.35	2.35	30.42	29.69	1.00	-2%

Tabela 13 Resultados para o registro de onda O11, H = 87,14 mm e T = 2,37 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	78.41	77.47	2.35	2.35	28.32	27.94	1.00	-1%
2	75.92	75.48	2.35	2.35	27.45	27.25	0.99	-1%
3	74.98	74.67	2.35	2.35	27.10	26.94	0.99	0%
4	77.71	78.90	2.35	2.35	28.07	28.46	1.00	2%
5	84.48	83.65	2.35	2.35	30.50	30.16	0.99	-1%
6	84.23	82.16	2.35	2.35	30.44	29.63	1.00	-3%

Tabela 14 Resultados para o registro de onda O12, H = 200 mm e T = 1,5 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	168.36	160.35	1.48	1.48	71.49	67.62	0.99	-5%
2	185.35	182.14	1.48	1.48	78.06	75.91	0.98	-2%
3	160.18	160.44	1.48	1.48	67.55	66.88	0.98	0%
4	192.37	185.45	1.48	1.48	80.70	77.37	0.99	-4%
5	158.86	156.12	1.48	1.48	66.96	65.75	1.00	-2%
6	178.15	177.33	1.48	1.48	75.14	74.51	0.99	0%

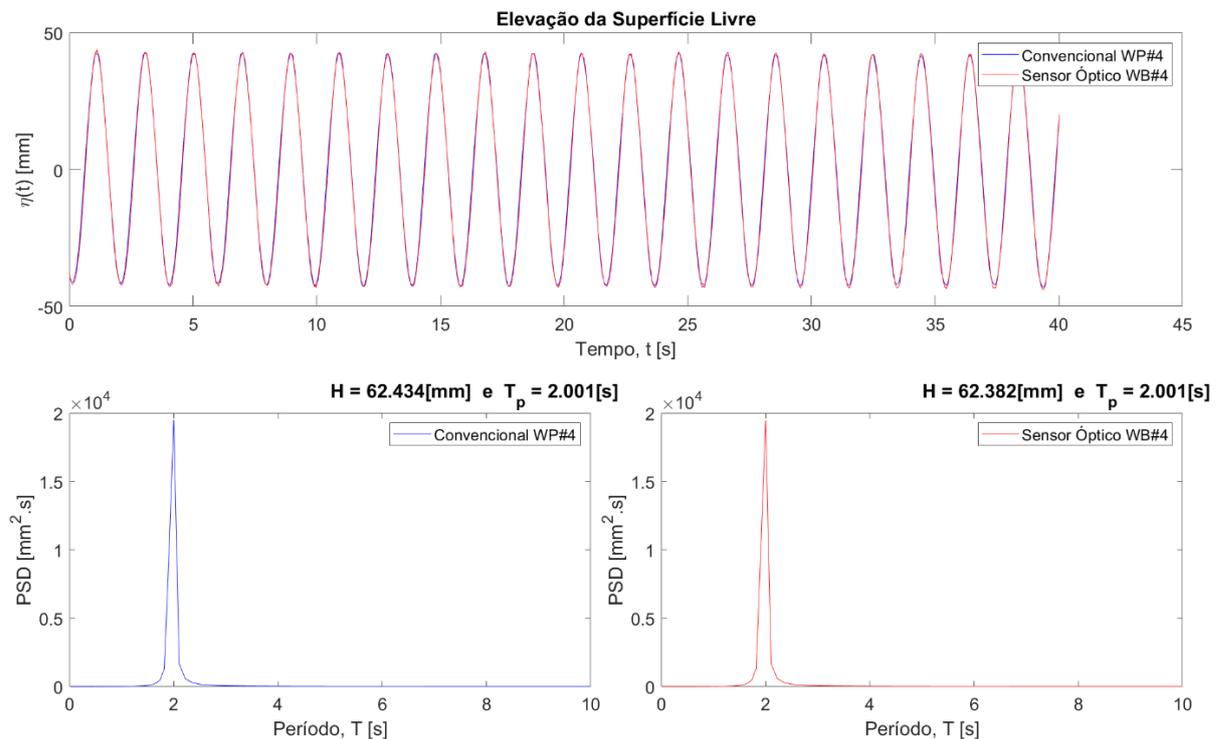
Tabela 15 Resultados para o registro de onda O13, H = 200 mm e T = 1,25 s.

Par	Hc [mm]	Hi [mm]	Tc [s]	Ti [s]	Sc [mm]	Si [mm]	Correlação	Diferença
1	182.79	182.90	1.25	1.25	65.49	65.42	0.97	0%
2	177.46	177.78	1.25	1.25	63.38	63.54	0.92	0%
3	206.43	195.92	1.25	1.25	73.84	69.79	0.94	-5%
4	212.66	197.05	1.25	1.25	75.92	70.07	0.96	-8%
5	176.84	176.23	1.25	1.25	63.49	62.90	0.97	0%
6	174.21	163.55	1.25	1.25	62.92	58.70	0.98	-7%

Observando-se os sinais que apresentam diferença quase nula entre os valores de altura de onda, é possível ver que o sinal da elevação da superfície no tempo é muito semelhante, assim como as análises de FFT (Figura 32). Contudo o valor médio encontrado para os registros difere do valor que foi determinado para o sistema de geração do tanque de provas. Essa

diferença é em torno de 10% para quase todos os registros com exceção dos registros O3, O4, O8 e O9, onde as diferenças são respectivamente, -24%, -24%, -25% e -33%. Este fato deve ser originário de uma combinação das incertezas dos sensores com as incertezas do sistema de geração de ondas.

Figura 32 Resultados para o par de sensores 3 com o registro de onda O8.



Fonte: Autora.

Os resultados apresentados para as ondas com períodos iguais a 0,53 segundos dos sensores ópticos, apresentam diferenças significantes com relação aos sensores capacitivos. Essa diferença pode estar relacionada com alguns aspectos da montagem do experimento. O primeiro ponto seria devido a presença de reflexos na superfície da água. Os reflexos fazem com que o sistema perca a referência original do centro de gravidade dos alvos fazendo com que o sinal apresente os cavados elevados. Em sua maioria esses efeitos aparecem com maior frequência nos cavados das ondas, e considerando a relação da altura de onda com o

comprimento da onda, quanto mais próximo os valores, maior a declividade da onda, este fator pode contribuir para o acontecimento dos reflexos.

Considerando a relação de dispersão para águas profundas podemos obter o comprimento da onda em função do período, o que resulta na Tabela 16. Embora a declividade possa contribuir para a ocorrência do reflexo, a frequência ainda possui maior influência, se compararmos com a razão de altura por comprimento com os registros O12 e O13. Devido a frequência menor os resultados apresentam melhor correlação e menor diferença.

Tabela 16 Relação de comprimento de onda em função do período.

Período, T [s]	Altura de onda, H[mm]	Comprimento de Onda, L [mm]	H/L
0,53	12,98	438,57	0,030
0,73	23,18	832,02	0,028
0,94	34,95	1379,57	0,025
1,35	59,65	2845,49	0,021
1,55	70,86	3751,05	0,019
1,76	80,12	4836,31	0,017
1,96	86,55	5997,93	0,014
2,17	89,22	7352,05	0,012
2,37	87,14	8769,72	0,010
1,50	200,00	3512,95	0,057
1,25	200,00	2439,55	0,082

O segundo ponto se refere a presença de forças dissipativas entre o alvo e o cabo tencionado. Como o cabo tencionado restringe o movimento do alvo nos eixos x e y, resultantes podem surgir fazendo com que o alvo fosse imerso momentaneamente alguns milímetros, justificando assim os cavados mais elevados.

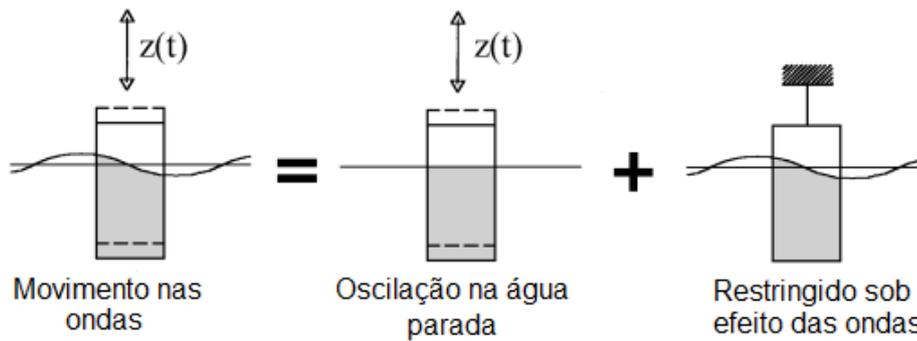
Além disso, alguns efeitos de capilaridade, no tubo por onde passa o cabo, e tensão superficial, que geralmente podem ser desconsiderados, nesse sistema com massa quase desprezível, podem apresentar maior influência, fazendo com que o alvo desenvolva uma espécie de aderência a água.

Como esse efeito é visto em ondas de frequência alta pode-se supor também que a aceleração impressa pela onda no alvo é elevada e com isso o alvo não responde com a mesma aceleração devido aos efeitos da inércia ou amortecimento. Fazendo uma relação com um sistema massa, mola e amortecedor, apresentado em Journée e Massie (2001), o movimento de um corpo na onda pode ser descrito como a soma da oscilação do corpo em água imóvel com

as forças atuando no corpo pelas ondas quando o movimento deste é restringido (Figura 33). O movimento vertical pode ser obtido pela segunda lei de Newton,

$$\frac{d}{dt}(\rho \nabla \cdot \dot{z}) = \rho \nabla \cdot \ddot{z} = F_h + F_w \quad (4.1)$$

Figura 33 Movimento de um cilindro sob efeito de ondas.



Fonte: Adaptado de Journée e Massie (2001)

A primeira porção do movimento pode ser considerada como um decaimento, sendo assim o corpo irá oscilar até que sua energia seja dissipada pelas forças hidromecânicas, inerciais, amortecimento e de restauração.

$$m\ddot{z} = F_h \quad (4.2)$$

$$F_h = -a\ddot{z} - b\dot{z} - cz \quad (4.3)$$

A equação para o movimento de afundamento pode ser descrita pelo sistema massa, mola e amortecedor.

$$(m + a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \quad (4.4)$$

As forças causadas pela onda no corpo com movimento restrito podem ser escritas em função da elevação da onda.

$$F_w = a\ddot{\zeta} + b\dot{\zeta} + c\zeta \quad (4.5)$$

A equação do movimento, $m\ddot{z} = F_h + F_w$, pode ser escrita como,

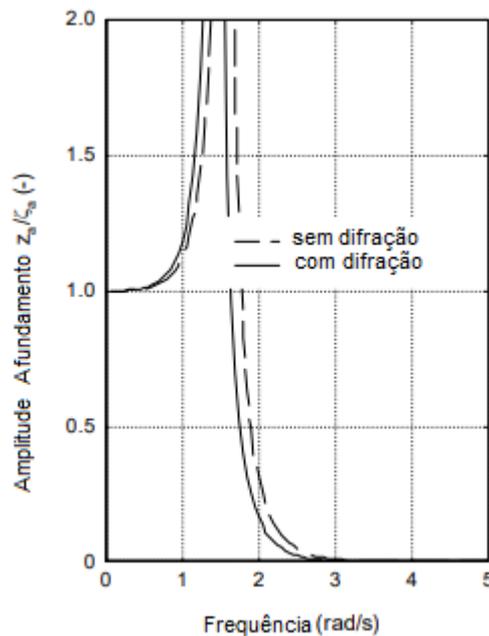
$$(m + a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = a\ddot{\zeta} + b\dot{\zeta} + c\zeta \quad (4.6)$$

A resposta em afundamento, a uma onda regular pode ser descrita como a amplitude de afundamento,

$$\frac{z_a}{\zeta_a} = e^{-\kappa T} \sqrt{\frac{\{c - a\omega^2\}^2 + \{b\omega\}^2}{\{c - (m - a)\omega^2\}^2 + \{b\omega\}^2}} \quad (4.7)$$

A função descrita acima é referida como RAO e é representada na Figura 34.

Figura 34 RAO para um cilindro sob efeito de ondas.



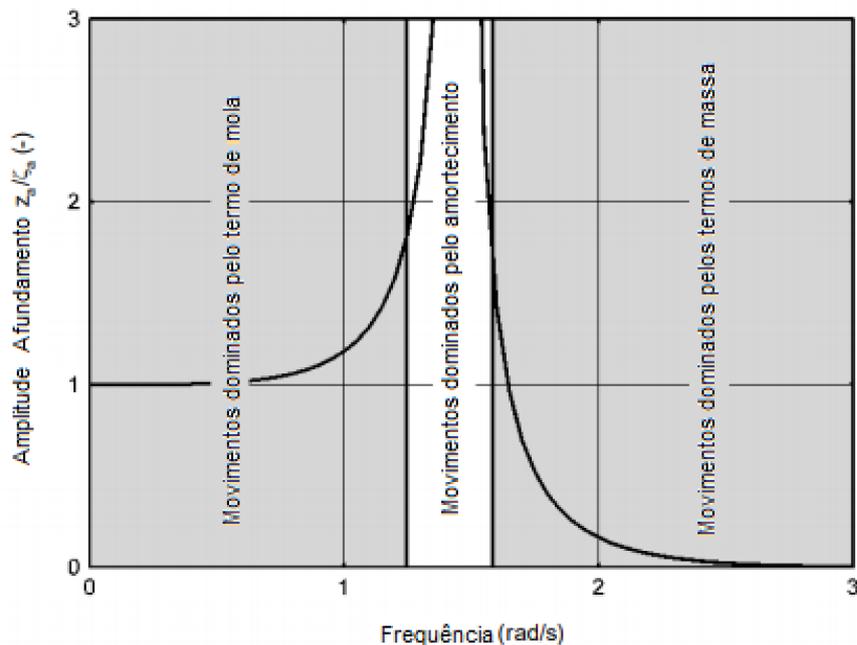
Fonte: Adaptado de Journée e Massie (2001).

Para frequências baixas, os movimentos verticais são dominados pelos efeitos de restauração de mola. Com o RAO tendendo a 1 isso significa que o corpo irá seguir o movimento das ondas. Próximo a frequência natural os movimentos são dominados pelos efeitos do amortecimento, o que significa se o amortecimento for baixo o corpo apresentará ressonância e assim as respostas serão ampliadas. Quando a frequência é alta, passando da faixa próxima a frequência natural, os movimentos passam a ser dominados pelos efeitos de massa, o que implica na situação onde as ondas perdem a influência sobre o comportamento do corpo, como visto em Journée e Massie (2001) e resumido na Figura 35.

Caso a frequência natural do alvo para o movimento vertical, de afundamento, esteja próxima das frequências testadas ou que as frequências sejam maiores que a frequência natural do alvo, isso fará com que ele não responda de acordo com a elevação da onda. Esse pode ser

um dos motivos para que o alvo esteja apresentando os cavados maiores que os apresentados no capacitor. Devido a massa praticamente desprezível do alvo os efeitos de inércia foram desconsiderados no início do estudo, contudo estes componentes e os termos de amortecimento podem ser a causa das defasagens apresentadas.

Figura 35 Termos dominantes na amplitude de resposta com relação a frequência



Fonte: Adaptado de Journée e Massie (2001).

Os resultados para as ondas irregulares não apresentam o problema da defasagem nos cavados encontrados nas ondas regulares de alta frequência. Como pode ser visto nas tabelas a seguir (Tabela 17 Resultados para o registro de onda O14, $H_s = 44,44$ mm e $T_p = 1,05$ s. Tabela 17 e Tabela 18) a diferença entre os valores para a altura de onda entre os dois sinais é muito menor, e no sensor onde a diferença chega a 6% é possível notar que o sensor capacitivo está desviando mais do valor esperado. Nas tabelas os índices c representam o sensor capacitivo e i o sensor óptico, T_p é o valor para o período equivalente a maior frequência, H_s é a altura de onda calculada como quatro vezes a raiz quadrada da variância e T_z se refere ao período dos zeros ascendentes.

Tabela 17 Resultados para o registro de onda O14, Hs = 44,44 mm e Tp = 1,05 s.

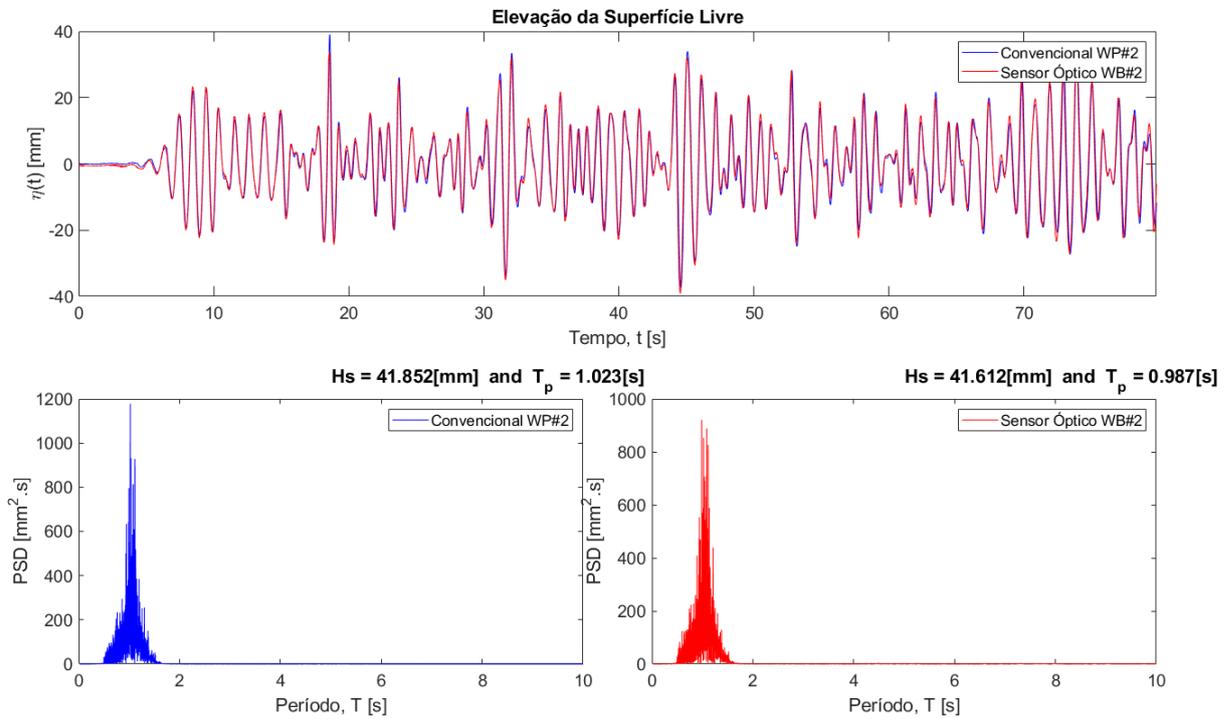
Par	Tpc	Hsc	Tzc	Tpi	Hsi	Tzi	Diferença
1	1.023	42.428	0.871	1.114	41.417	0.765	-2%
2	1.023	41.84	0.8740	0.987	41.61	0.8389	-1%
3	1.023	41.911	0.873	0.987	42.053	0.838	0%
4	1.023	41.852	0.8740	0.9870	41.612	0.8389	-1%
5	1.023	41.513	0.871	1.023	41.268	0.844	-1%
6	0.994	42.478	0.871	0.987	41.422	0.841	-2%

Tabela 18 Resultados para o registro de onda O15, Hs = 44,44 mm e Tp = 1,9 s.

Par	Tpc	Hsc	Tzc	Tpi	Hsi	Tzi	Diferença
1	1.940	41.926	1.417	1.906	41.496	1.308	-1%
2	1.940	41.841	1.426	1.906	41.492	1.337	-1%
3	1.940	41.844	1.428	1.906	41.773	1.366	0%
4	1.940	39.325	1.420	1.906	41.542	1.369	6%
5	1.940	41.553	1.434	1.906	41.625	1.359	0%
6	1.940	42.372	1.438	1.906	41.986	1.379	-1%

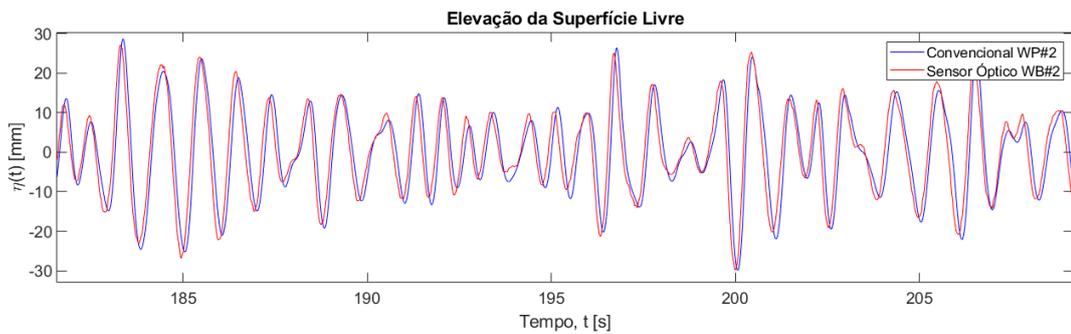
Ao se avaliar os registros no tempo nota-se que o que causava os cavados acentuados não possui mais tanta influência na resposta do sensor. O sensor óptico apresenta boa correlação com o sinal do sensor capacitivo, e os espectros também apresentam boa semelhança (Figura 36 a Figura 39)

Figura 36 Resposta dos sensores a onda irregular O14



Fonte: Autora.

Figura 37 Recorte aproximado do registro no tempo para a onda O14.

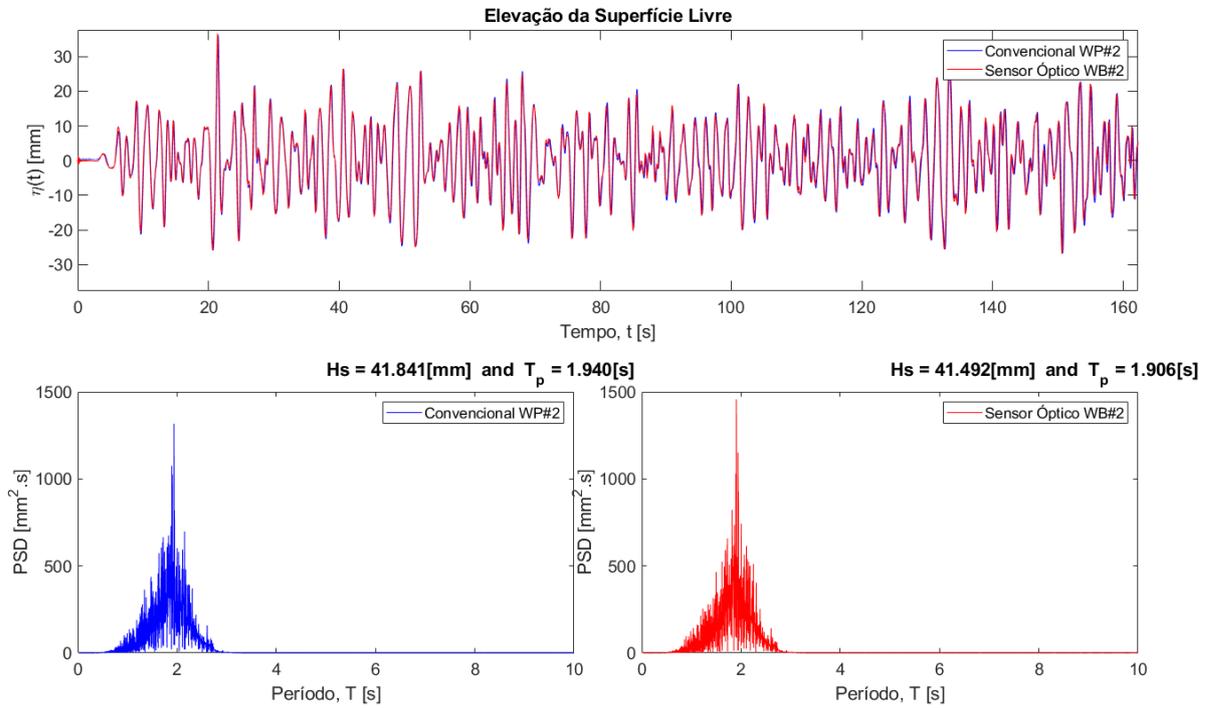


Fonte: Autora.

Embora apresente uma pequena defasagem de fase com o sinal do sensor capacitivo, esse efeito não chega a influenciar significativamente os parâmetros obtidos para a onda gerada.

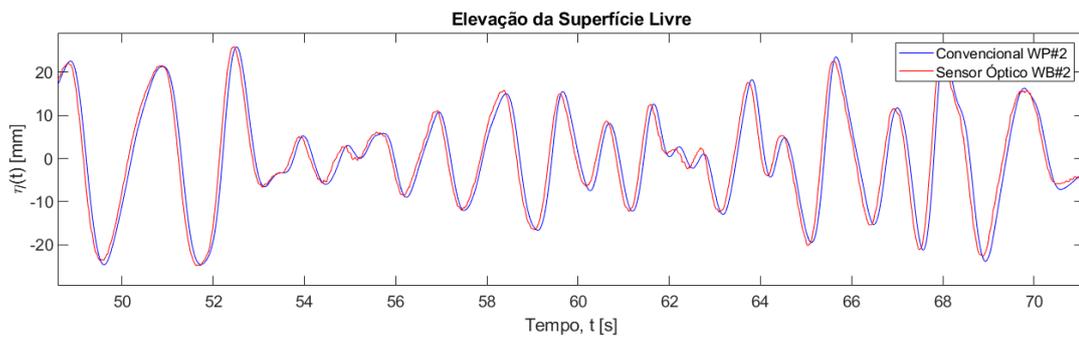
Os resultados de todos os pares de sensores avaliados para as ondas regulares e irregulares são apresentados no Apêndice B.

Figura 38 Resposta dos sensores a onda irregular O15



Fonte: Autora.

Figura 39 Recorte aproximado do registro no tempo para a onda O15.



Fonte: Autora.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram ensaiados sensores ópticos para a determinação de parâmetros de ondas regulares, comparados com sistemas convencionais de sensores capacitivos. A opção por sensores ópticos foi feita baseada no fato de ser um sensor não intrusivo no meio avaliado, e possuir alto rendimento quando considerada a necessidade de recalibração. Ainda, apresenta uma alta produtividade, podendo ser utilizado em grande número ao mesmo tempo com pouca interferência, sempre tomando cuidado com o posicionamento das câmeras para garantir que todos os alvos sejam capturados. Em se tratando do custo, pode-se dizer que é um sistema de baixo custo considerando que o rastreamento de imagem já é utilizado em laboratórios durante a realização de experimentos para a medição de deslocamentos.

