

## CÁLCULO DE FORÇAS EM LAJES DE PONTES-CAIS: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE FORMULAÇÕES E DO MODELO NUMÉRICO IH2VOF

Gustavo Rei <sup>(1)</sup>, Maria Graça Neves <sup>(1,2)</sup>, Eric Didier <sup>(2,3)</sup>

<sup>(1)</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL)

<sup>(2)</sup> LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

<sup>(3)</sup> UNIDEMI – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa  
g.rei@campus.fct.unl.pt, gneves@lnec.pt, edidier@lnec.pt

### RESUMO

Esta comunicação apresenta o cálculo das forças atuantes numa ponte-cais para atraque de navios localizada em profundidades intermédias. Estudaram-se diferentes secções transversais que diferem nas suas características geométricas e na respetiva profundidade. Para cada uma delas, foram calculadas as forças através das formulações e através do modelo numérico bidimensional IH2VOF, que resolve as equações de Reynolds-Average-Navier-Stokes com superfície livre. Para a aplicação do modelo foi feito inicialmente um estudo de convergência com a malha para a escolha da discretização da malha mais indicada. Dos resultados obtidos verificou-se que as forças máximas, verticais e horizontais, ocorrem na secção onde a profundidade é maior. Tanto as fórmulas como o modelo IH2VOF apresentam variação das forças com as mesmas tendências ao longo da estrutura, sendo as forças verticais máximas, em geral, significativamente superiores às forças horizontais máximas.

### 1. INTRODUÇÃO

A importância económica dos portos e o custo total das estruturas marítimas levam a que seja necessário um cuidado especial na fase de dimensionamento destas obras de modo a garantir um bom comportamento funcional e estrutural dessas estruturas. No caso de pontes-cais, um dos aspetos importantes na fase de projeto é a determinação das forças verticais a que os elementos estruturais horizontais vão estar sujeitos devido à interação destes com a agitação marítima. Os projetos desta natureza baseiam-se em fórmulas empíricas ou semi-empíricas, com coeficientes obtidos em ensaios em modelo físico. Assim, o seu limite de validade é reduzido, já que são apenas válidas para as condições desses ensaios. Têm como grande vantagem a fácil rapidez de cálculo em fase de estudo prévio. Efetuada uma revisão das formulações existentes para o cálculo de forças em lajes sujeitas à ação da agitação marítima, foi possível concluir que existem poucas fórmulas que consideram as forças atuantes em estruturas cuja largura da laje é comparável ao comprimento de onda incidente [1], ou seja, estruturas marítimas situadas em profundidades intermédias a pequenas profundidades, como é o caso comum das pontes-cais. A maior parte dos estudos efetuados incide em estruturas situadas em grandes profundidades e desprovidas de proteção, nomeadamente em plataformas *offshore*. Existem, no entanto, alguns estudos mais recentes efetuados em estruturas marítimas, tais como pontes. Os modelos numéricos começam agora a ser utilizados em estudos deste tipo, especialmente em trabalhos de investigação.

### 2. CASO DE ESTUDO

A estrutura em estudo é uma ponte-cais que tem como funcionalidade a acostagem de navios de pesca de grandes e médias dimensões. A estrutura da ponte-cais em betão armado é constituída por uma laje vigada de espessura de 0.40 m, assente em pilares (Figura 1). A fundação da estrutura é composta por enrocamento. A laje da estrutura tem aproximadamente 200 m de comprimento no total sendo constituída por três troços com larguras variáveis. O primeiro troço,

a partir do largo, possui 14.0 m de largura; o troço intermédio possui 7.0 m de largura e uma rampa com 3.0 m de largura que serve para a acostagem de navios piscatórios de menores dimensões. Por fim, o último troço, que termina na plataforma terrestre, tem 7.0 m de largura.



Figura 1. Vistas 3D da ponte-cais em estudo.