Durante o experimento foram ensaiadas ondas regulares e irregulares. Em relação aos resultados obtidos, é possível determinar que o sensor óptico apresenta uma boa correlação com as medidas apresentadas pelo sistema capacitivo, e assim proporciona a medida dos parâmetros para ondas regulares com qualidade satisfatória. Mesmo apresentando uma pequena defasagem nos cavados para as frequências altas em ondas regulares, este efeito não afeta consideravelmente os resultados para as ondas irregulares. Como em sua maioria os experimentos em laboratório necessitam da geração de mares e não apenas ondas regulares o sensor óptico se mostrou uma opção alternativa a ser aplicada na medição de ondas em experimentos realizados em bases oceânicas.

Os objetivos propostos para esse trabalho foram alcançados, a comparação entre os dois tipos de sensores e a qualificação dos resultados obtidos foram realizadas, com isso pode-se identificar pontos de melhoria e como proceder a partir do que foi discutido neste trabalho. As incertezas encontradas no sistema óptico são comparáveis com o sistema capacitivo, variando de acordo com o período de onda ensaiada. Isso indica que para obter melhores resultados o tempo de duração para cada teste deve ser o suficiente para que o número de ciclos captados seja o maior possível, contribuindo para as análises estatísticas do sinal.

A aplicação do sensor óptico em testes laboratoriais trará grande benefício e ampliará as possibilidades para a realização de medidas durante os testes em pontos que com os sensores utilizados atualmente não seriam recomendadas. Por ser de fácil instalação, permitir rápida

calibração em conjunto com o sistema de medição de deslocamento do modelo, e apresentar pouca interferência com o deslocamento do fluido, ou com outros aparelhos utilizados durante a execução de um teste, o sistema óptico é um sistema atrativo para aplicação na medição de ondas.

5.1 ESTUDOS FUTUROS

Para aprimorar o sistema óptico, e melhorar sua resposta em altas frequências para ondas regulares fica proposto neste trabalho a realização de algumas investigações futuras. O primeiro ponto a ser avaliado, de fácil execução, seria investigar se há interferências por reflexos da iluminação do laboratório na água, afetando assim a qualidade dos resultados. Este é um problema presente principalmente para os sensores ópticos ou por imagem quando aplicados em ambientes com iluminação artificial. A primeira ação seria realizar o mesmo experimento com a iluminação do ambiente reduzida, pois, como as câmeras operam com a emissão e reflexo de raios infra vermelhos, elas não dependem da iluminação do ambiente para identificar os alvos. Um segundo ponto seria fazer o uso de alvos ativos, ou seja, com iluminação própria, pois dessa maneira as imagens captadas pela câmera possuiriam alta intensidade de luz, facilitando o reconhecimento e rastreamento dos alvos.

Como este problema do cavado acentuado apareceu de maneira constante no sinal, ele pode estar relacionado a uma questão dinâmica do alvo, sendo em primeira instância, relacionado a construção do sistema. Alguma contribuição inercial ou de amortecimento pode causar o atraso na resposta do alvo ao movimento da onda. Algum efeito de atrito entre o alvo e o cabo tensionado poderia ser uma das forças dissipativas. Para que seja possível desconsiderar essa hipótese um teste com os alvos livres, sem restrições de movimento pelo cabo, poderia ser realizado com o intuito de verificar se o mesmo efeito aparece. O problema com essa tentativa é de que os alvos tenderiam a se deslocar para longe das ondas de amplitude mais alta e isto faria com que o registro no tempo fosse curto, comprometendo a qualidade dos resultados. Alguns efeitos de capilaridade no tubo por onde passam os cabos poderiam adicionar resultantes dissipativas fazendo com que o alvo apresente um comportamento de “aderir” a superfície da água.

Um estudo numérico, podendo fazer uso de programas de teoria de potencial, seria interessante para considerar as respostas do alvo quando sujeito a oscilação da onda. Como

comentado anteriormente, caso a frequência de oscilação da onda esteja próxima ou acima da frequência natural do alvo para o movimento vertical, dependendo do RAO para o alvo, o mesmo não responderia de forma linear ao mesmo estímulo. Seria interessante avaliar experimentalmente outros formatos ou materiais para os alvos, complementando a análise do RAO. Como a massa é quase desprezível, as forças hidrodinâmicas teriam a maior contribuição, e elas estão relacionadas ao volume deslocado e à área da superfície molhada, não diretamente à massa do alvo.

Por fim, um estudo de sensibilidade com o tamanho do alvo flutuante, como apresentado nos estudos da seção 2.3.1, o tamanho do alvo contribui para as incertezas do sistema. Contudo isso tornaria a construção dos alvos mais complexas e de custo mais elevado.

REFERÊNCIAS

- BABANIN, A.V. Breaking of Ocean Surface Waves. **Acta Physica Slovaca**. Bratislava, p. 305-535. ago. 2009.
- BHASKARAN, Prasad K. Challenges and Future Directions in Ocean Wave Modeling - A Review. **Journal of Extreme Events**. p. 1950004. set. 2019.
- BRETSCHNEIDER, C. L. Discussions on investigations of statistics of wave height. **Journal Watways Harb. Coastal Engng Div. Am. Soc. civ. Engrs**, p. 153-166. 1964.
- BURGER, Birgitta; PUUPPONEN, Anna; JANTUNEN, Tommi. Synchronizing eye tracking and optical motion capture: How to bring them together. **Journal of Eye Movement Research**. Finland, p. 1-16. maio 2018.
- CARNEIRO, Mario L. **Desenvolvimento de Dispositivo de Geração e Absorção Ativa de Ondas para Tanque de Ensaio de Estruturas Oceânicas**. 2007. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CEM. **Coastal Engineering Manual 1110-2-1100**. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineer, 2002.
- CHAKRABARTI, Subrata K. Laboratory generated waves and waves theories, **Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division**. ASCE, August, 1980.106.
- CHAKRABARTI, Subrata K. **Hydrodynamics of Offshore Structures**. Southhampton: Wit Press, 1987.
- CHAKRABARTI, Subrata K. **Offshore Structure Modeling**. Illinois: World Scientific, 1994. 9 v. (Advanced Series on Ocean Engineering).
- DEAN, Robert G. Relative validity of water wave theories. **Proceedings on Civil Engineering in Oceans**. ASCE, San Francisco, p. 1-30,1968
- DEAN, Robert G; DALRYMPLE, Robert A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. Singapore: World Scientific, 1991. 2 v. (Advanced Series on Ocean Engineering).
- ELMORE, William C; A HEALD, Mark. **Physics of Waves**. Swarthmore: McGraw-Hill, 1969.
- ERIKSON, Li H. A method to extract wave tank data using video imagery and its comparison to conventional data collection techniques. **Computers & Geosciences**. Suécia, p. 371-384. out. 2004.
- ESTÉVEZ-GARCÍA, Román et al. Open Data Motion Capture: MOCAP-ULL Database. In: International Conference on Virtual and Augmented Reality in Education, 3., 2015, Monterrey. **Procedia Computer Science**. Canary Islands: Elsevier, 2015. v. 75, p. 316 - 326.

FALCÃO, António F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Lisbon, p. 899-918. out. 2009.

FUJARRA, André Luis Condino et al. Optical motion capture as a technique for measuring the water wave elevation. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON APPLIED OFFSHORE HYDRODYNAMICS, 4., 2009, Rio de Janeiro. **Conference paper**. Rio de Janeiro: IWAOH, 2009. p. 1 - 12.

GABL, Roman et al. Capturing the motion of the free surface of a fluid stored within a floating structure. **Water**. Austria, p. 1-16. dez. 2018.

HARRIS, Terry J. Optical Design at APL. **John Hopkins APL Technical Digest**, Maryland, v. 9, n. 4, p.319-327, dez. 1988.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. **7.5-02-07-03.2: Analysis Procedures for Model Test in Regular Waves**. 2 ed. Copenhagen: Quality Systems Group of the 28th ITTC, 2017. 5 p.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. **7.5-02-07-03.14 Analysis Procedures for Model Test in Regular Waves**. 1 ed. Copenhagen: Quality Systems Group of the 28th ITTC, 2017. 6 p.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. **7.5-02-01-01: Guide to the Expression of Uncertainty in Experimental Hydrodynamics**. 2 ed. Copenhagen: Quality Systems Group of the 28th ITTC, 2016. 18 p.

JOURNÉE, J.M.J.; MASSIE, W.W. **Offshore Hydromechanics**. Delft: Delft University Of Technology, 2001. Disponível em: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Introduction_Offshore_Hydromechanics.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

KATZ, I. Ocean Wave Measurements. **APL Technical Digest**. Maryland, p. 2-6. out. 1964.

LAMB, Horace. **Hydrodynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.

MARTINS, Joao Alcino de Andrade et al. Laboratory Wave Probes Dynamic Performance Evaluation. In: XX COPINAVAL, 2007, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: IPIN,2007.

MASSEL, Stanislaw R. **Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction**. 3. ed. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2018.

MELLO, Pedro Cardozo de. **Sistema de Automação e Controle para Tanques Oceânicos com Múltiplos Atuadores**. 2012. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MENACHE, Alberto. **Understanding Motion Capture for Computer Animation**. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2011.

WHITTENBURY, C. G.; HUBER, E. A.; NEWELL, G. S. Instrument for Measuring Water Waves. **Review of Scientific Instruments**. Illinois, p. 674-676. 08 maio 1959.

PAYNE, Grégory S et al. Development and preliminary assessment of an optical wave gauge. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 8., 2009, Suécia. **Proceedings...** . Uppsala, 2009. p. 1 - 8

QIU, Wei et al. Uncertainties related to predictions of loads and responses for ocean and offshore structures. **Ocean Engineering**. Elsevier, p. 58-67. abr. 2014.

STOKES, G. G. On the theory of oscillatory waves. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 8, p.197-229, 1847.

STOKES, G G. **Mathematical and Physical Papers**. Estados Unidos: Kessinger Publishing, 1880.

TOMASEVICZ, Curtis L. et al. Validity and reliability assessment of 3-D camera-based capture barbell velocity tracking device. **Journal of Science and Medicine in Sport**. Lincoln, p. 1-8. ago. 2019.

ZHU, Alex Zihao et al. The Multivehicle Stereo Event Camera Dataset: An Event Camera Dataset for 3D Perception. **IEEE Robotics and Automation Letters**. Philadelphia, p. 2032-2039. jul. 2018.

APÊNDICE A – Rotina Matlab

```

%=====
% Rotina para Análise dos Transdutores de Medida de Ondas
%=====
% Inicialização
%=====
clc, close all, clear all, more off

%pkg load signal %carregando pacote para funcao pwelch
%=====
[NomeArq, OndeArq] = uigetfile('*.mat', 'Arquivo?');
load([OndeArq, NomeArq])
%=====
% Organizando os Dados
%=====
[N,M] = size(WP);
cutON = 1;
cutOFF = N;
for m=1:M
    ByConv(:,m) = WP(cutON:cutOFF,m)-mean(WP(:,m));
    if m~=size(WP,2)
        ByImag(:,m) = WB(cutON:cutOFF,3*m)-mean(WB(:,3*m));
        ByImag(:,m) = ByImag(:,m)-mean(ByImag(1:20,m));
    end
end
[N,M] = size(ByConv);
t = t(cutON:cutOFF)-t(cutON);
clear WP WB
%=====
% Início das análises por par de sensor, loop posição
%=====
for Pos = 1:6
    %Pos = 2;
    %=====
    % Corte do trecho a ser analisado
    %=====
    RConv = ByConv(:,Pos);
    RImag = ByImag(:,Pos);

    f1 = figure;
    plot(t, RConv, t, RImag);
    grid on
    [Xcut1, Ycut1, Clicks] = ginput(2);
    time = t(find((t>=Xcut1(1,1)) & (t<=Xcut1(2,1))));
    RC_conv = RConv(find((t>=Xcut1(1,1)) & (t<=Xcut1(2,1))));
    RC_imag = RImag(find((t>=Xcut1(1,1)) & (t<=Xcut1(2,1))));
    close(f1)
    time = time-time(1);
    %===== Tratando RC_imag com HAMPEL =====
    RC_imag = hampel(RC_imag,10,1.5);
    %=====
    % Comparando os Resultados de Elevação da Superfície Livre - WP e WB

```

```

%=====
[ t_c, data_c] = TST_cut(NomeArq,time,RC_conv,['WP' num2str(Pos)]);
tal = t_c(length(t_c))-t_c(1);
[N,M] = size(data_c);
fs = N/tal;
[FDconv,fr_c] = pwelch(data_c,boxcar(N),0,N,fs);
[FDconvmax,ind]=max(FDconv);
H_FDconv = 2*sqrt(2*FDconvmax/tal);
Tpconv = 1/fr_c(ind);
STDconv = std(data_c);
%===== WB =====
[ t_i, data_i] = TST_cut(NomeArq,time,RC_imag,['WB' num2str(Pos)]);
tal = t_i(length(t_i))-t_i(1);
[N,M] = size(data_i);
fs = N/tal;
[FDimag,fr_i] = pwelch(data_i,boxcar(N),0,N,fs);
[FDimagmax,ind]=max(FDimag);
H_FDimag = 2*sqrt(2*FDimagmax/tal);
Tpimag = 1/fr_i(ind);
STDimag = std(data_i);
%=====
% Apresentação dos Resultados de Elevação da Superfície Livre - SL
%=====
fig1 = figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w');
subplot(2,4,[1:4])
plot(time,RC_conv,'b',time,RC_imag,'r')
legend(['Convencional WP#' num2str(Pos)], ['Sensor Óptico WB#'
num2str(Pos)]);
title('Elevação da Superfície Livre','fontsize',[18])
xlabel('Tempo, t [s]','fontsize',[14])
ylabel('\eta(t) [mm]','fontsize',[14])
set(gca,'fontsize',[14])
%=====Correlação e RMSE=====
R = corrcoef(RC_conv,RC_imag);
R(2)
%RMSE = sqrt(mean((RC_conv-RC_imag).^2))
%=====
% Salvando Resultados em tabela
%=====
Res(Pos,:)= [Pos H_FDconv H_FDimag Tpconv Tpimag STDconv STDimag R(2)];
%=====
% Apresentação dos Resultados da Comparação
%=====
subplot(2,4,[5:6])
plot(1./fr_c,FDconv,'b')
legend(['Convencional WP#' num2str(Pos)])
title(['H = ' num2str(H_FDconv,'%1.3f') '[mm] e T_p = '
num2str(Tpconv,'%1.3f') '[s]',...
'fontsize',[12],'horizontalalignment','left')
xlabel('Período, T [s]','fontsize',[14])
ylabel('PSD [mm^2.s]','fontsize',[14])
set(gca,'xlim',[0,10],'fontsize',[14])
subplot(2,4,[7:8])
plot(1./fr_i,FDimag,'r')
legend(['Sensor Óptico WB#' num2str(Pos)])
title(['H = ' num2str(H_FDimag,'%1.3f') '[mm] e T_p = '
num2str(Tpimag,'%1.3f') '[s]',...
'fontsize',[12],'horizontalalignment','left')

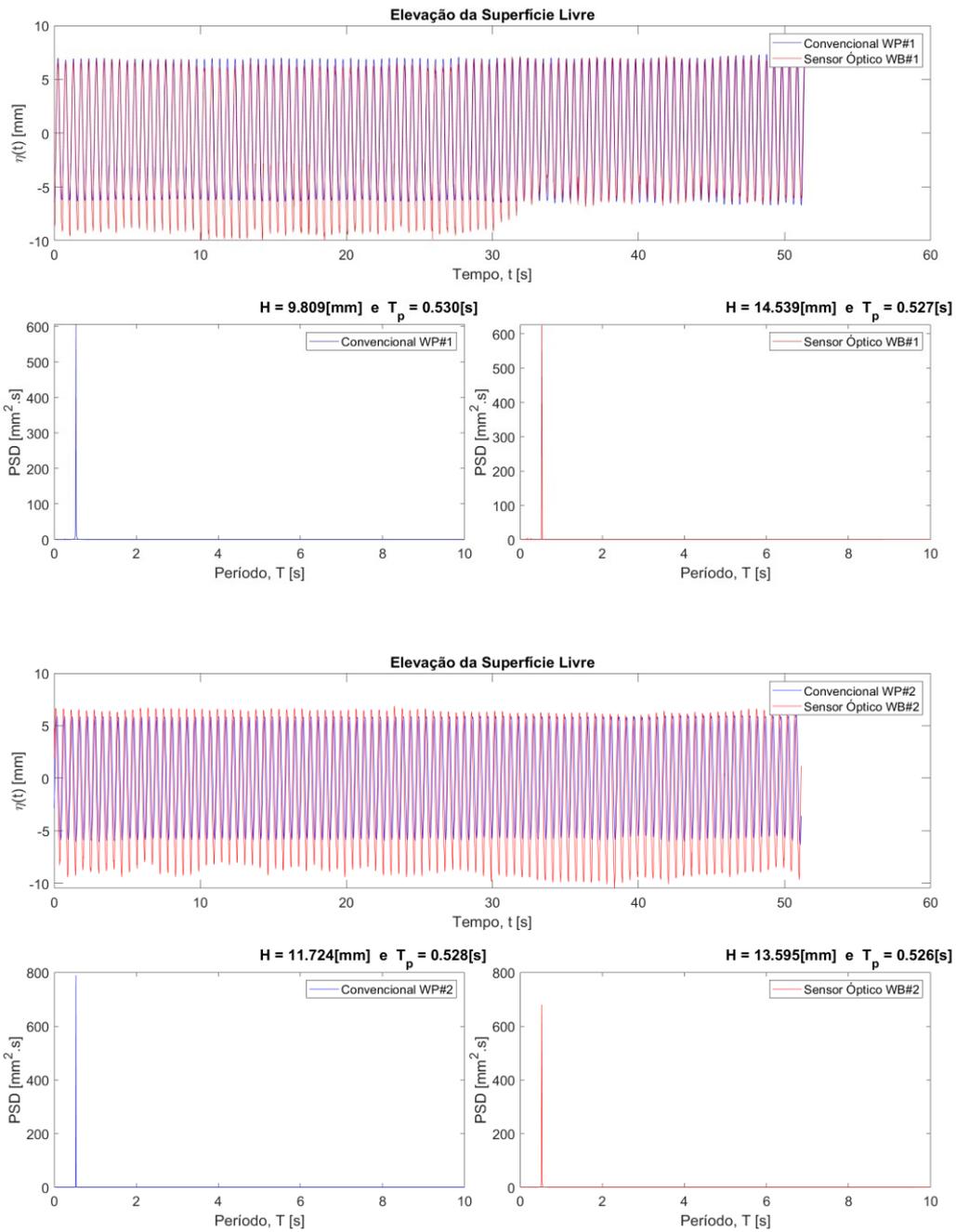
```

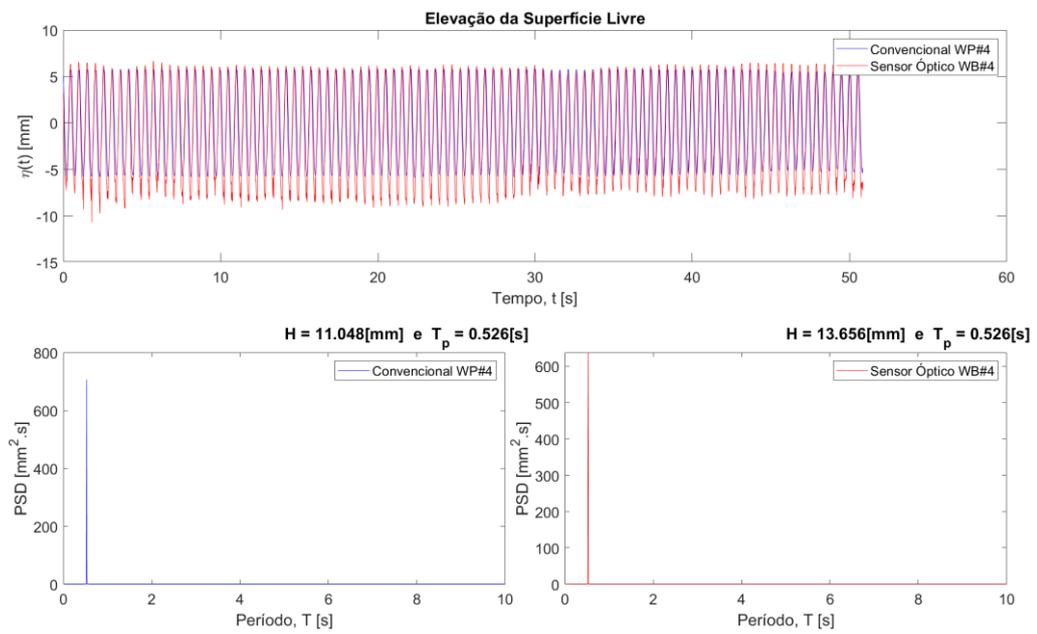
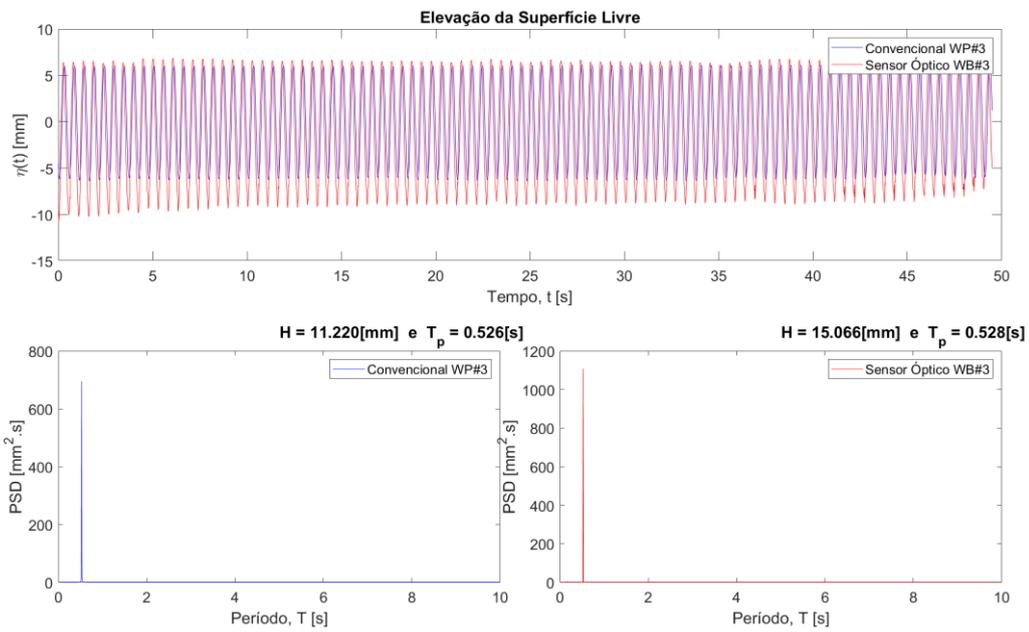
```
xlabel('Período, T [s]','fontsize',[14])
ylabel('PSD [mm^2.s]','fontsize',[14])
set(gca,'xlim',[0,10],'fontsize',[14])
%=====
% Salvando imagens como png, e com nome da onda e posição usados
%=====
NomeArq = erase(NomeArq, '.mat');
NomeFig = strcat( NomeArq, '-', num2str (Pos));
saveas(gcf, NomeFig, 'png')
%=====
% Fim do loop posição
%=====
Pos=Pos+1;
end
NomeRes = strcat(NomeArq, '-Res');
save(NomeRes, 'Res', '-ascii')
```

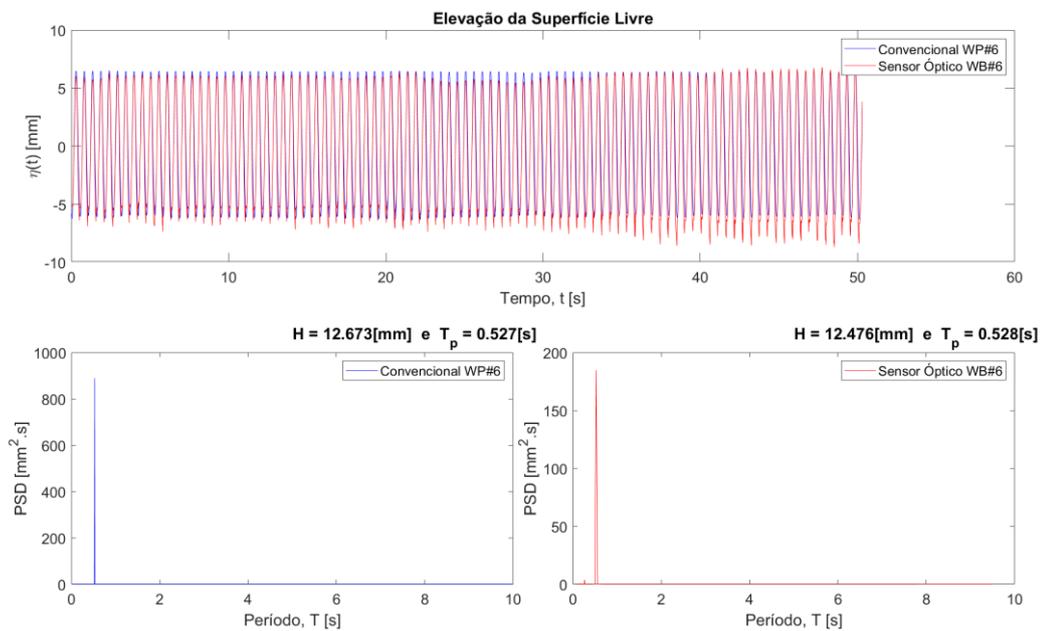
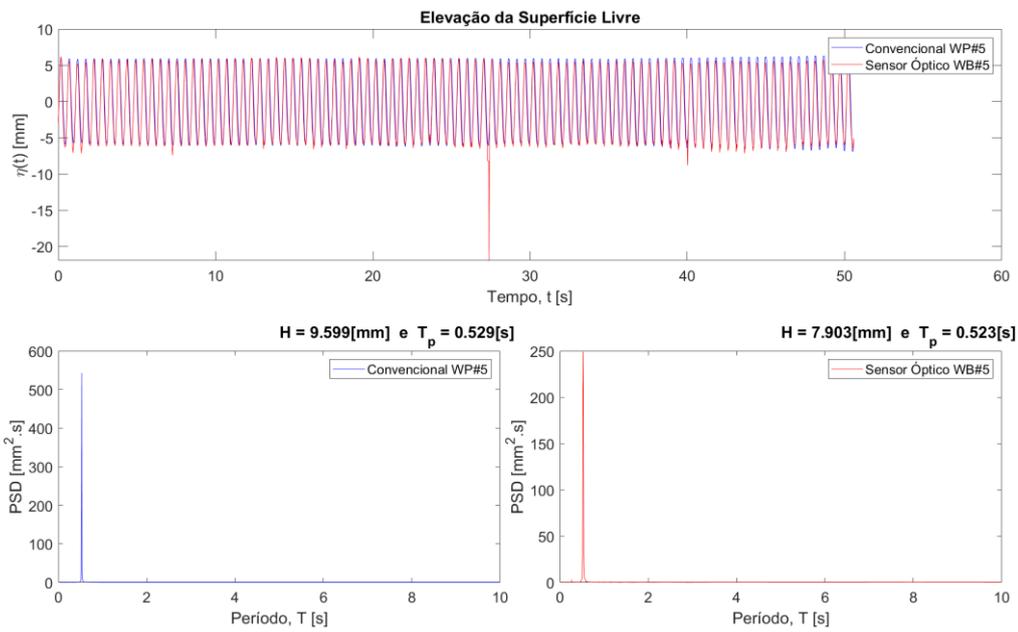
APÊNDICE B – Resultados para todos os pares de sensores

B.1. Resultados para ondas regulares.

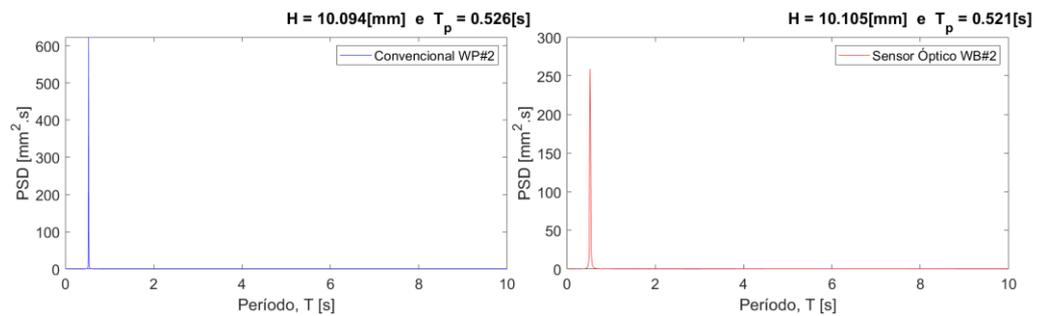
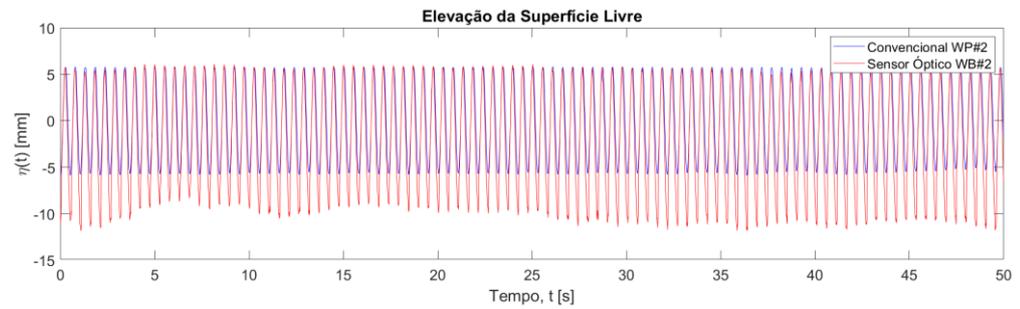
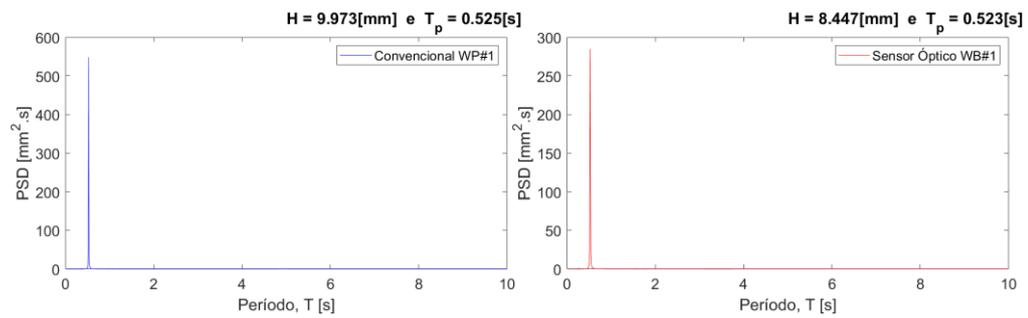
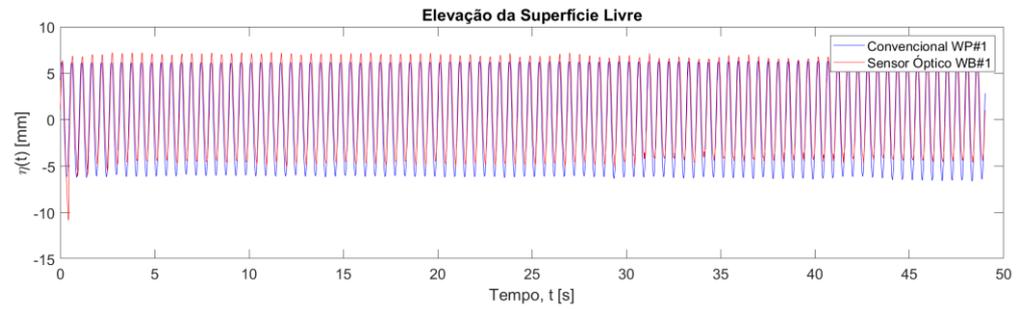
Resultados para ondas regulares do registro O1

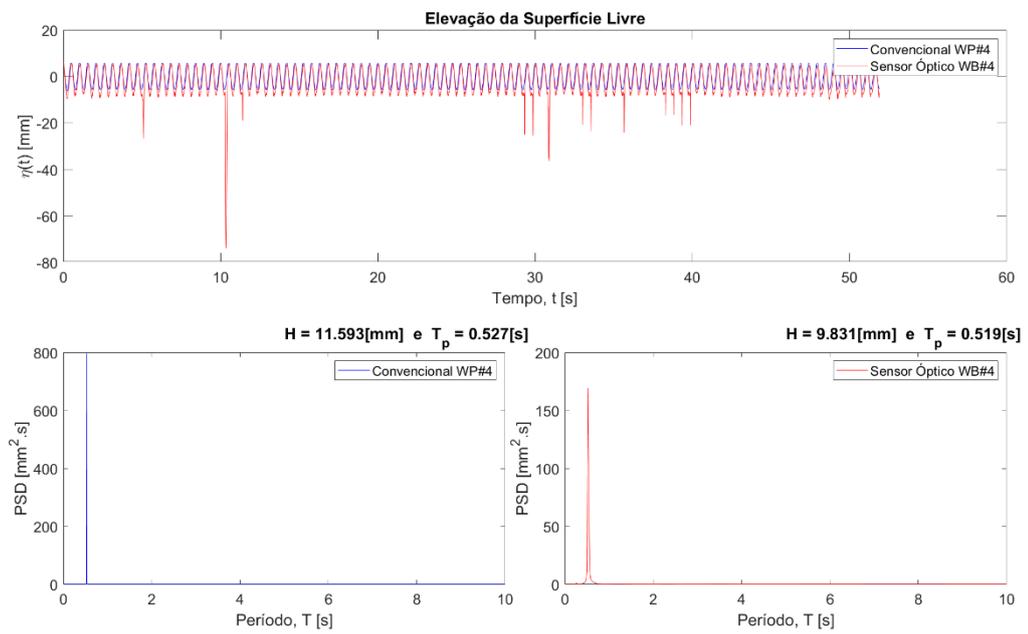
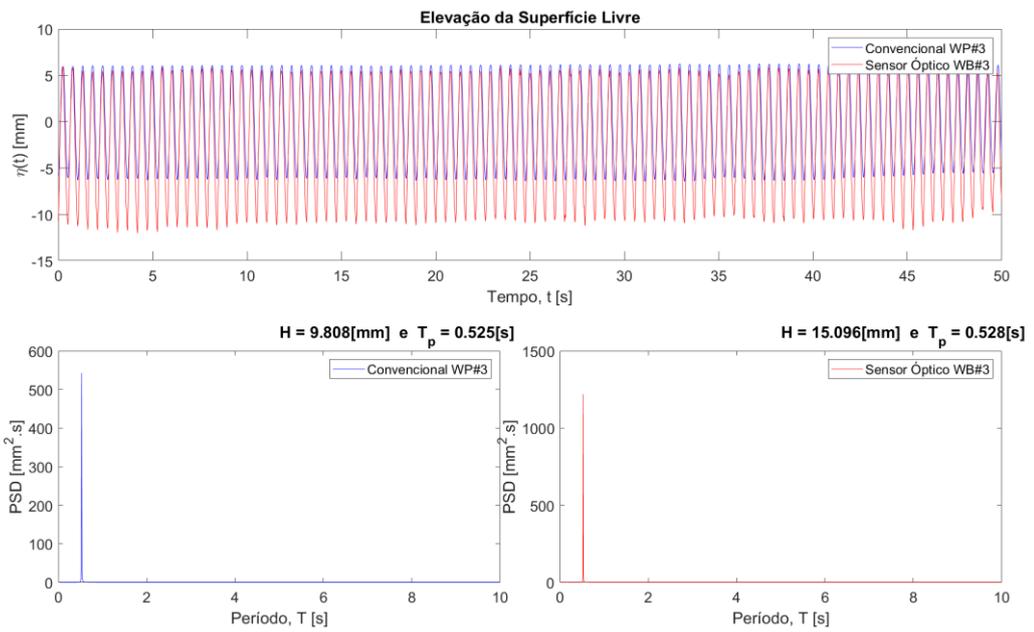


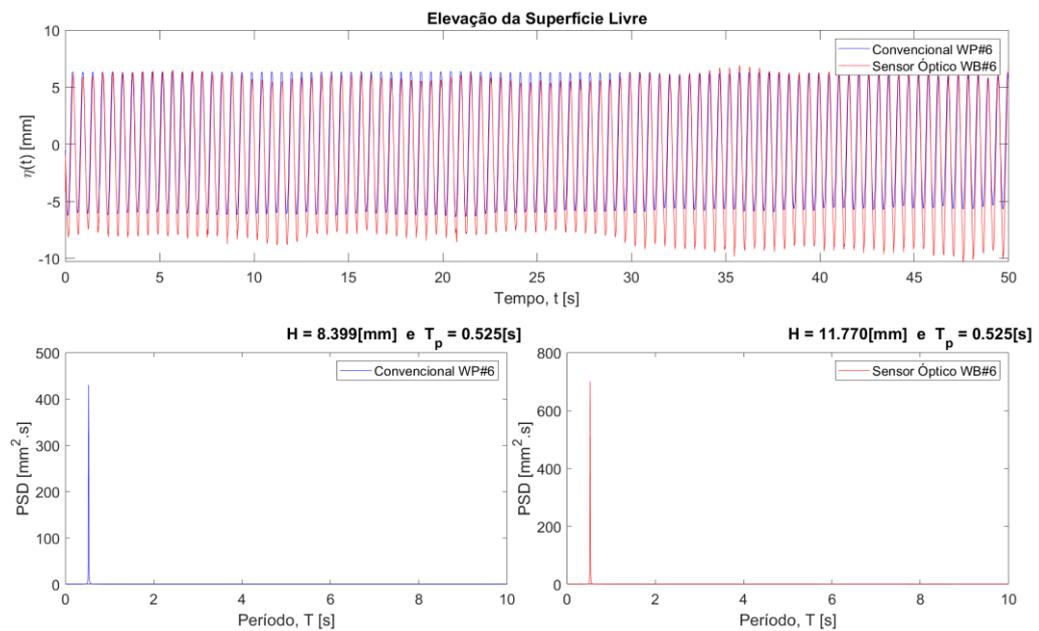
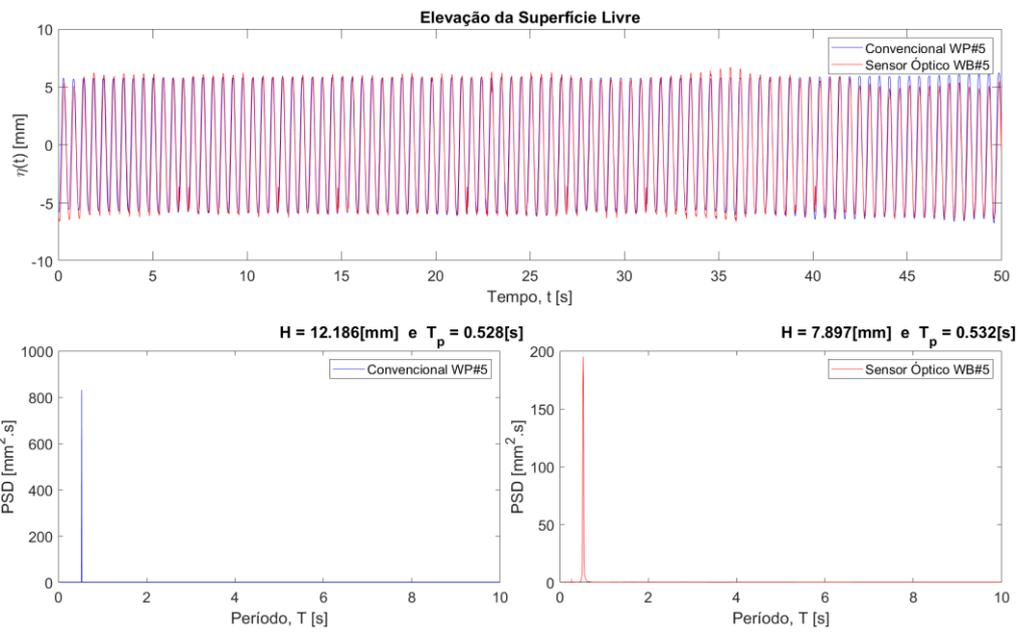




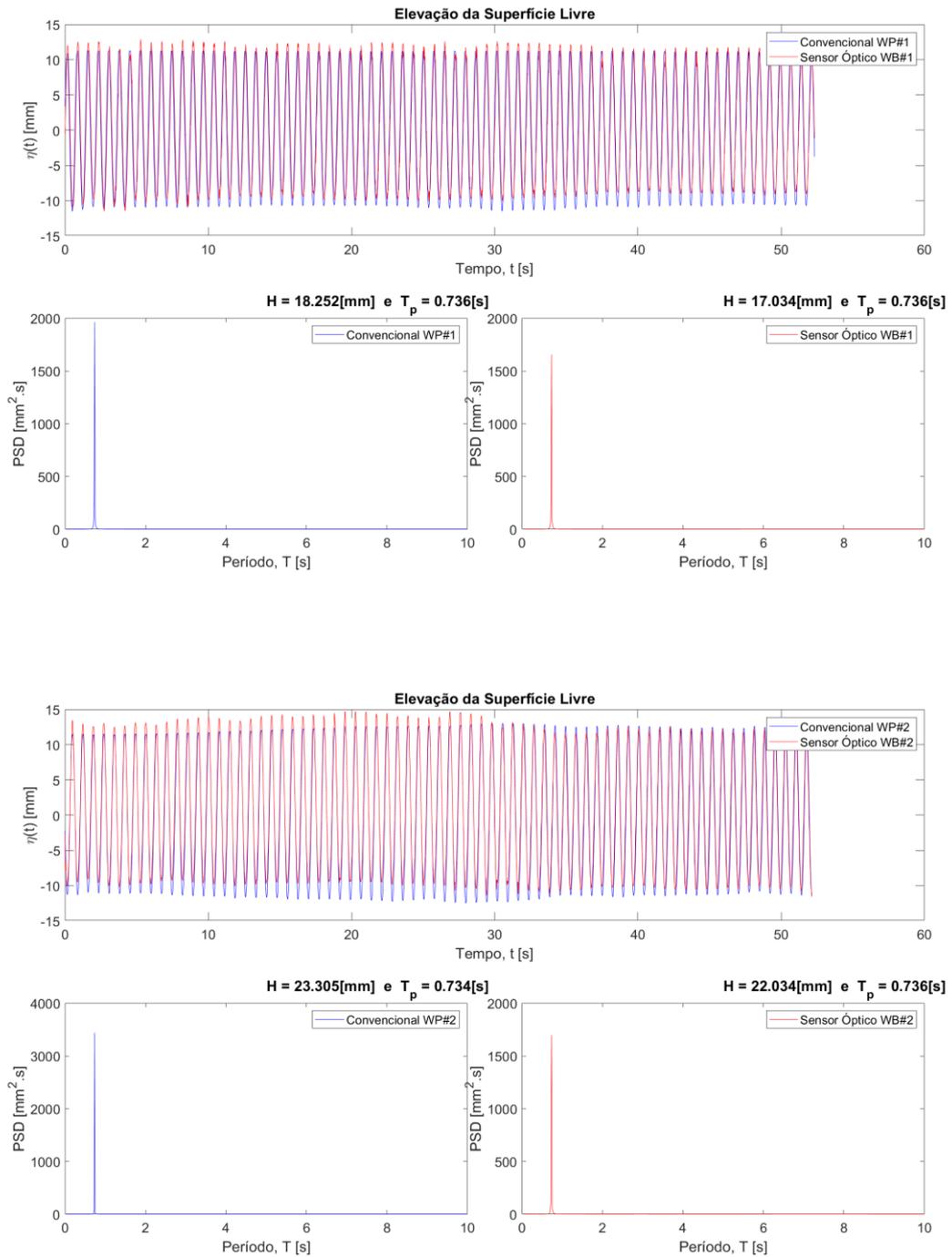
Resultados para ondas regulares do registro O2

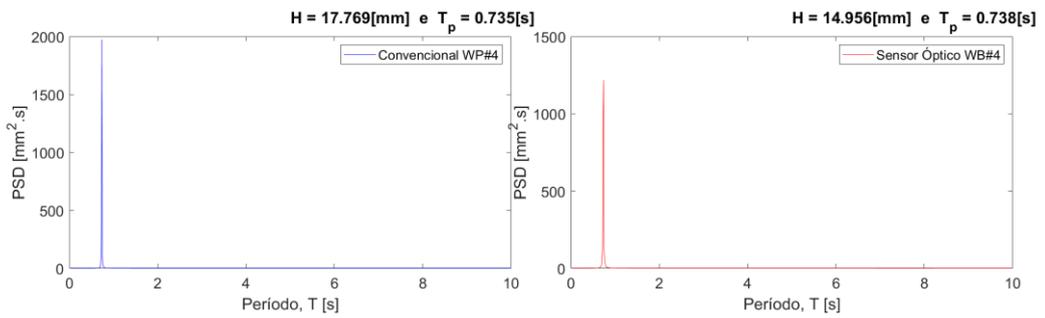
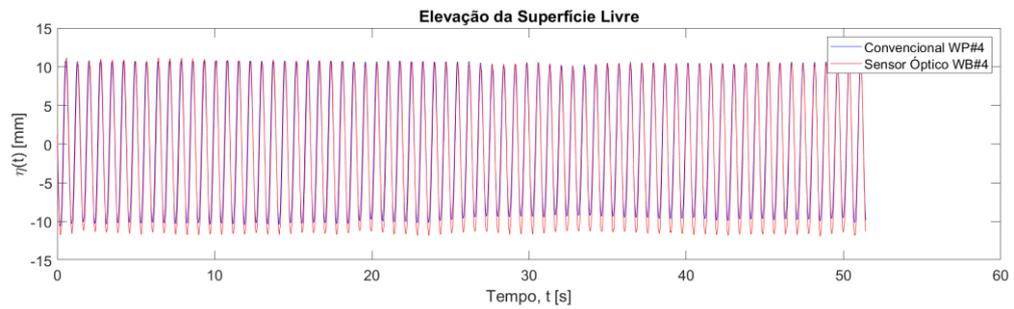
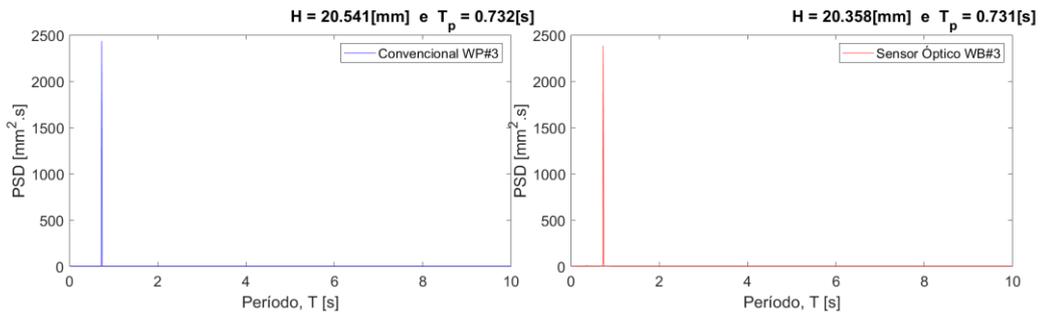
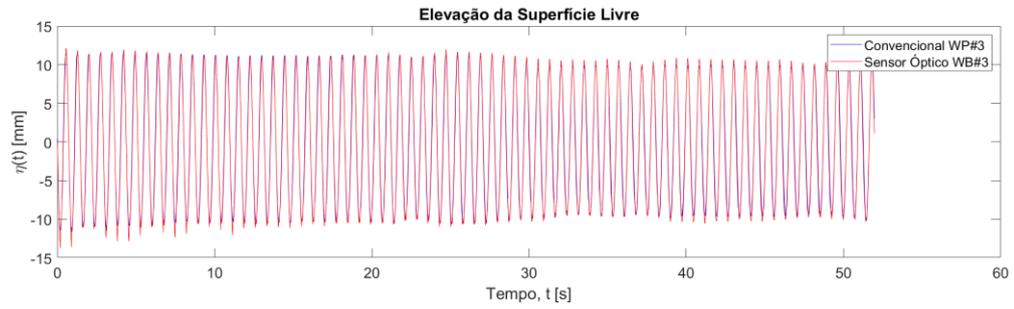


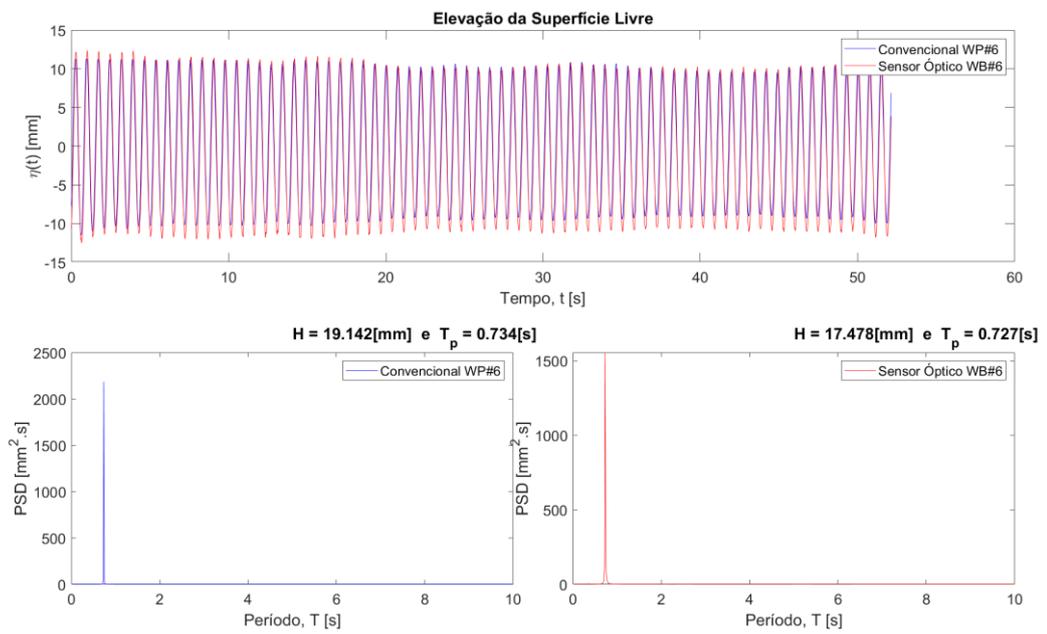
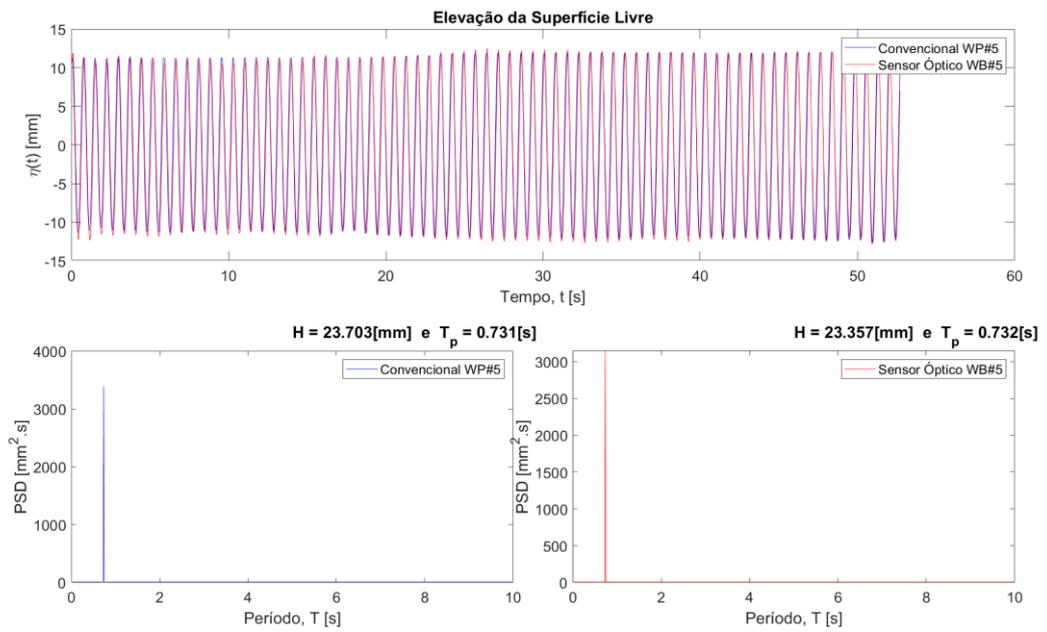