A ponte-cais foi dividida em seis secções representativas distintas, ou seja, foram seccionados seis perfis transversais da ponte-cais com profundidades ou geometria distintas. Para efeitos de obtenção das forças verticais e horizontais na laje, desprezaram-se, em todos os casos, a presença e o efeito dos pilares bem como o das vigas transversais que apoiam nos mesmos, por serem zonas cujo peso próprio da estrutura é mais relevante. As seis secções representam, assim, troços da laje entre pilares. Na Figura 2 apresenta-se as seis secções transversais (Secção 1 a Secção 6), onde NMM é o nível considerado nos cálculos que corresponde a preia-mar com sobrelevação.

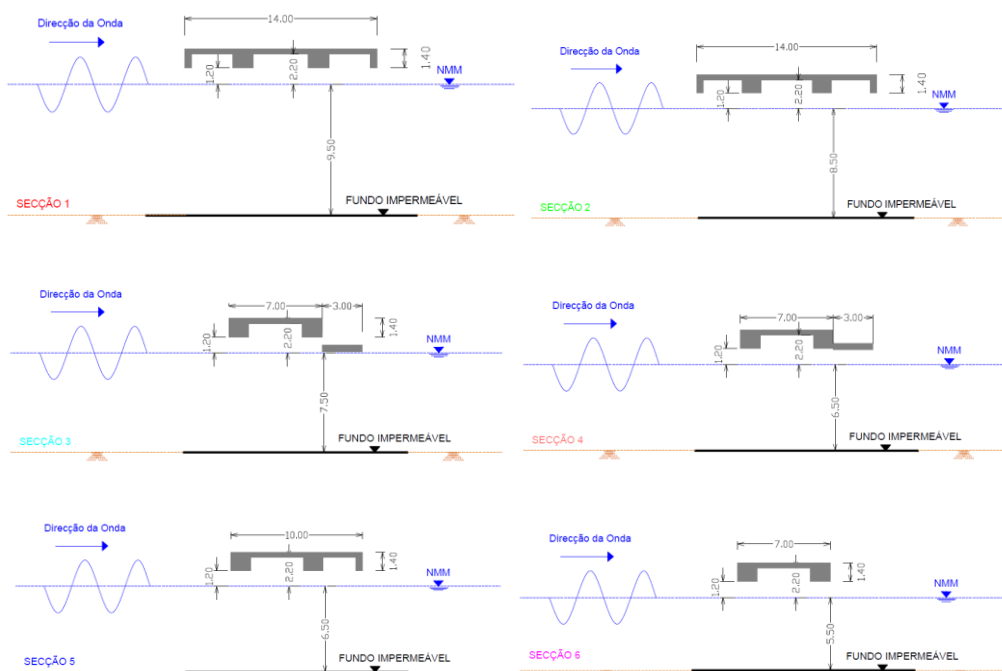


Figura 2. Secções transversais da ponte-cais: Secção 1 a Secção 6.

No Quadro 1 apresenta-se um resumo das principais características de cada secção, incluindo a cota da fundação e algumas dimensões geométricas da secção. Os cálculos foram feitos para uma condição de agitação, que corresponde à condição de limite de estabilidade. As características locais da agitação marítima incidente em cada secção são apresentadas no Quadro 2. Neste quadro,  $H_s$  corresponde à altura de onda significativa,  $H_{max}$  à altura de onda máxima,  $T_p$  ao período de pico e  $\lambda$  ao comprimento de onda respetivo.

Quadro 1. Características principais das secções.

Secção	1	2	3	4	5	6
Cota máxima da água (m ZH)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Cota superior da laje (m ZH)	5	5	5	5	5	5
Cota da fundação (m ZH)	-7.1	-6.1	-5.1	-4.1	-4.1	-3.1
$Z_d$ (m)	9.5	8.5	7.5	6.5	6.5	5.5
Estado da laje e vigas em relação ao NMM	emerso	emerso	emerso	emerso	emerso	emerso

Quadro 2. Condição da agitação marítima incidente em cada secção.