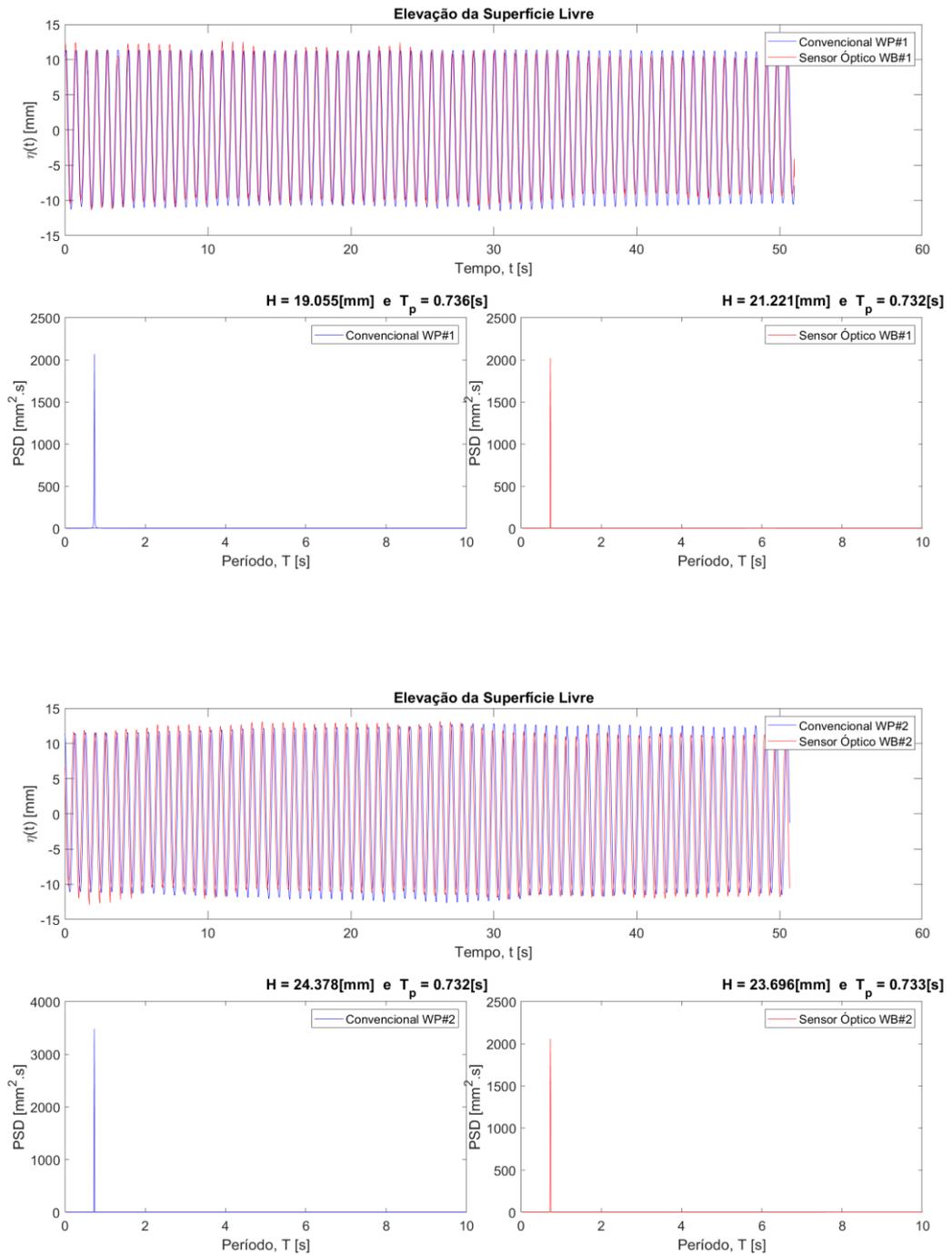
Resultados para ondas regulares do registro O3

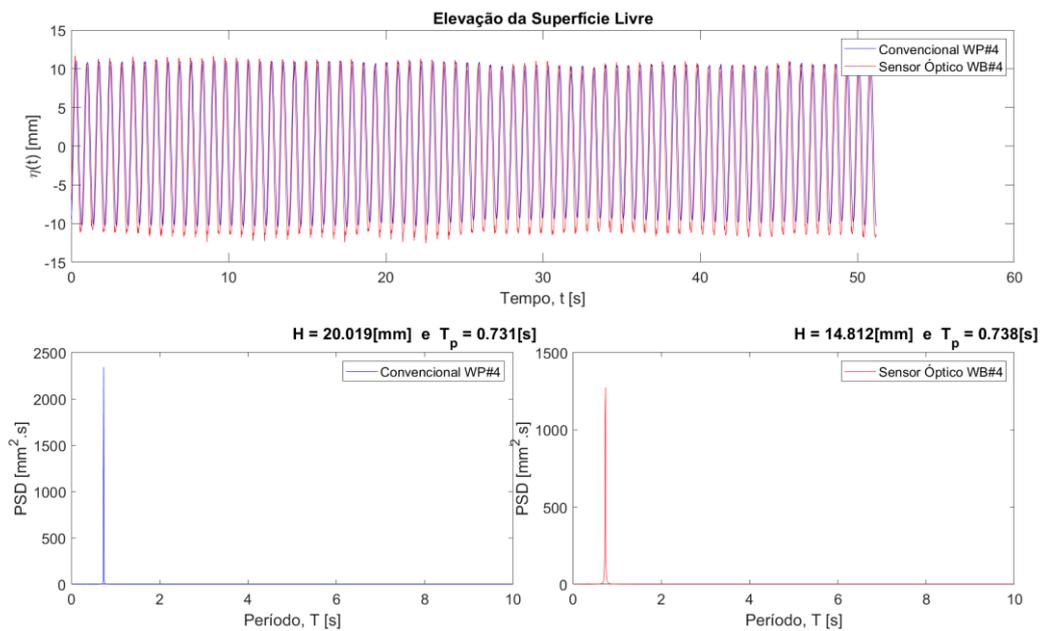
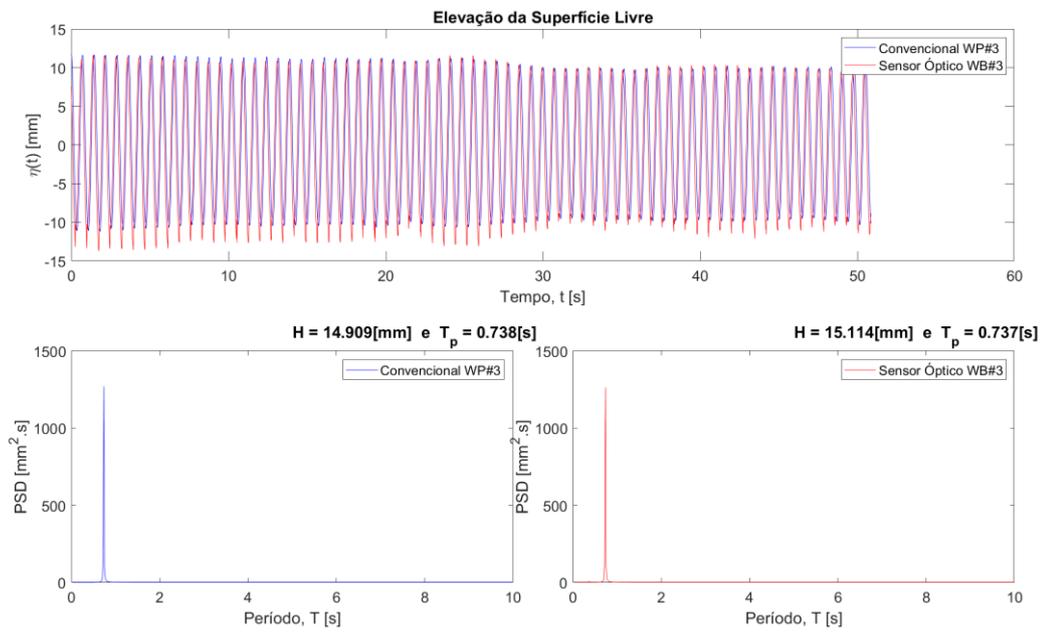


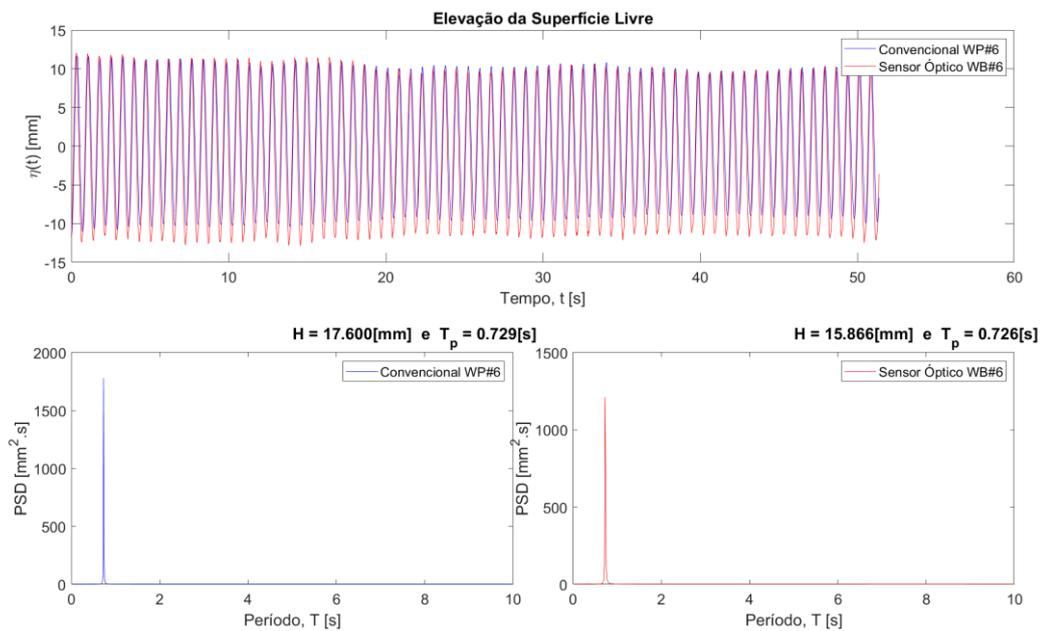
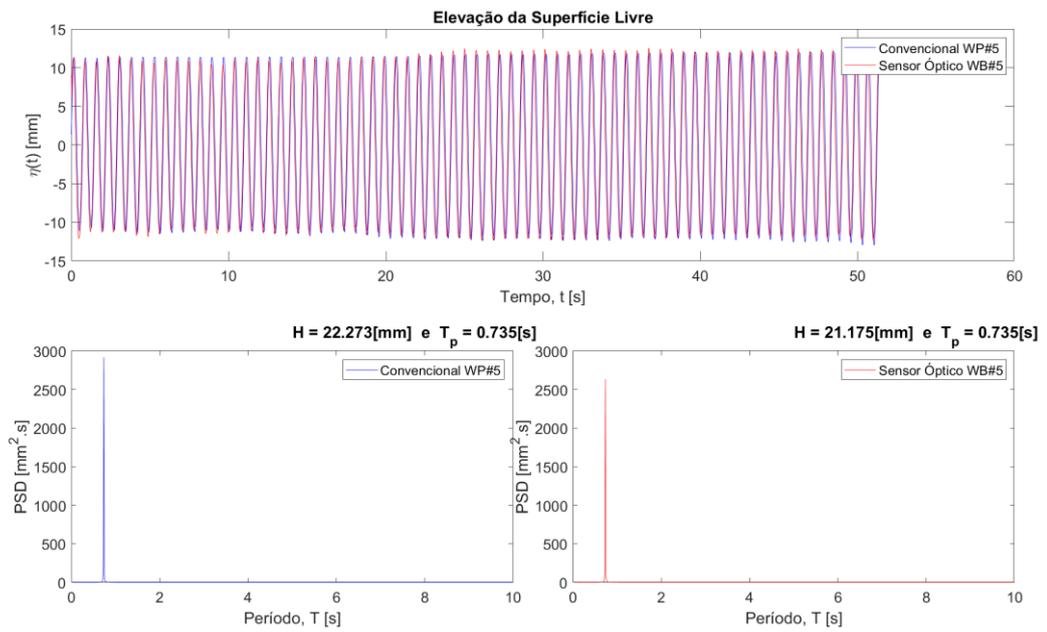




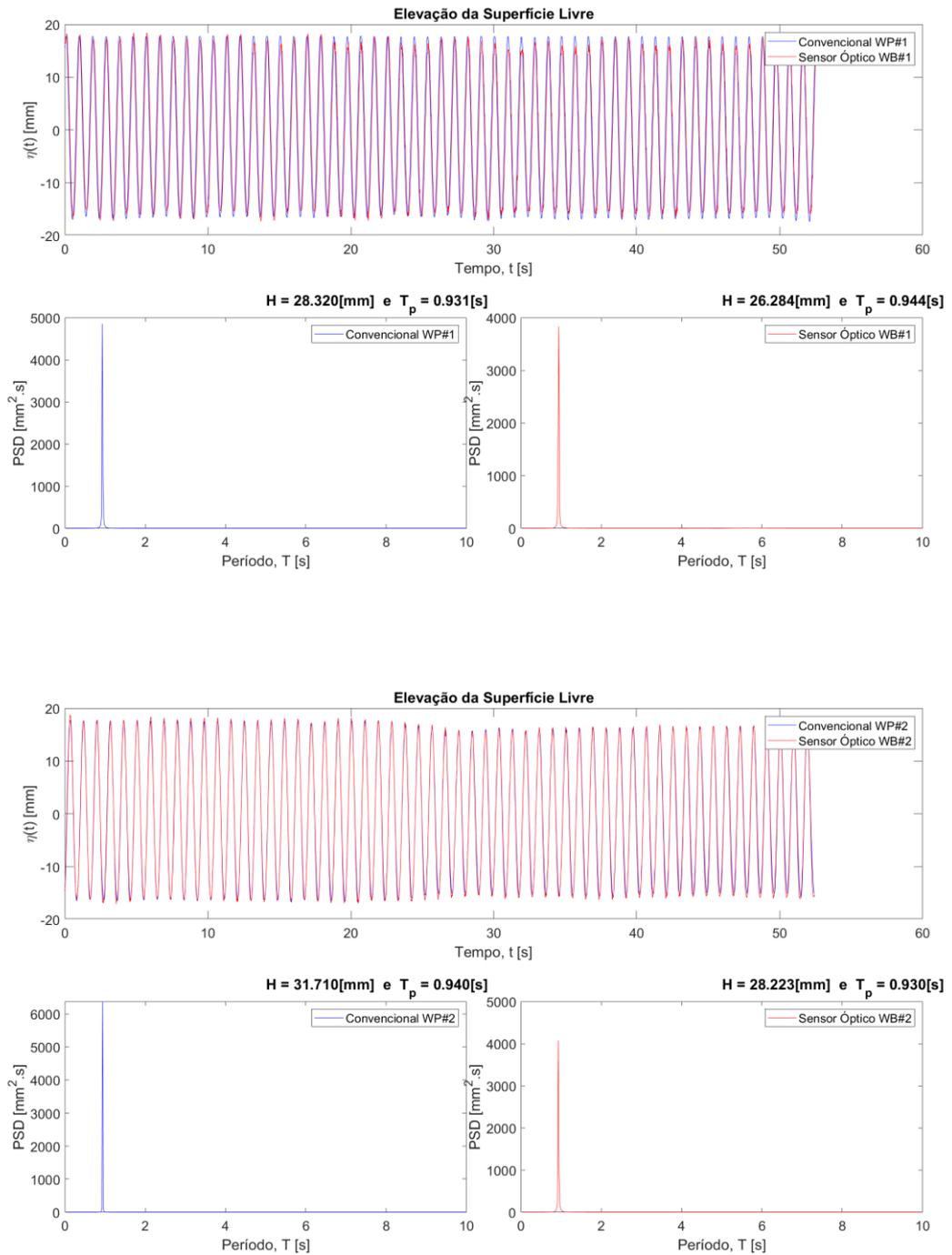
Resultados para ondas regulares do registro O4

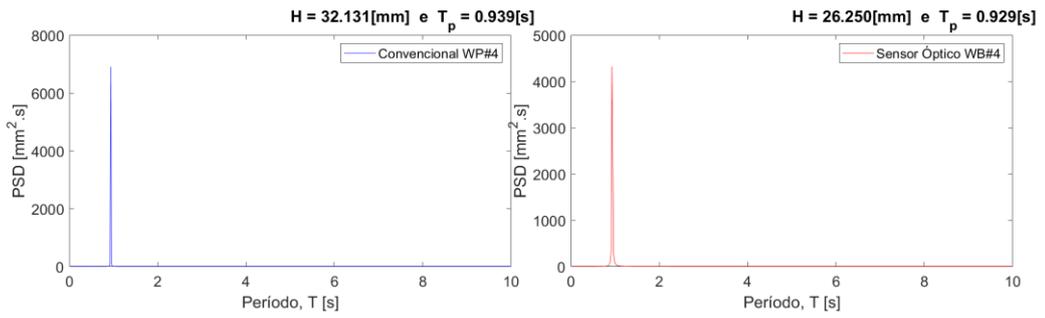
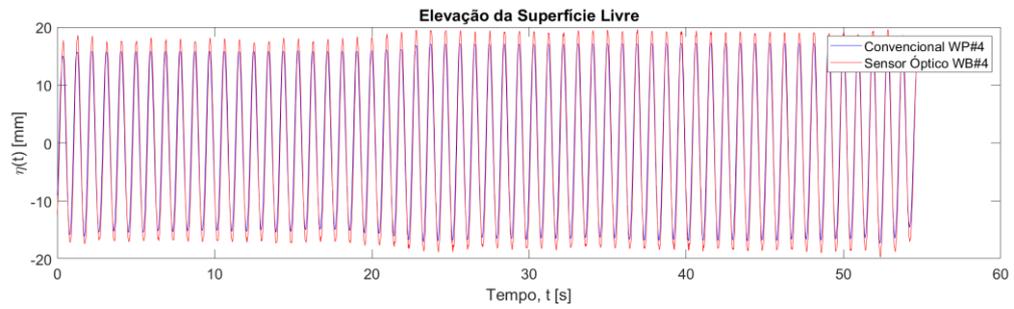
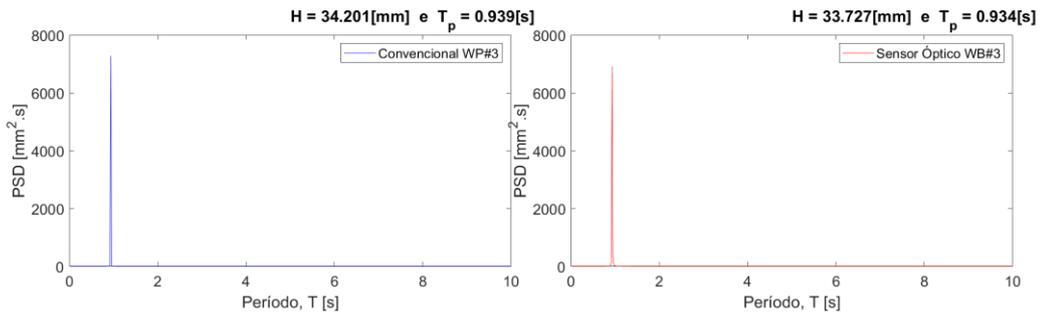
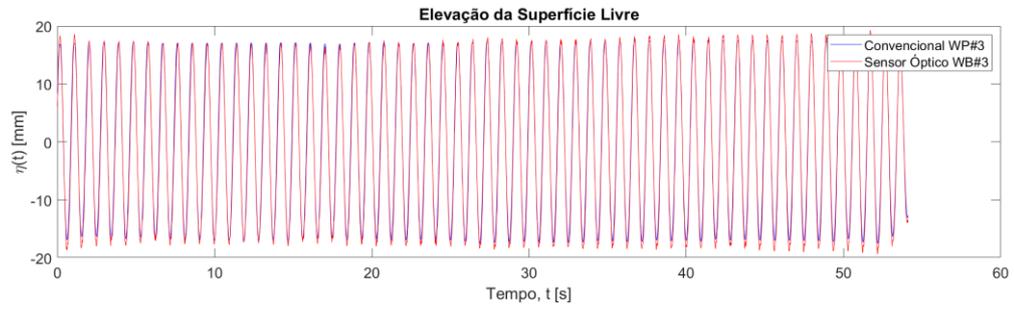


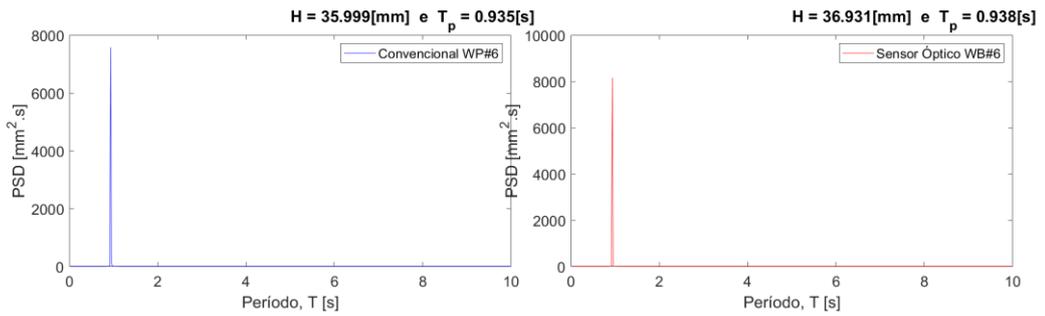
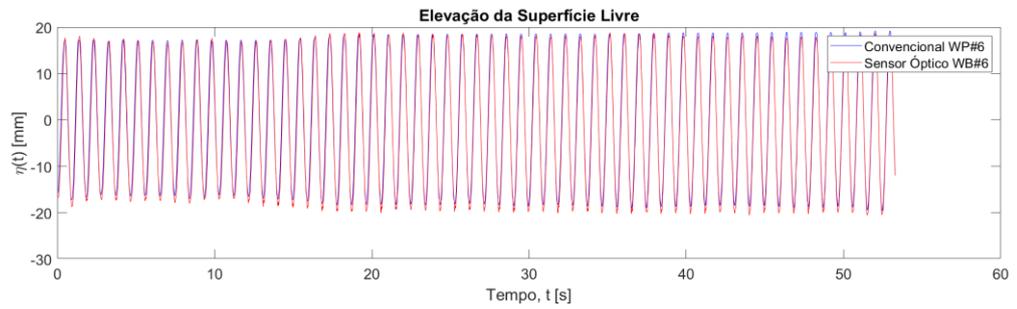
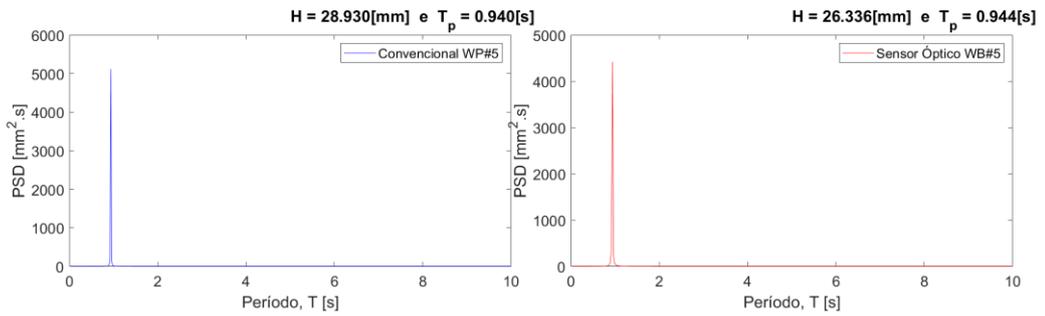
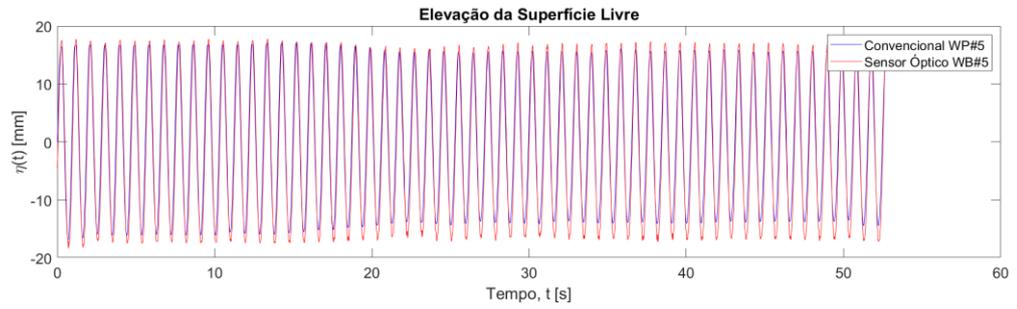




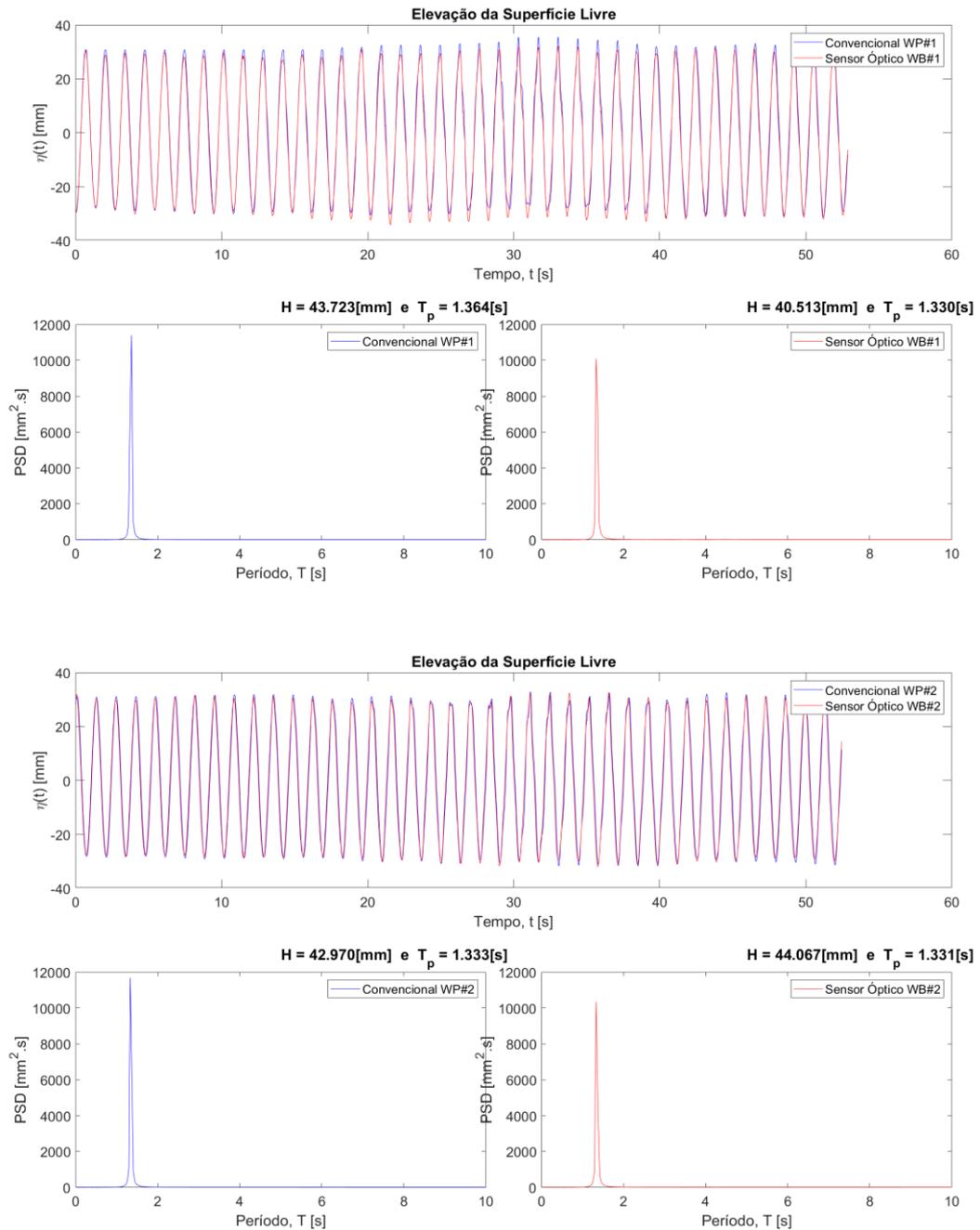
Resultados para ondas regulares do registro O5

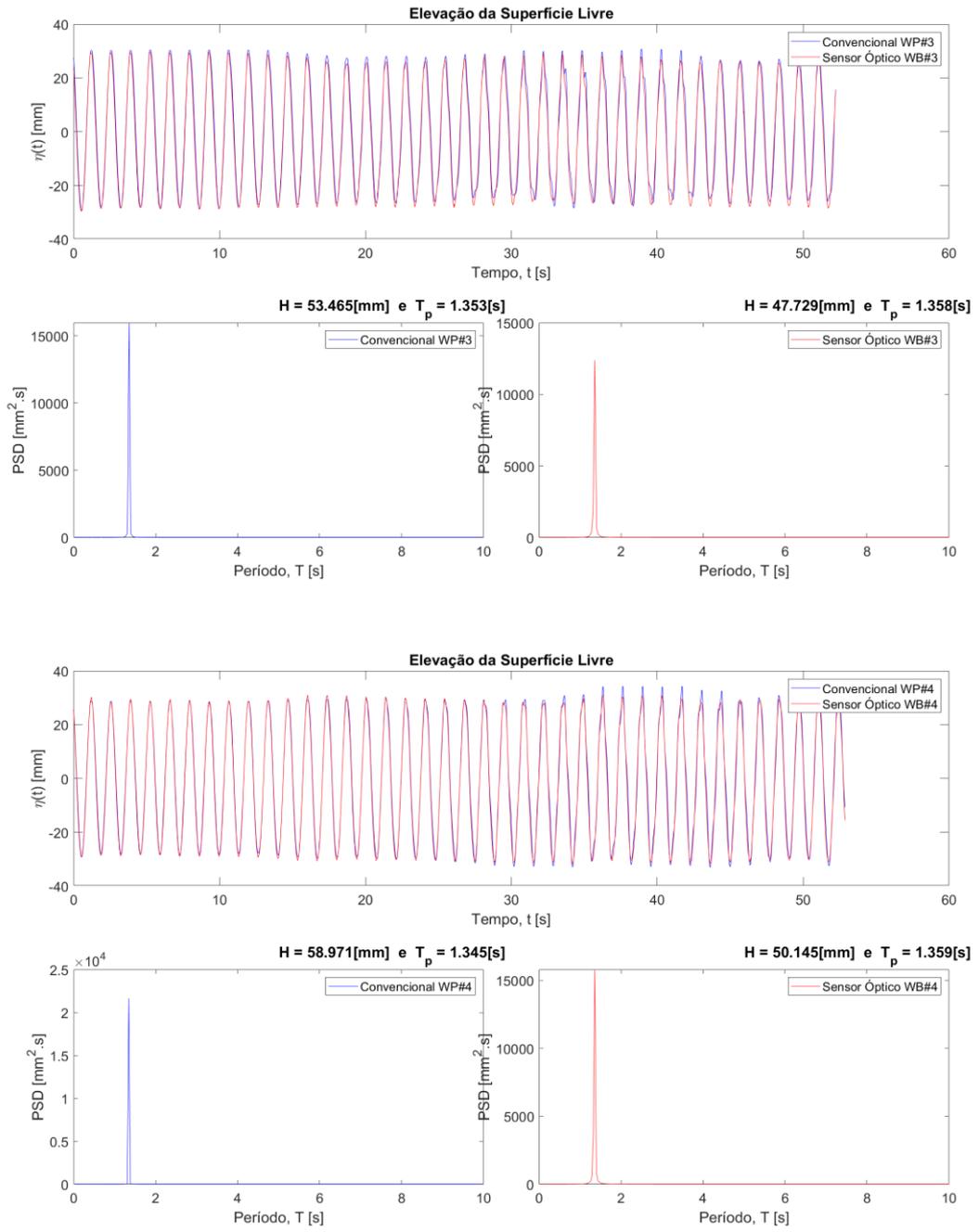


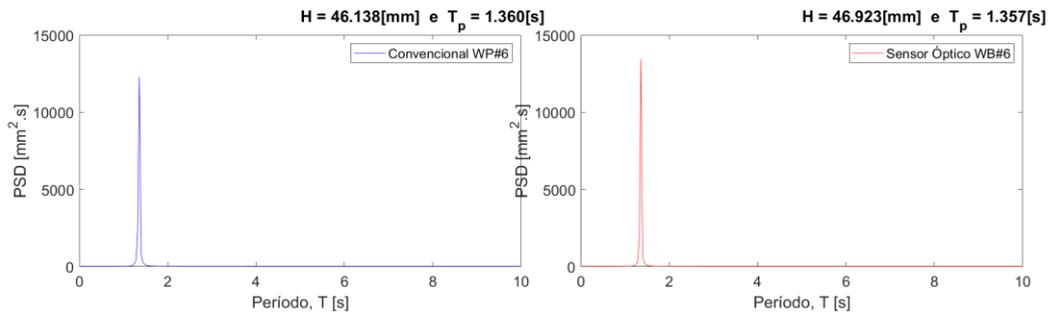
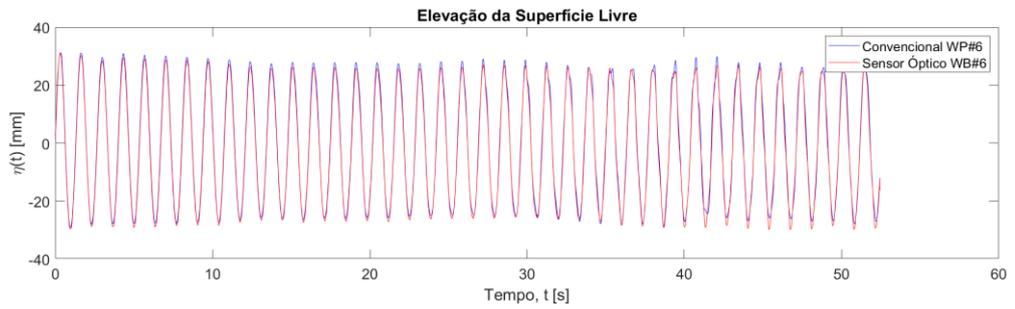
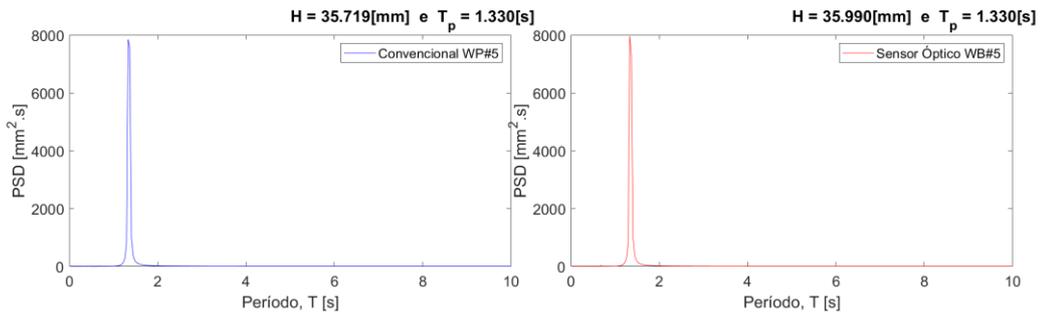
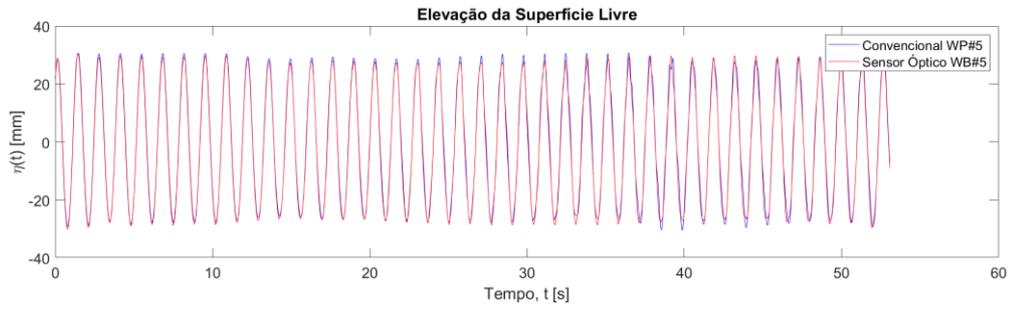




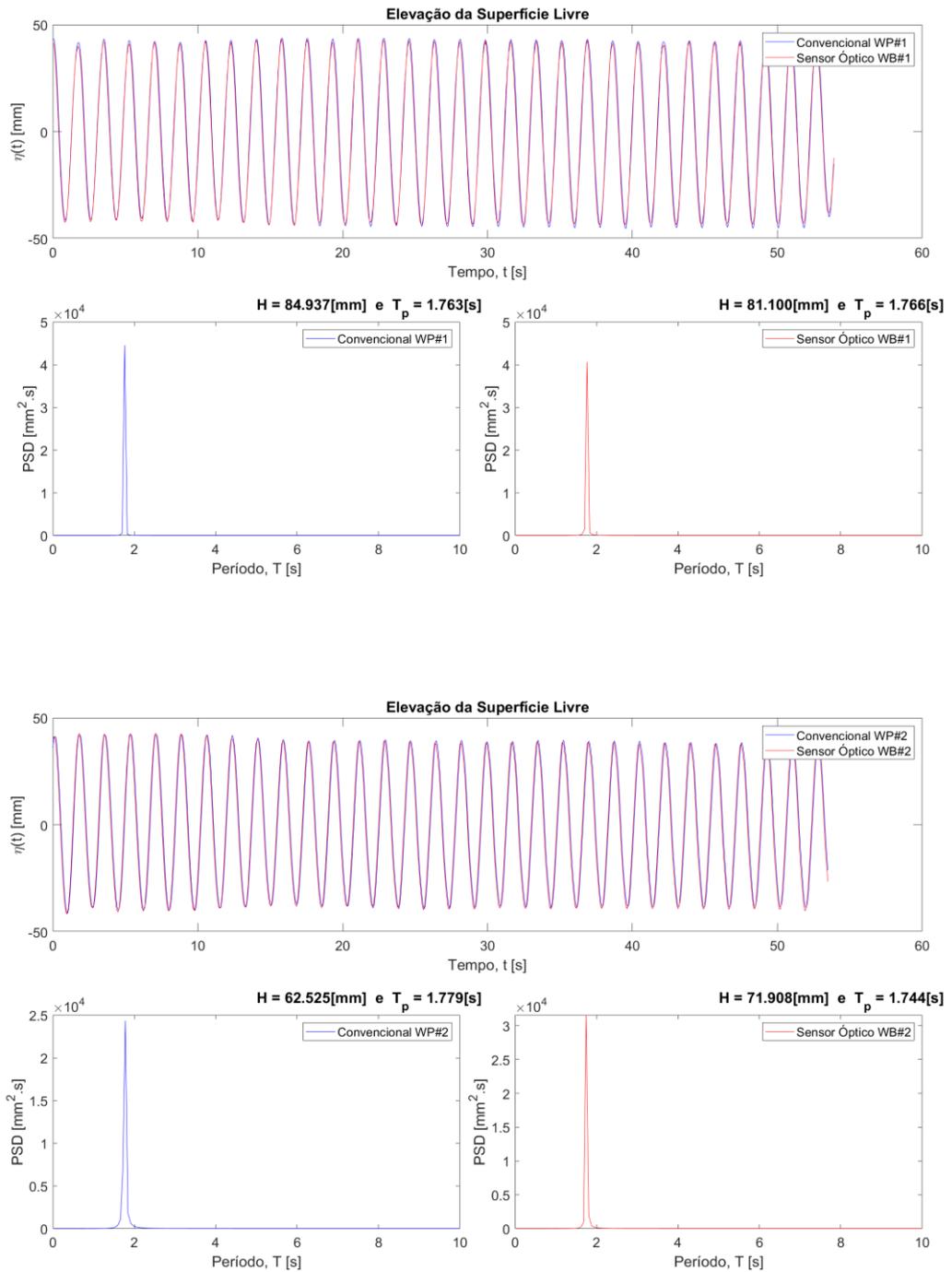
Resultados para ondas regulares do registro O6

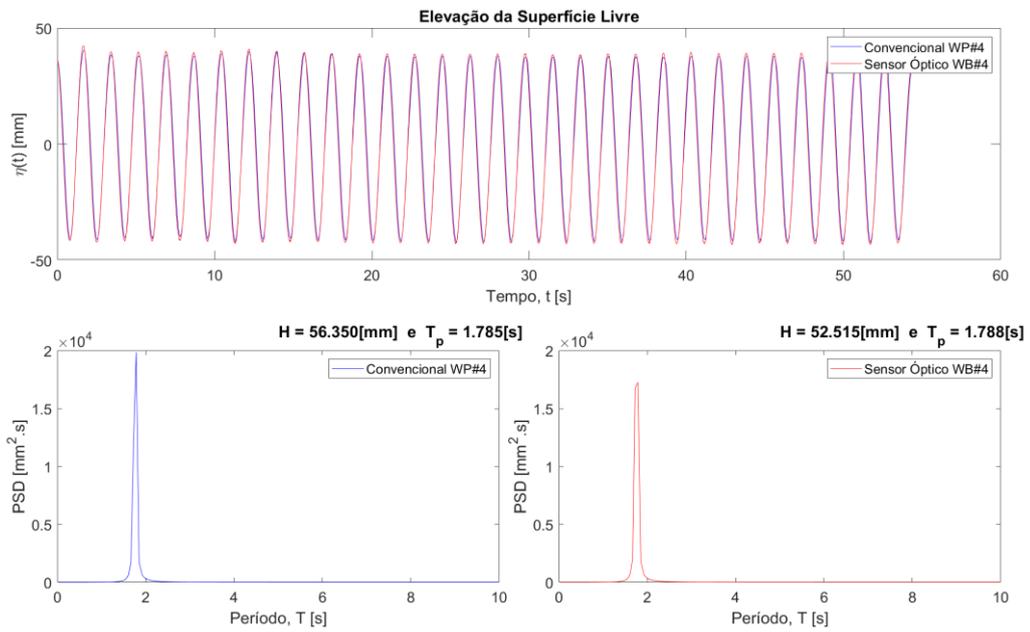
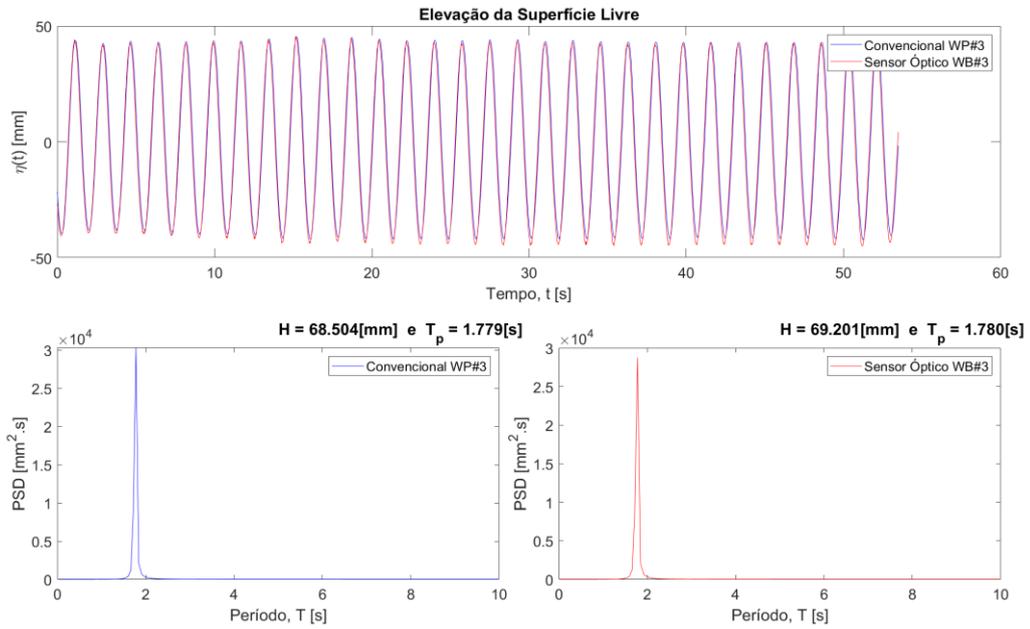


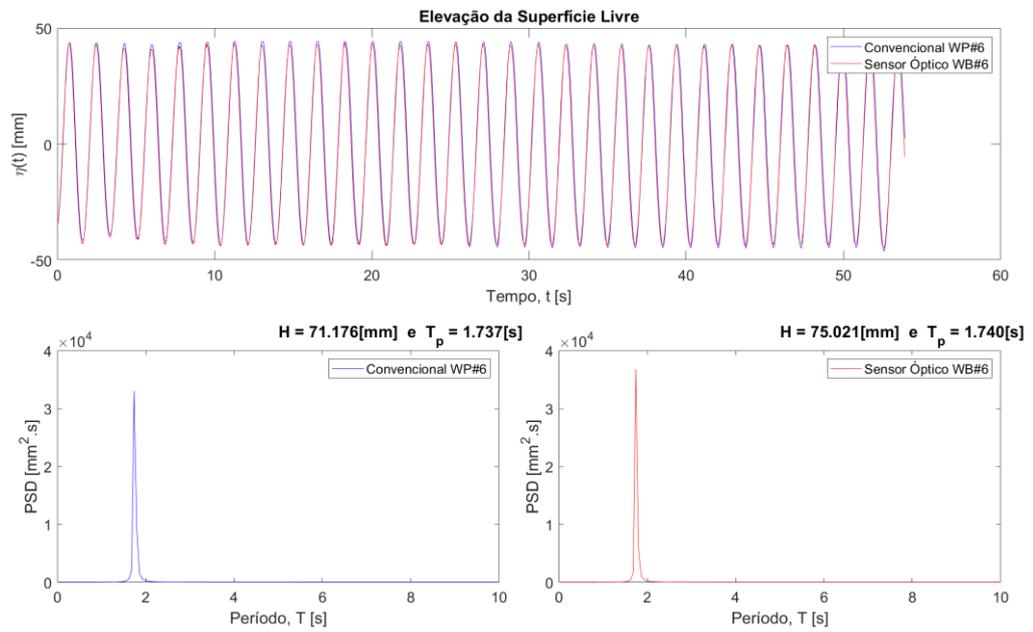
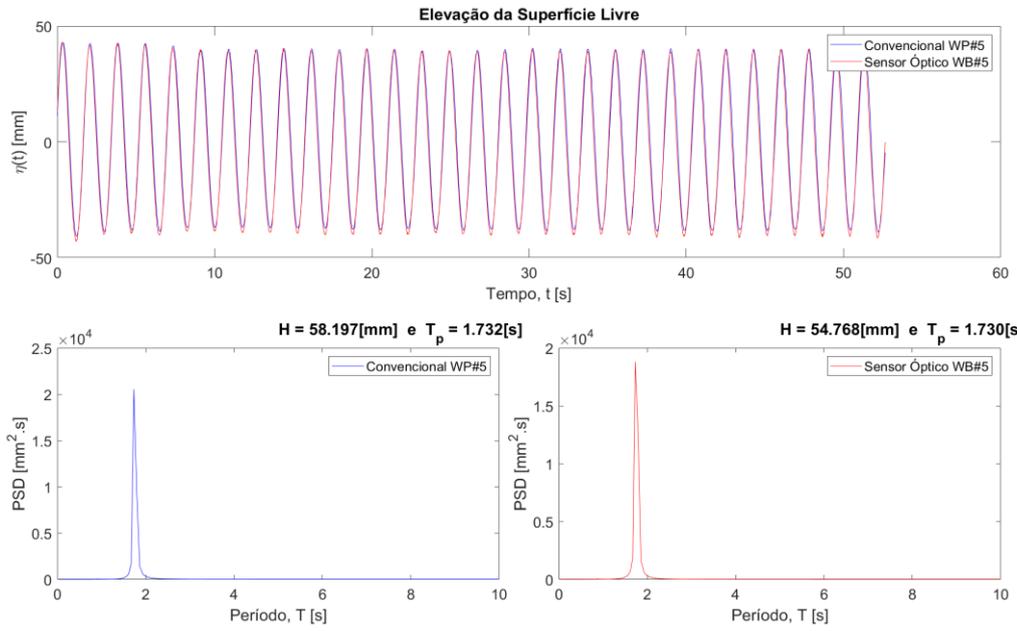




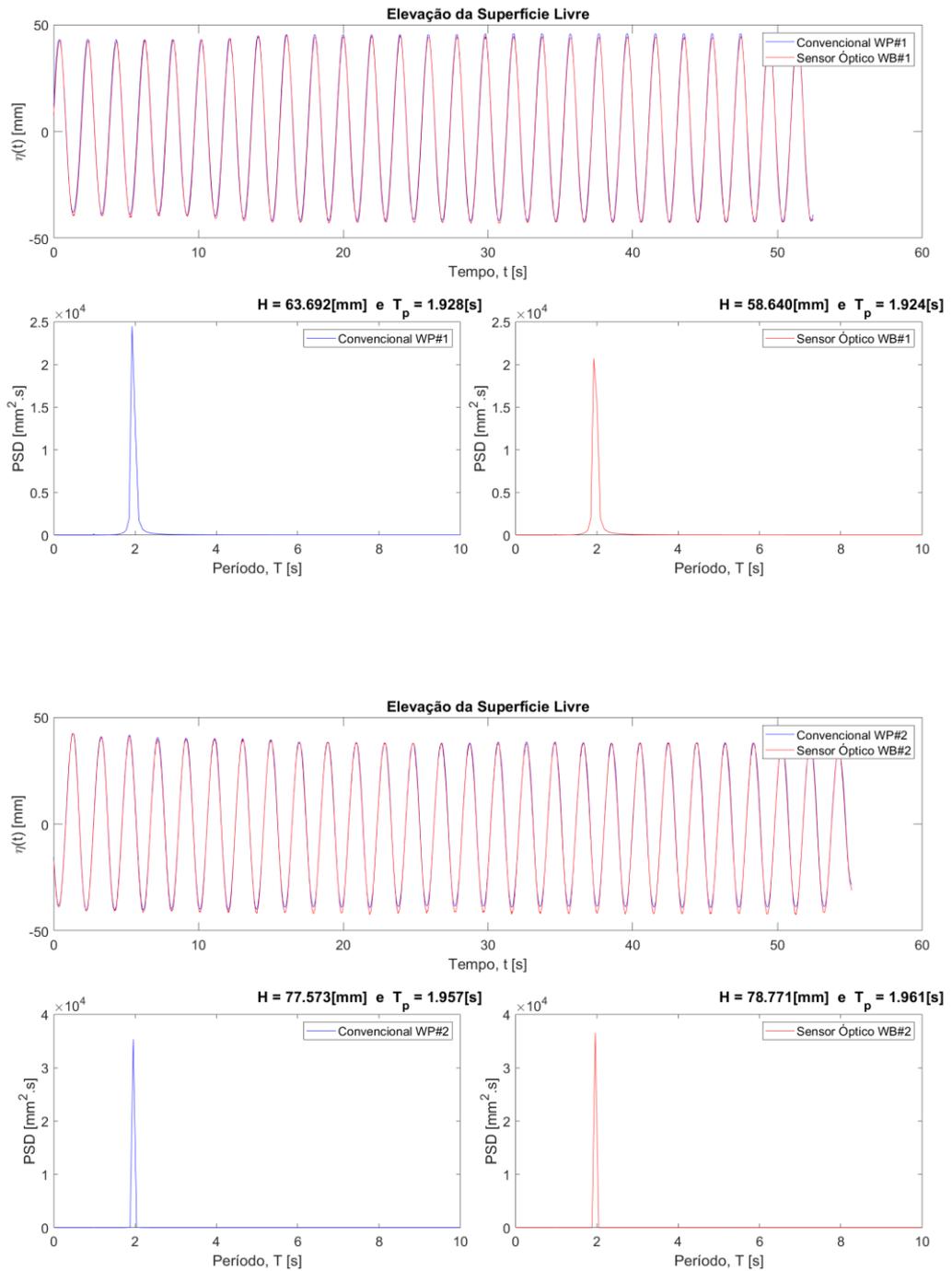
Resultados para ondas regulares do registro O7

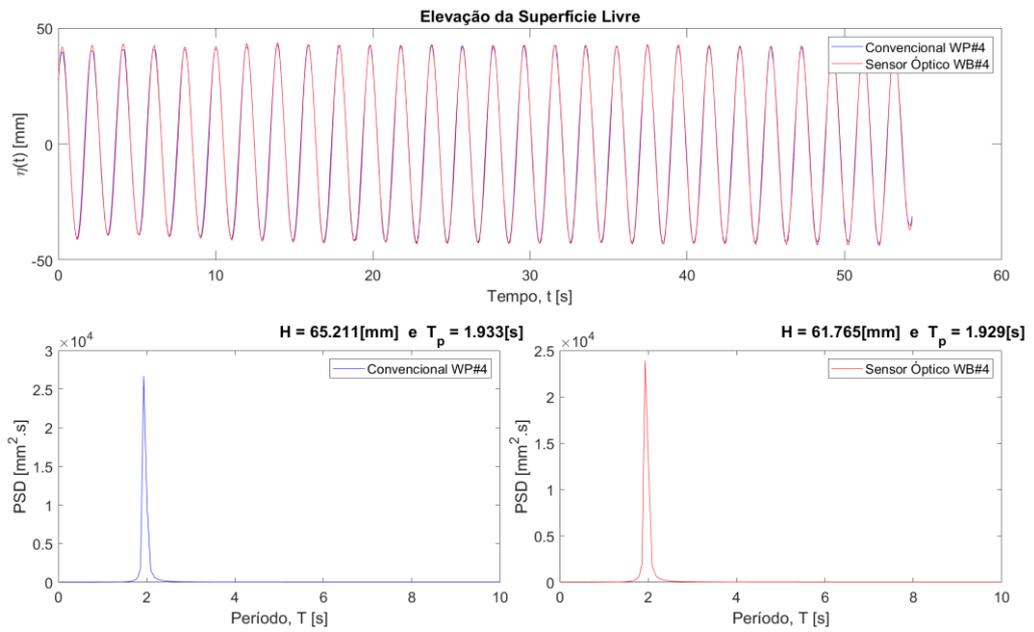
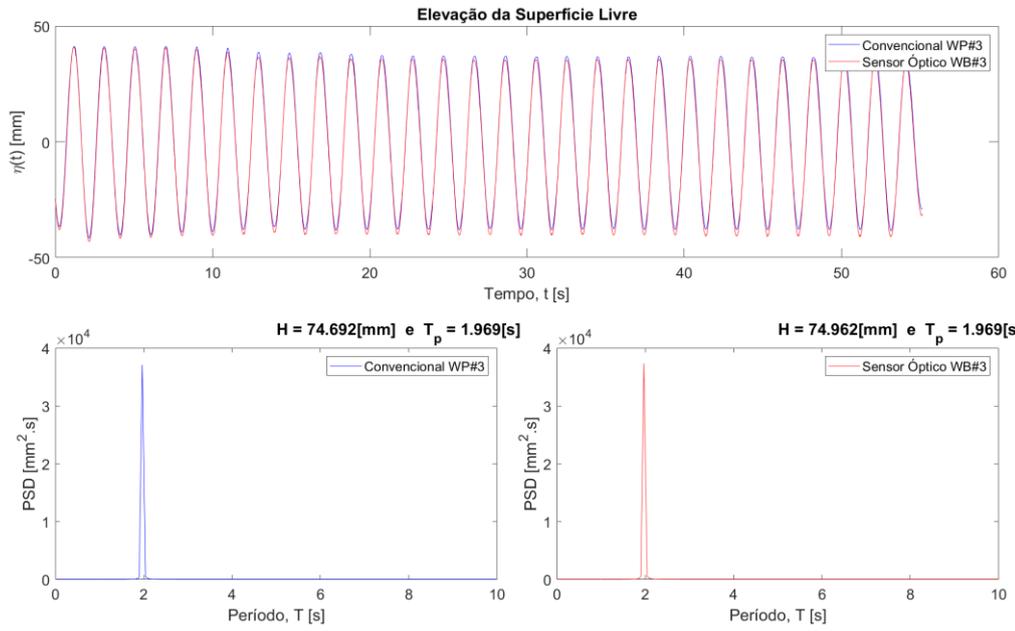


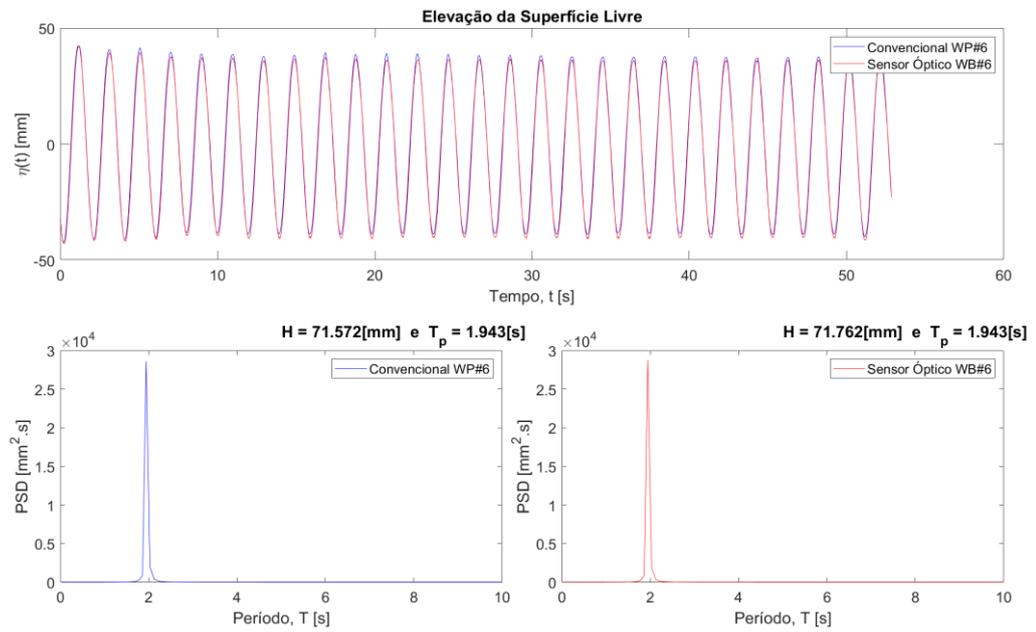
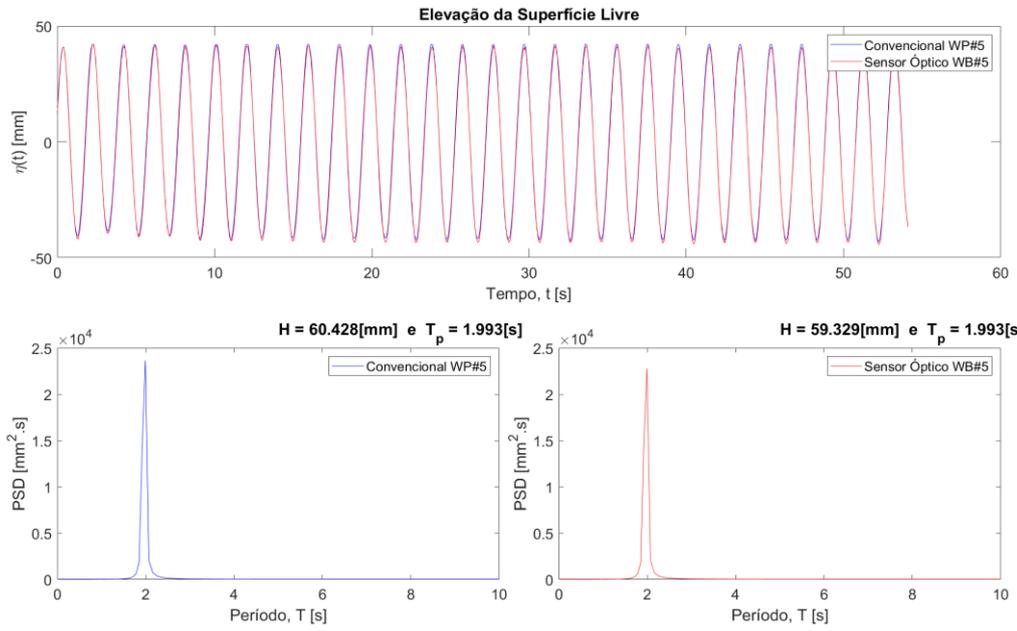




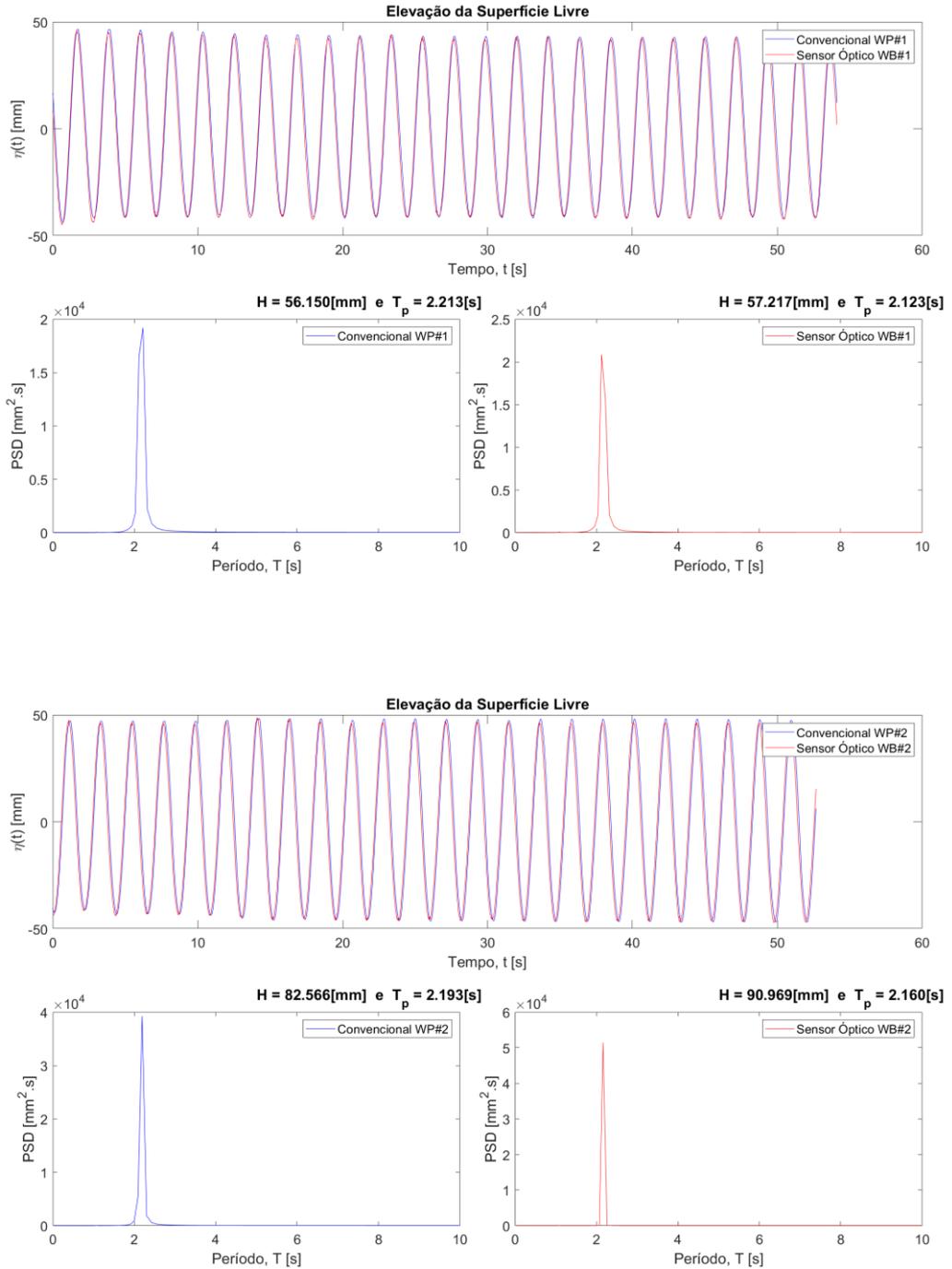
Resultados para ondas regulares do registro O8

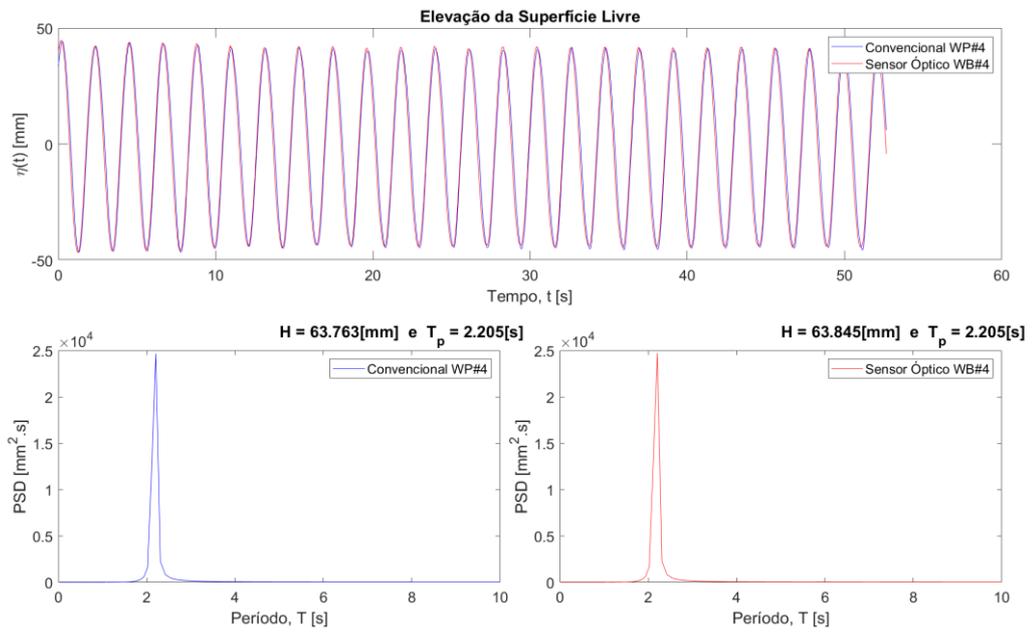
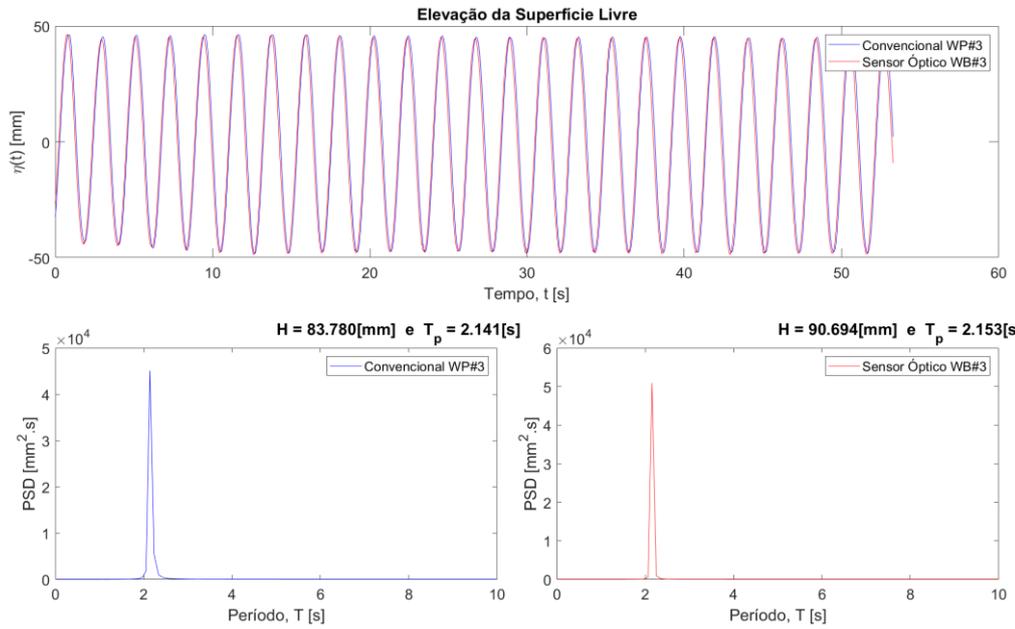


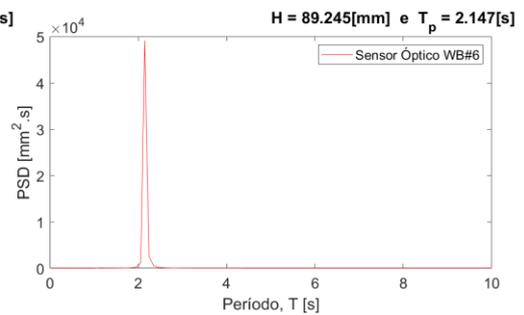
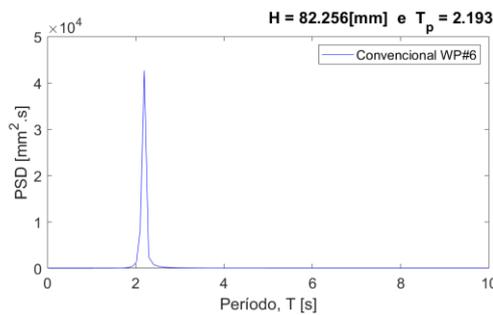
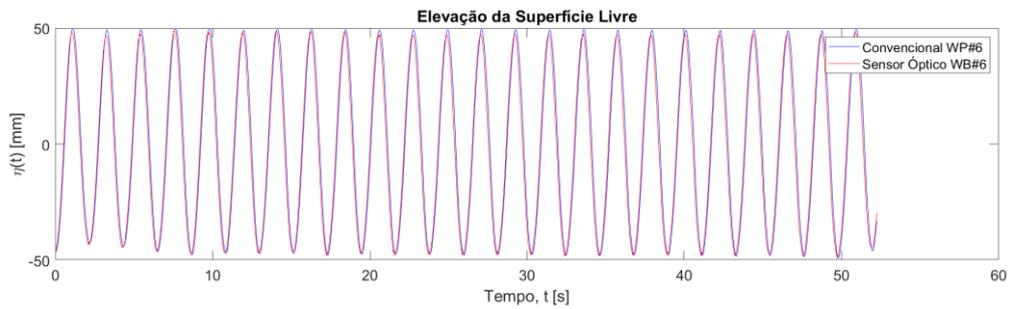
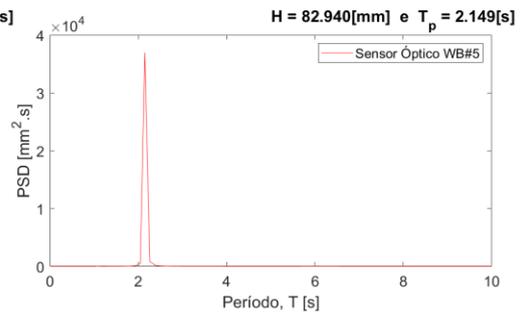
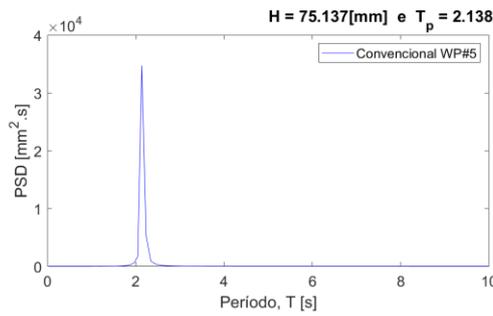
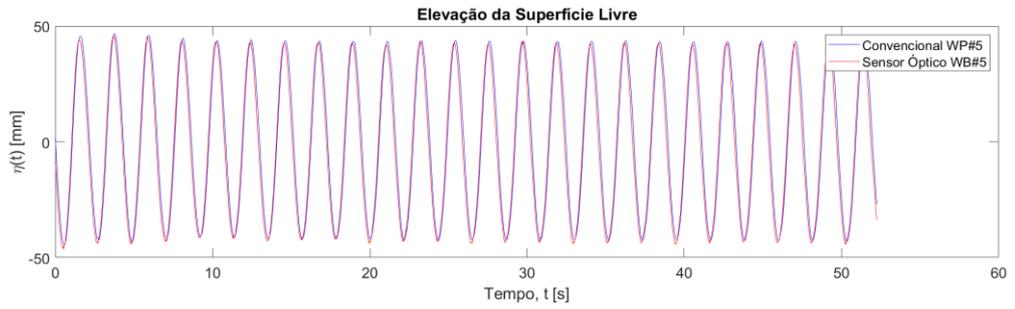




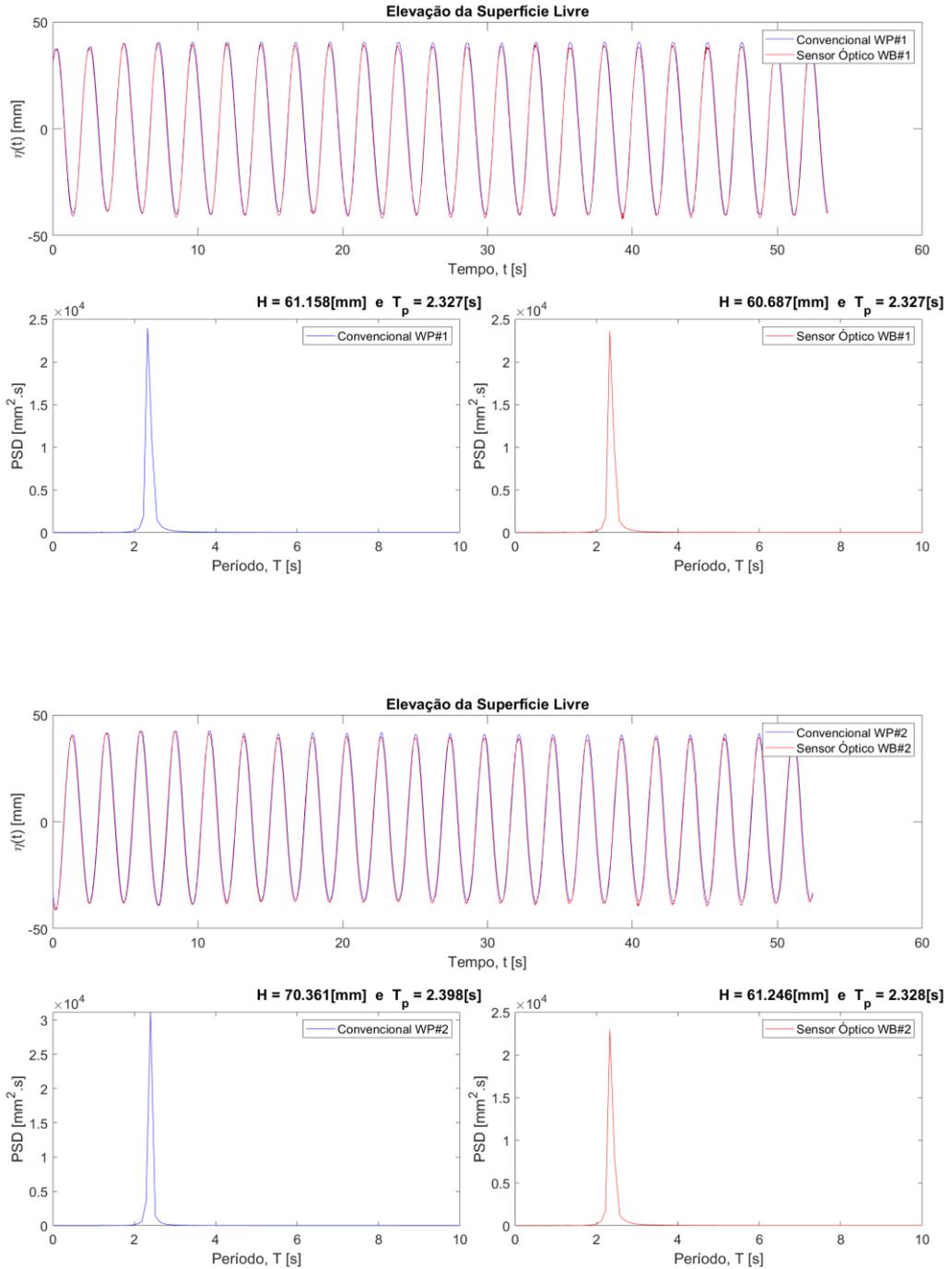
Resultados para ondas regulares do registro O9

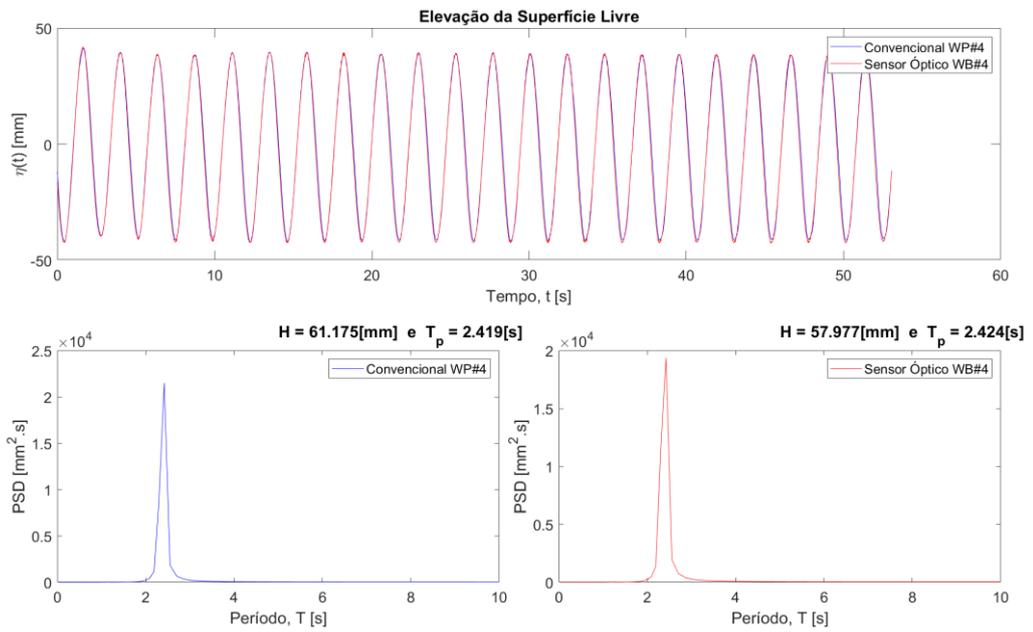
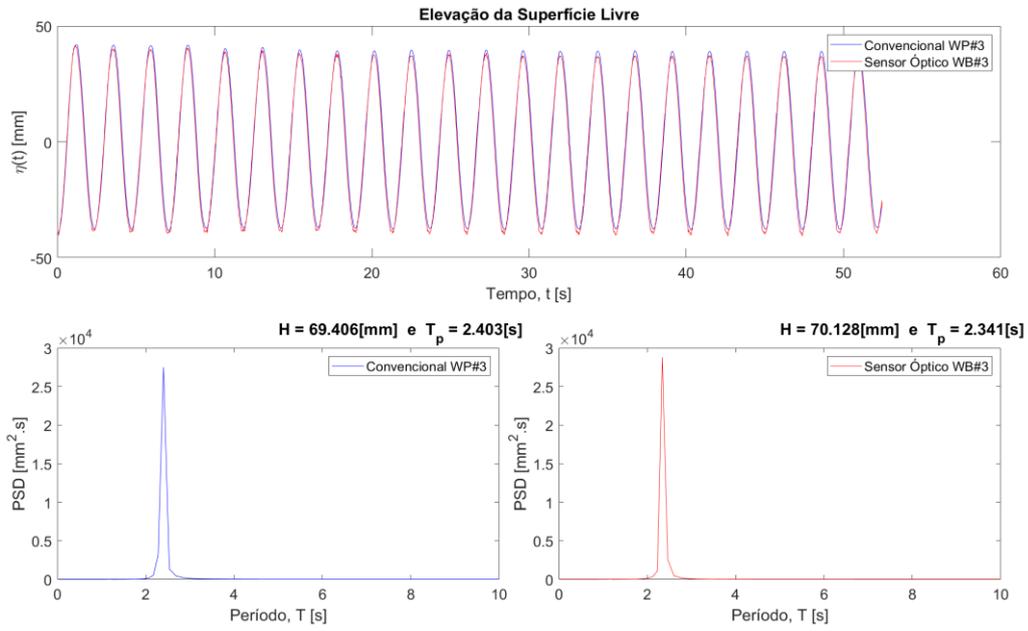


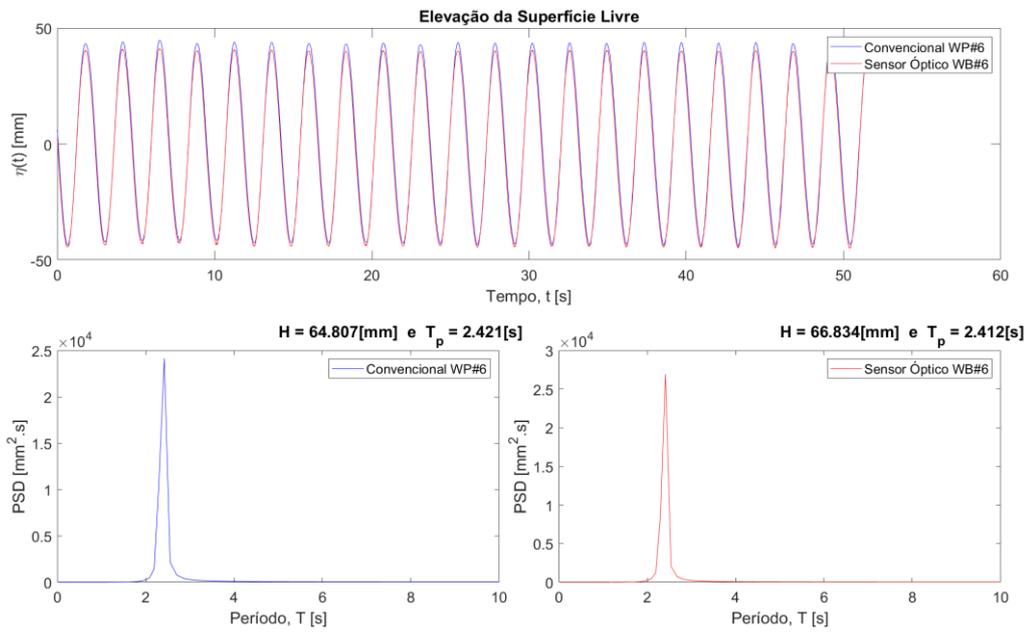
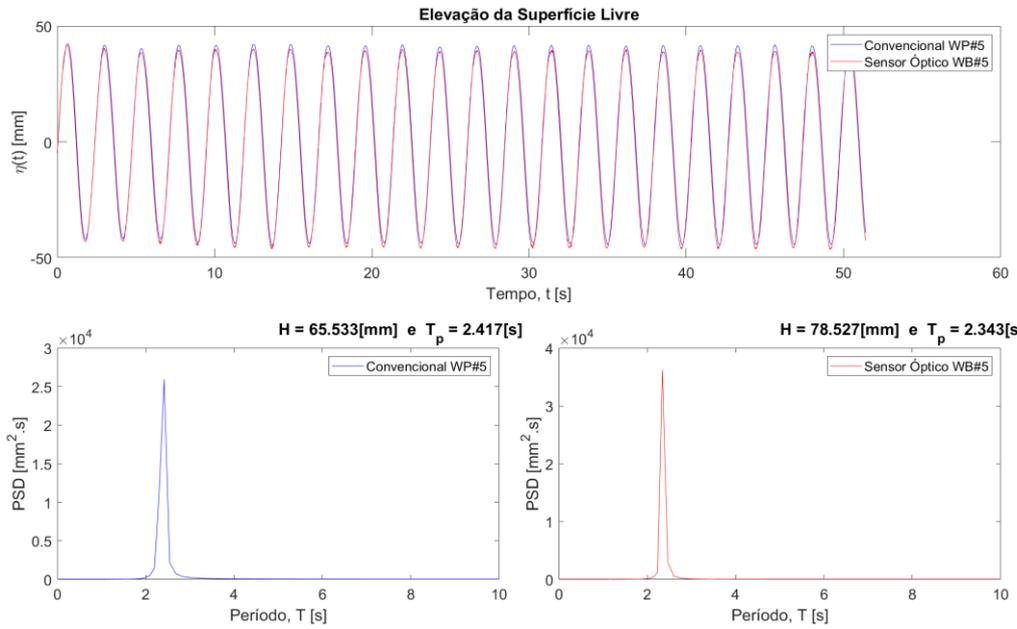




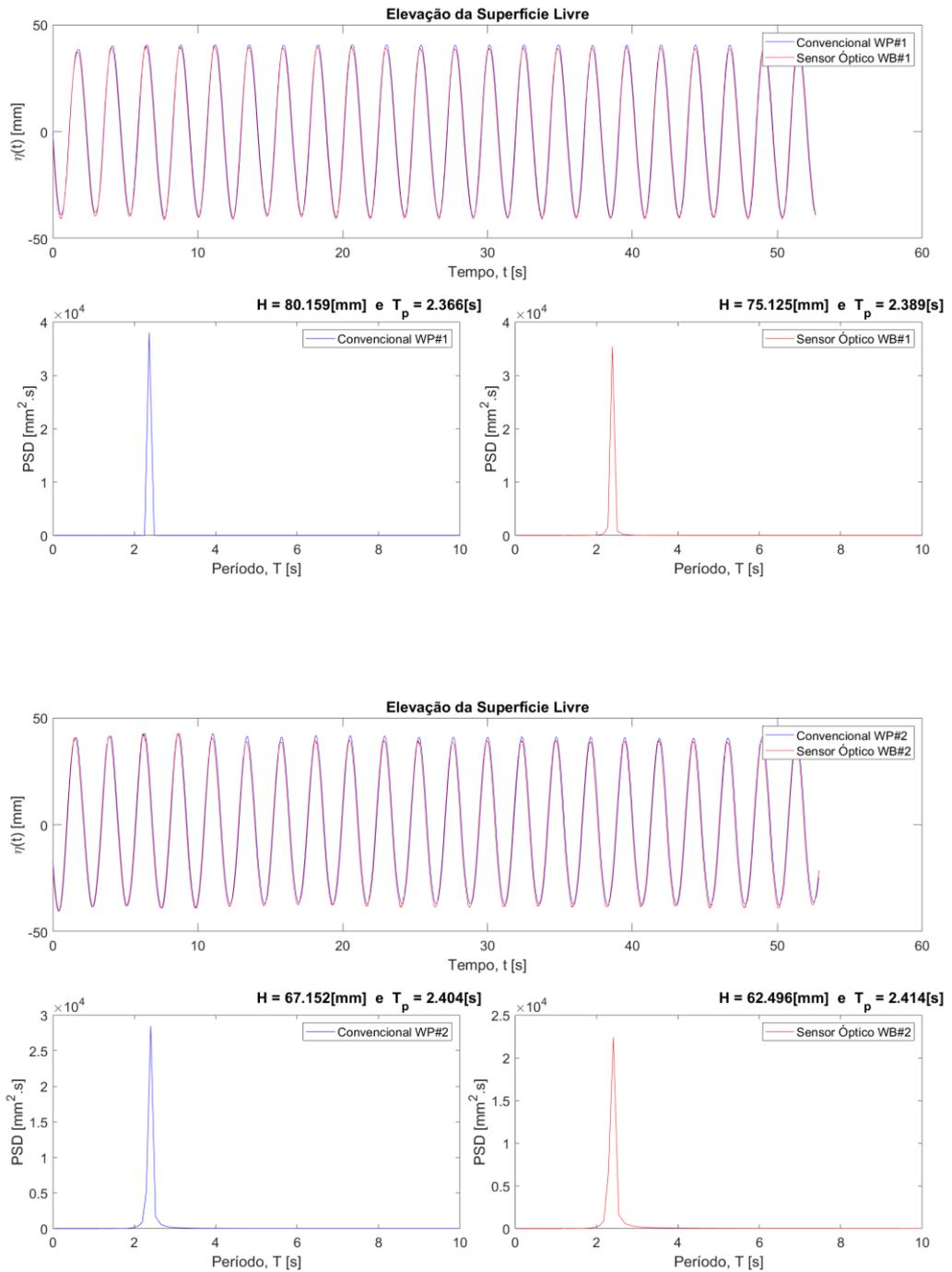
Resultados para ondas regulares do registro O10

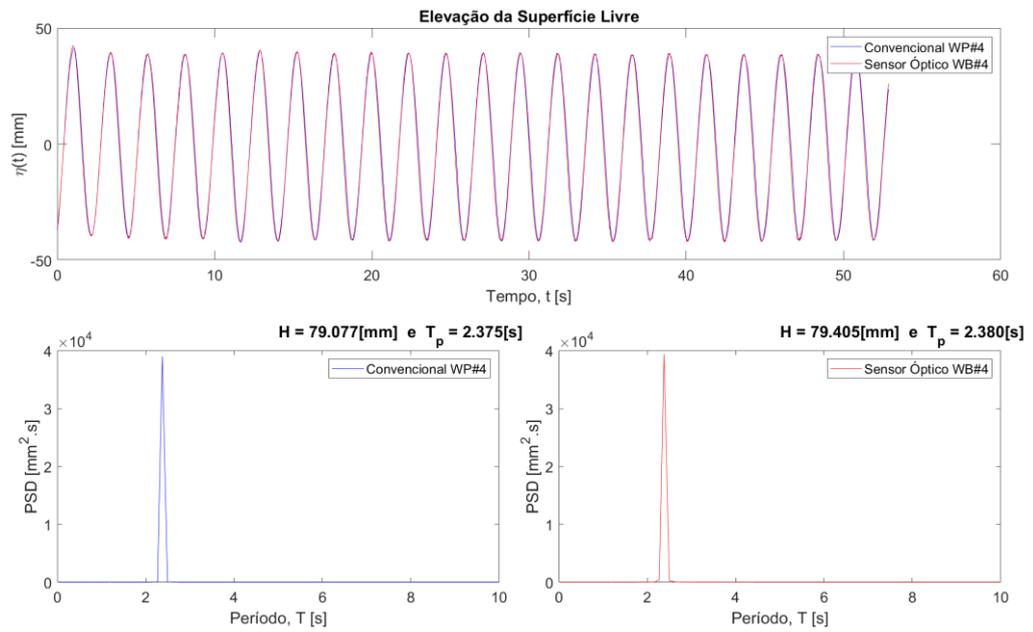
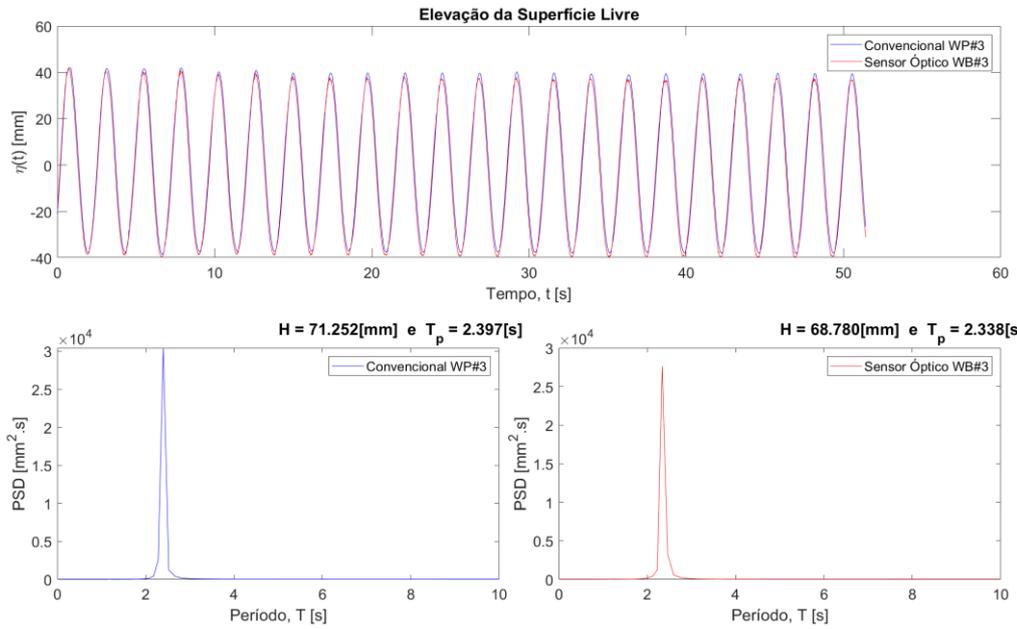


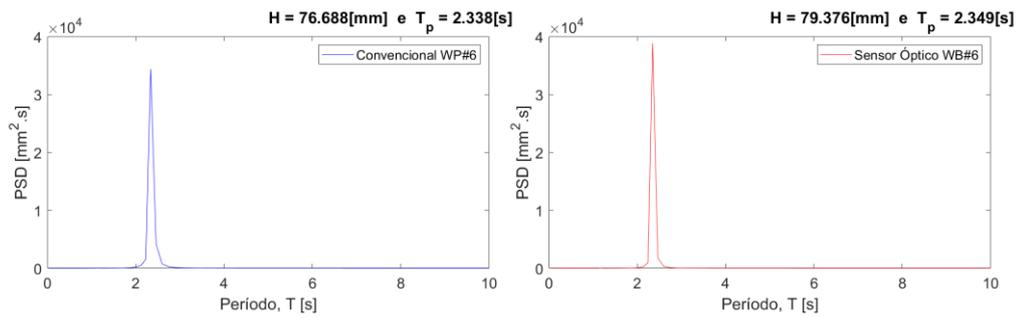
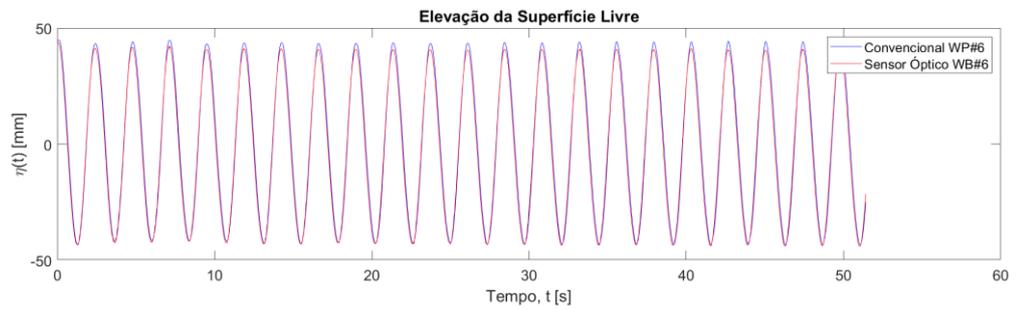
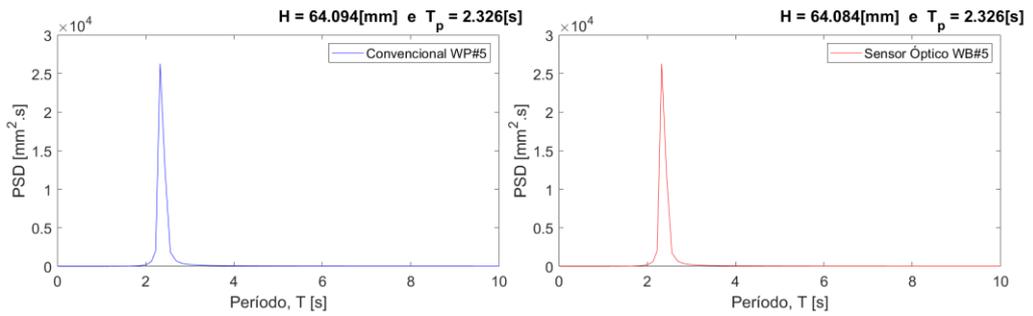
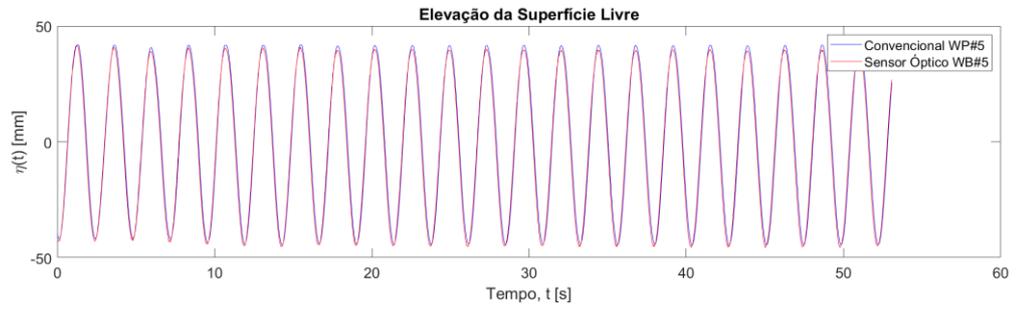




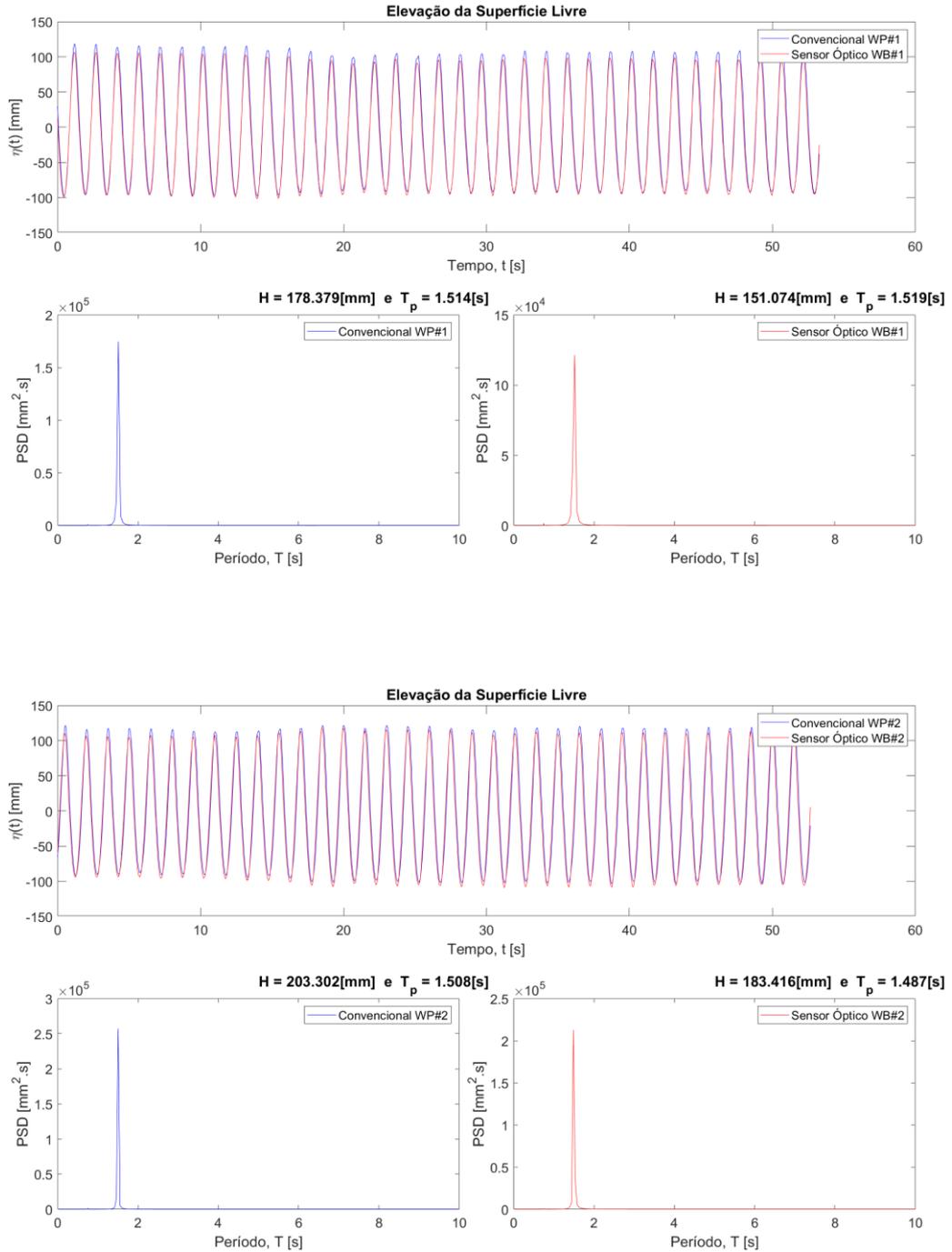
Resultados para ondas regulares do registro O11

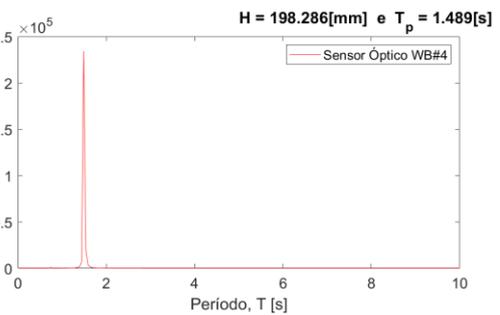
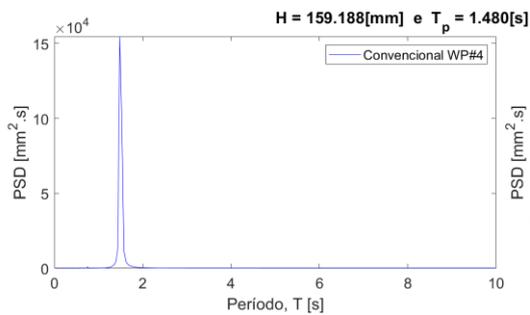
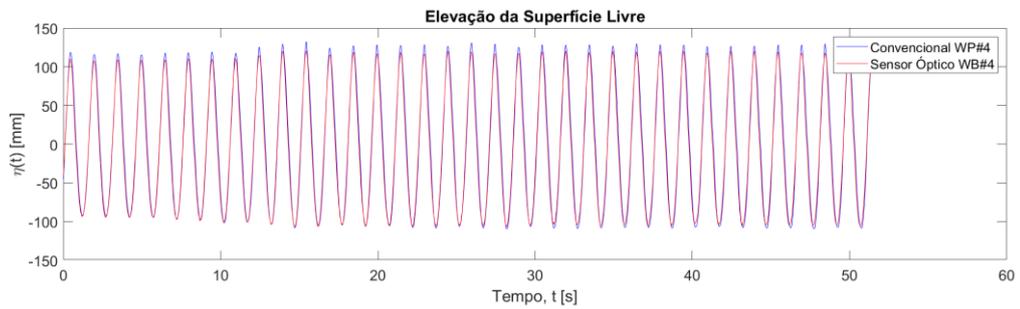
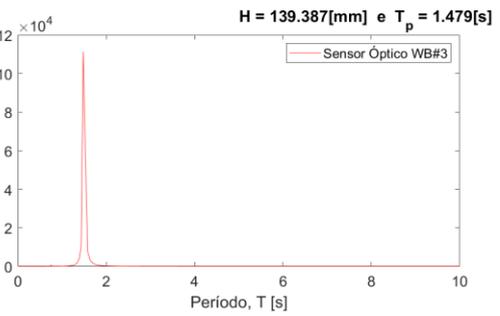
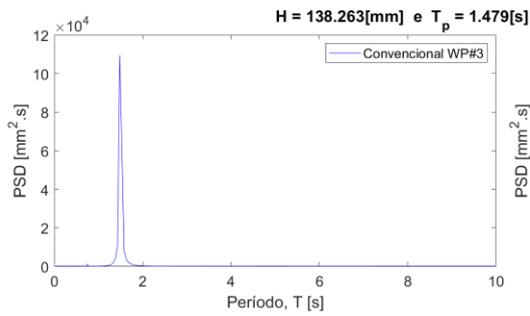
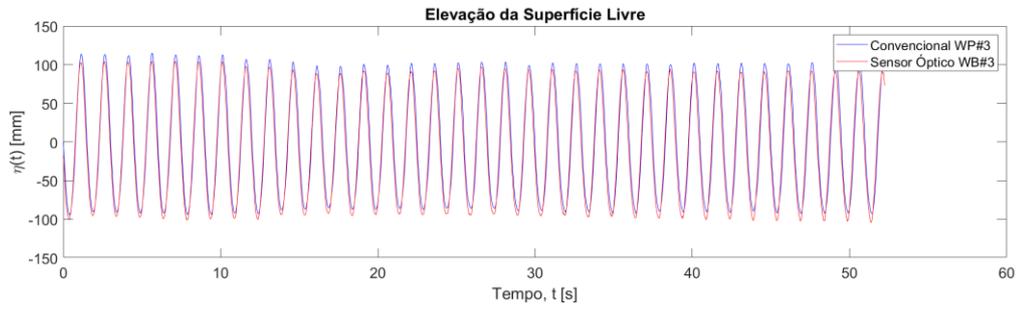


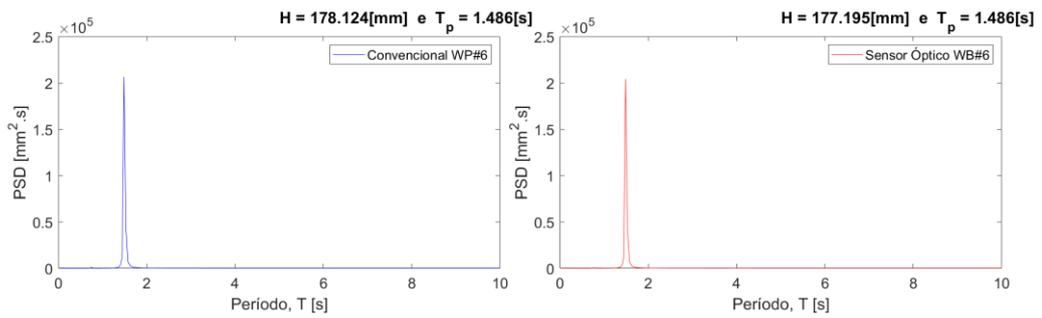
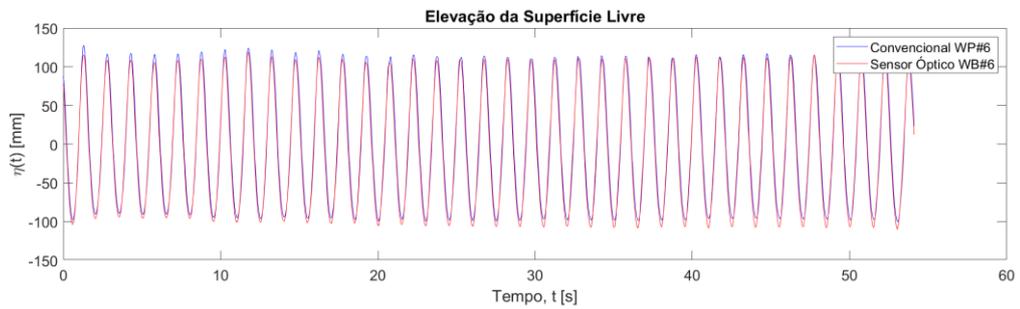
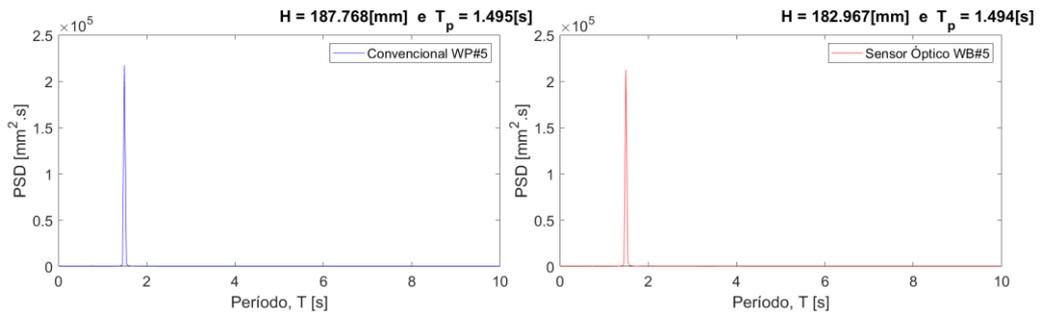
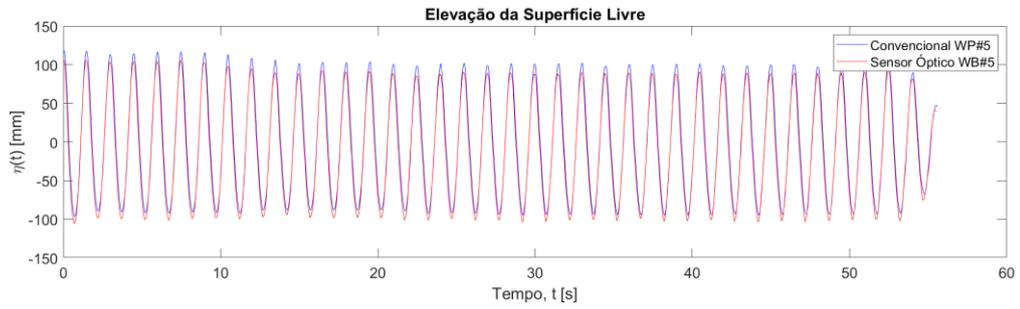




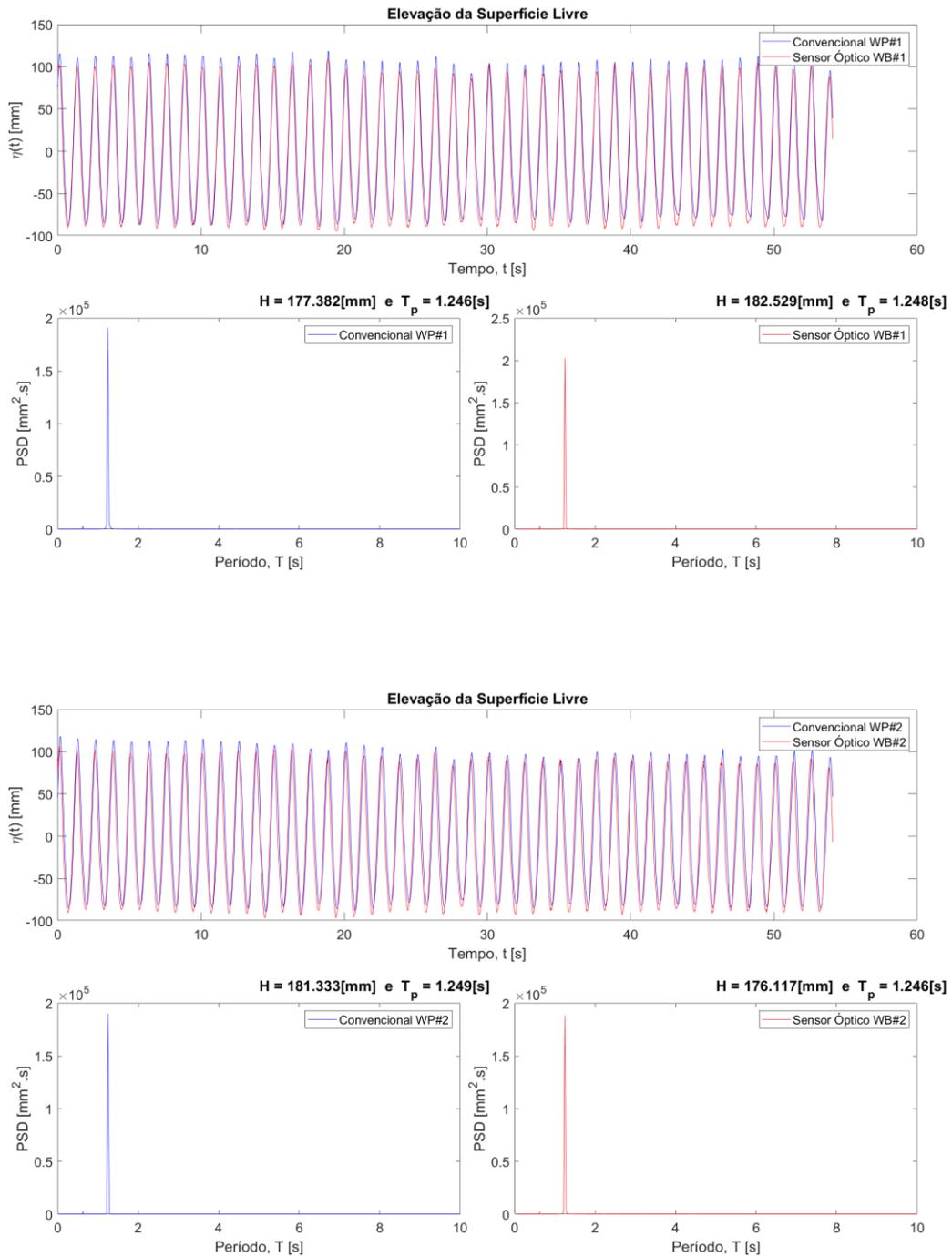
Resultados para ondas regulares do registro O12

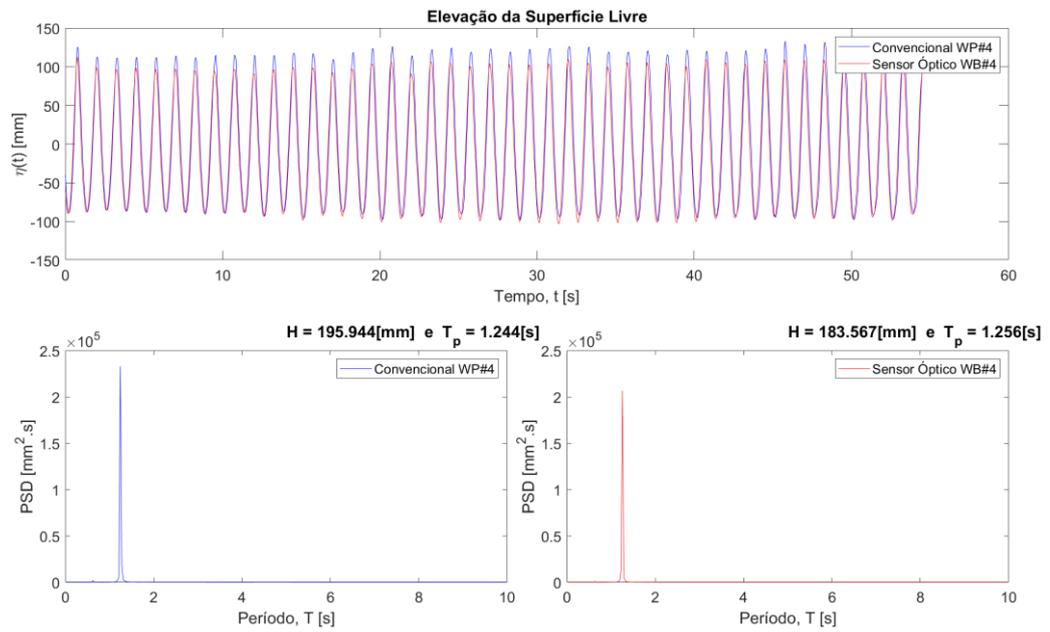
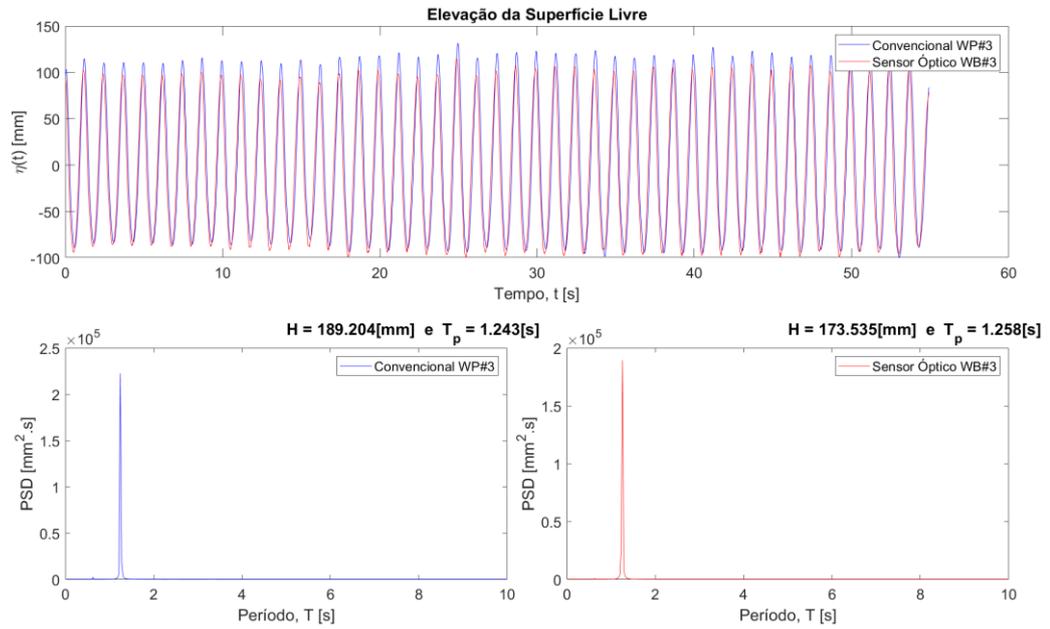


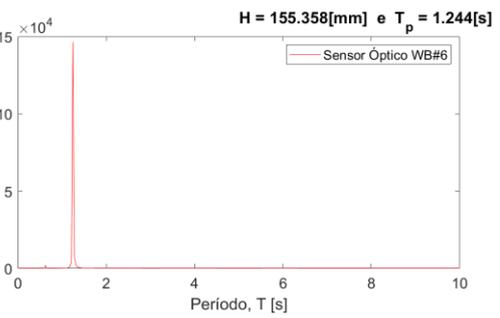
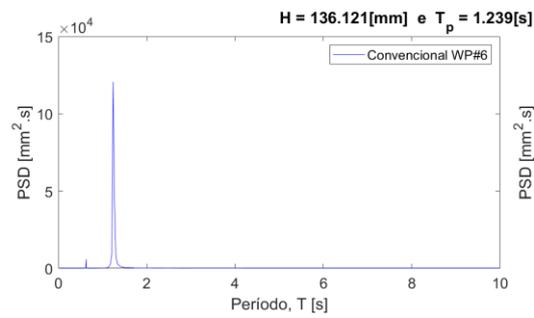
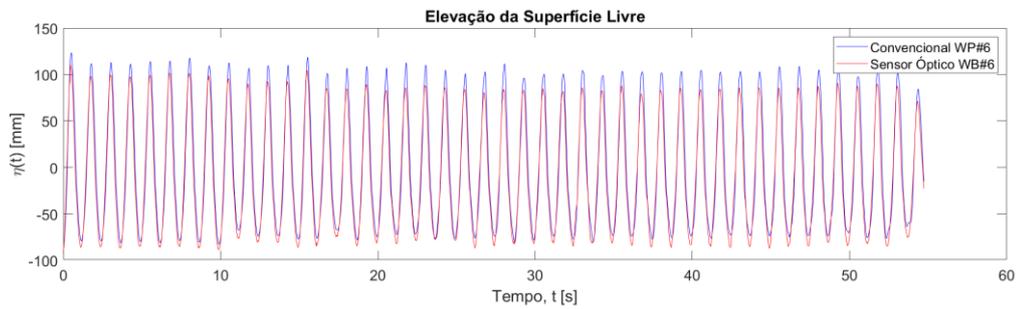
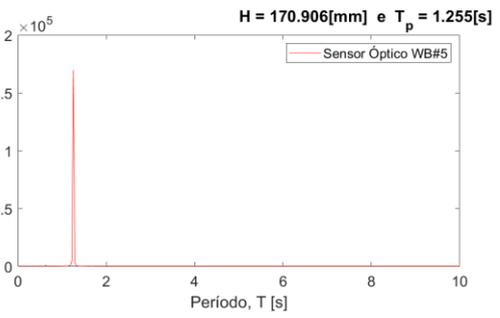
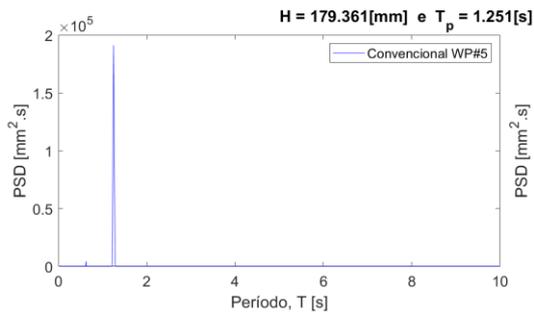
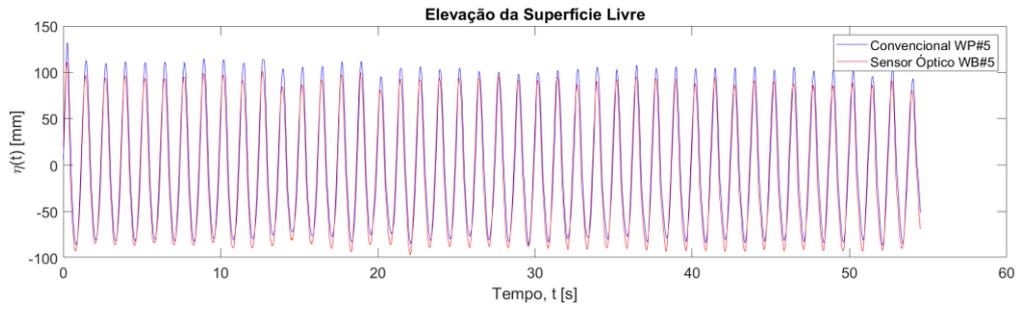




Resultados para ondas regulares do registro O13

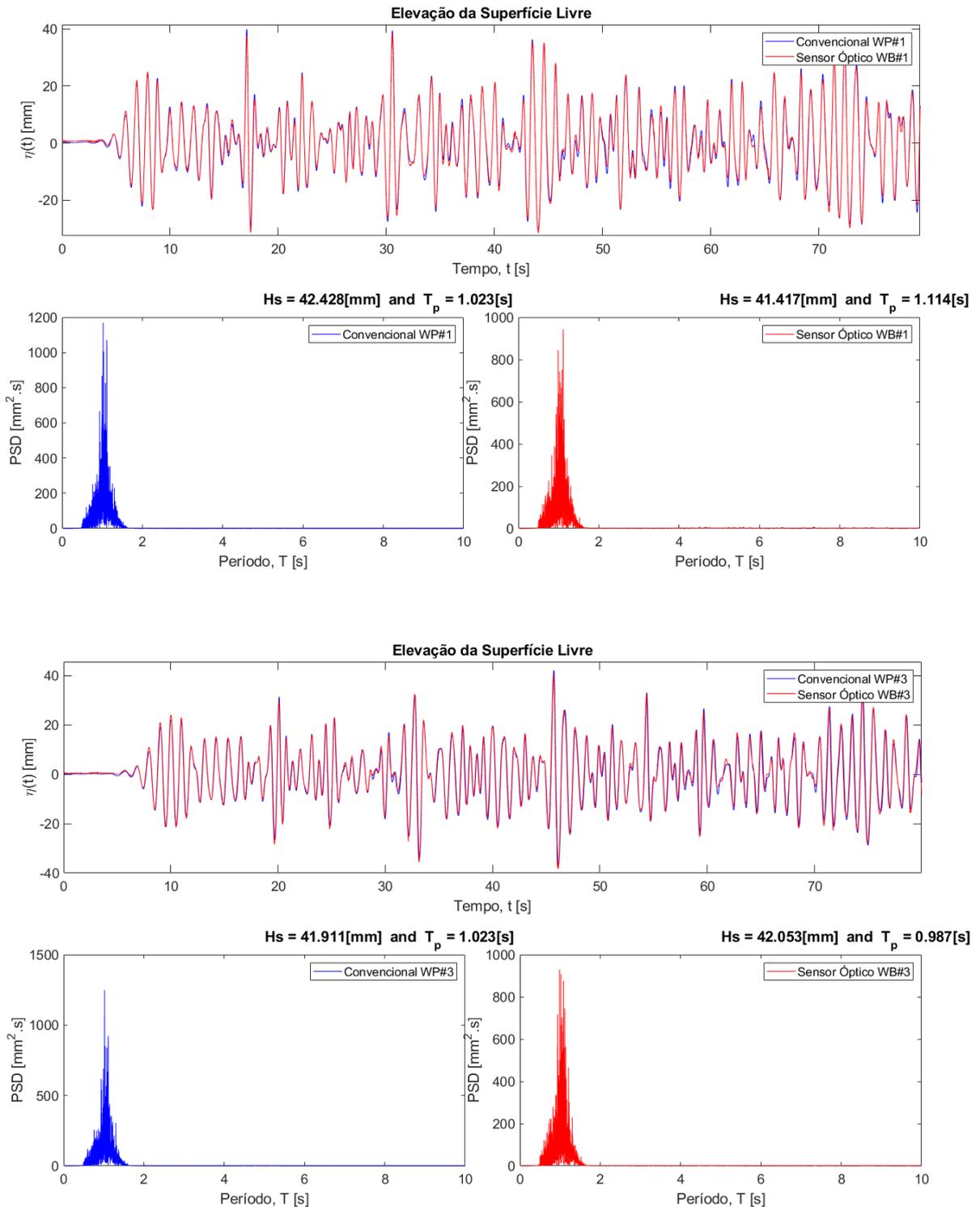


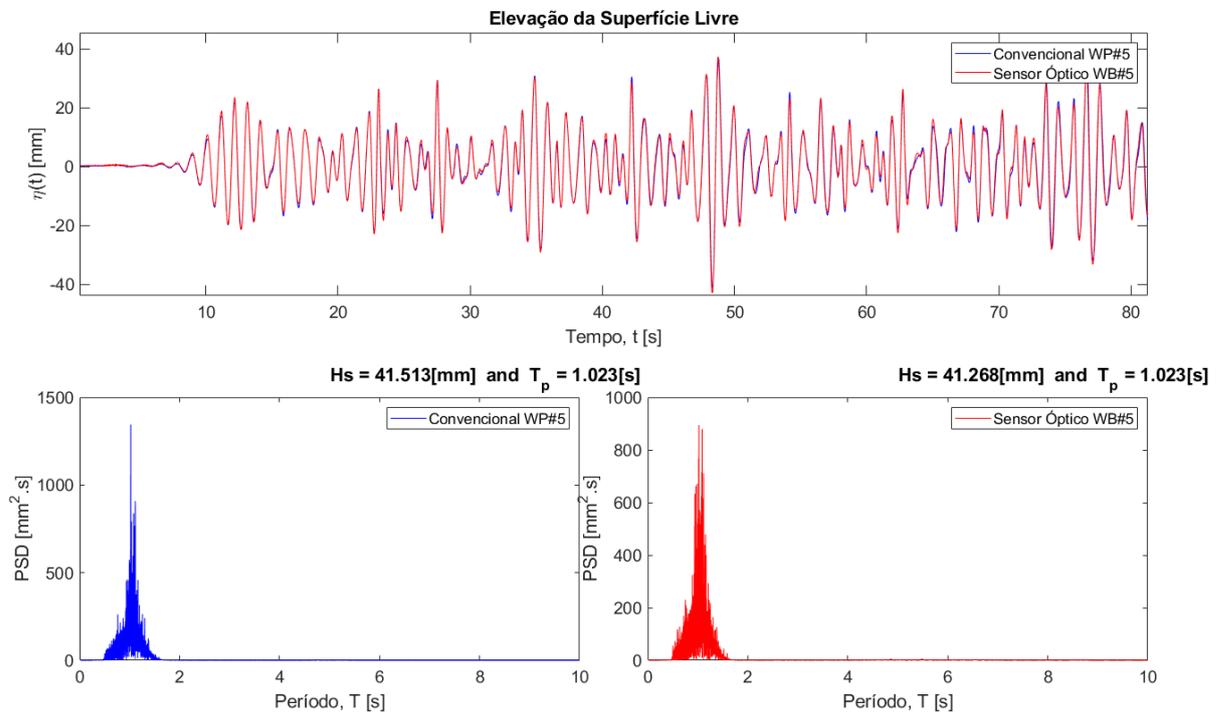
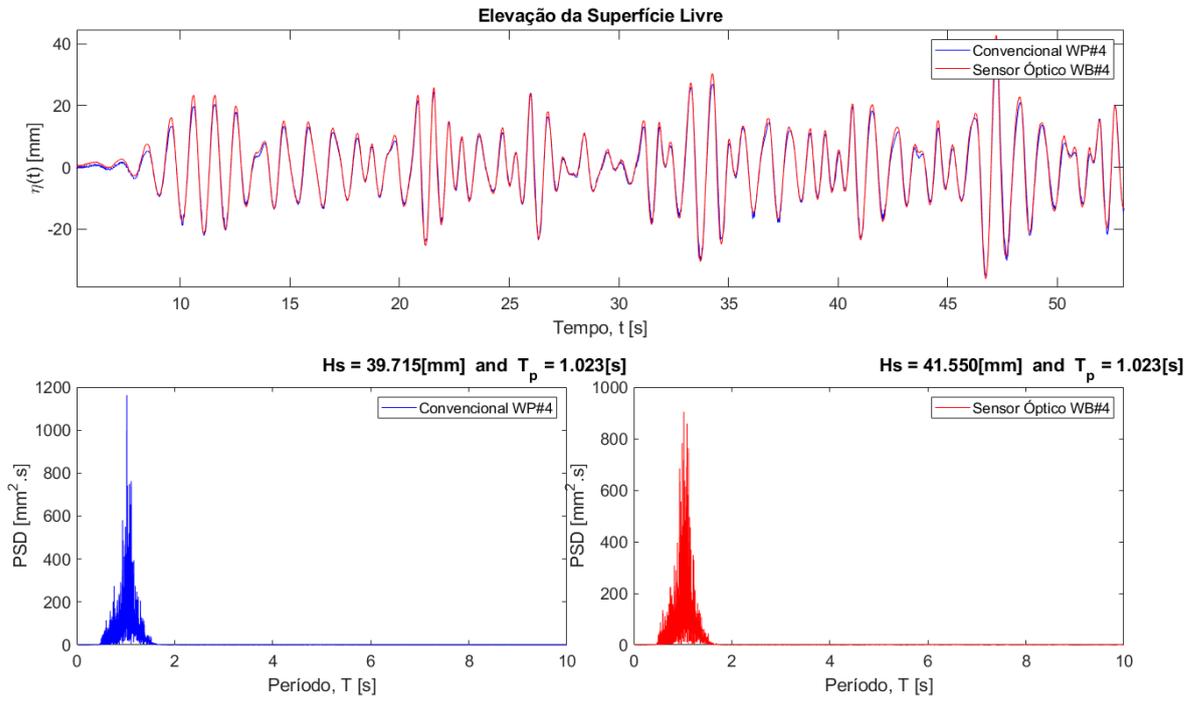


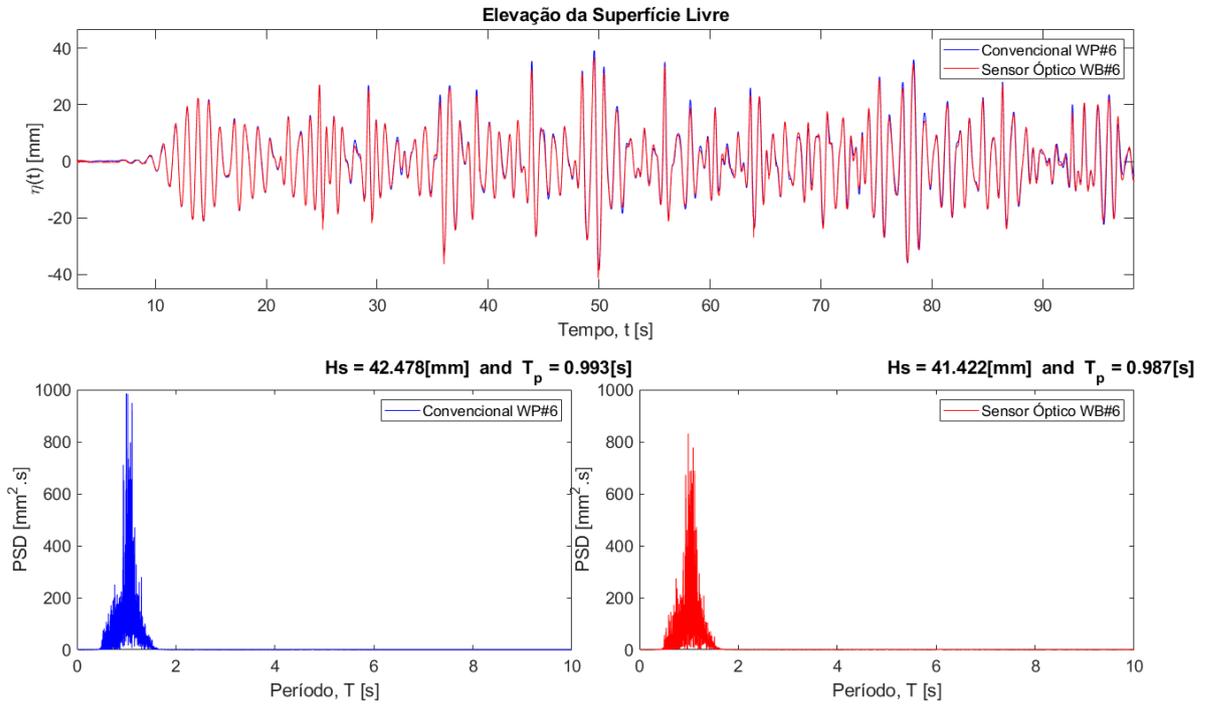


B.2. Resultados para ondas irregulares

Resultados para onda irregular do registro O14.







Onda irregular registro O15