Secção	1	2	3	4	5	6
$H_s$ (m)	3.86	3.94	4.03	4.14	4.14	4.29
$H_{max}$ (m)	6.95	7.09	6.8	6	6	5.1
$T_p$ (s)	15	15	15	15	15	15
$\lambda$ (m)	140.62	133.42	125.71	117.39	117.39	108.31

### 3. FÓRMULAS PARA CÁLCULO FORÇAS EM LAJES

As principais forças a ter em conta no dimensionamento de lajes apoiadas em pilares sujeitas à ação da agitação são: forças de subpressão (verticais) e forças horizontais (Figura 3). Estas forças são calculadas, normalmente, através da integração das pressões que ocorrem na superfície da estrutura.

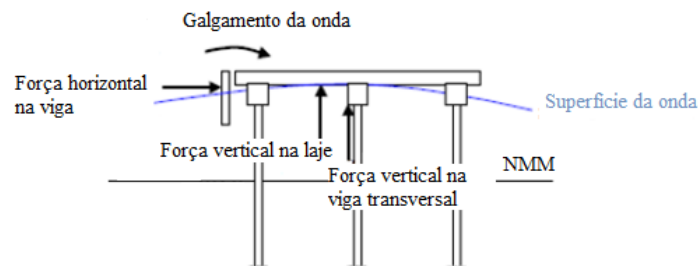


Figura 3. Forças em tabuleiros de pontes (adaptado de [2]).

Para o cálculo destas forças, isto é, forças em estruturas marítimas compostas por lajes apoiadas em pilares, como é o caso de pontes-cais, não existem muitas fórmulas específicas [3]. Existem, no entanto, alguns estudos de forças em plataformas horizontais, tais como tabuleiros de pontes e plataformas *offshore*, sujeitas à ação da agitação.

No Quadro 3 e Quadro 4 apresenta-se um resumo das fórmulas mais apropriadas ao caso em estudo com as suas principais características no que se refere ao tipo de fórmula (teórica, empírica ou semi-empírica), trabalhos de base, caso existam, tipo de agitação considerada e características geométricas da estrutura e respetiva profundidade.

Quadro 3. Data, tipo de fórmula, agitação e trabalho de base.

FÓRMULA	Data	Tipo fórmula	Trabalho base	Tipo agitação
<i>Denson</i>	1978 e 1980	empírica		regular
<i>Kaplan</i>	1992 e 1995	teórica	Morison	regular
<i>Suchitra e Koola</i>	1995	empírica		regular/irregular
<i>Bea et al.</i>	1999	teórica	Kaplan em 1995	regular
<i>Overbeek e Klabbers</i>	2001	teórica	Wang e French em 1970 [1]	irregular
<i>McConnell et al.</i>	2004	empírica	Tirindelli em 2002 [4]	irregular
<i>U.S Army Corps of Engineers</i>	2006	teórica		regular
<i>Douglass et al.</i>	2006	empírica	McConnell et al.	irregular
<i>McPherson</i>	2008	empírica	Douglass et al.	irregular
<i>AASHTO</i>	2008	empírica		irregular
<i>Marin</i>	2009	semi-empírica	Kaplan em 1995	regular/irregular

Quadro 4. Condição de Aplicação

FÓRMULA	Tipo emersão	Tipo estrutura	Profundidade de estudo
<i>Denson</i>	emersa	Laje vigada	Grandes profundidades
<i>Kaplan</i>	emersa	Plataforma <i>offshore</i>	Grandes profundidades
<i>Suchitra e Koola</i>	emersa	Laje vigada	Grandes profundidades
<i>Bea et al.</i>	emersa	Plataforma <i>offshore</i>	Grandes profundidades
<i>Overbeek e Klabbers</i>	emersa	Laje vigada	Pequenas profundidades
<i>McConnell et al.</i>	emersa	Laje vigada	Pequenas profundidades
<i>U.S Army Corps of Engineers</i>	emersa/submersa		Grandes profundidades
<i>Douglass et al.</i>	emersa	Laje vigada	Pequenas profundidades
<i>McPherson</i>	emersa	Laje vigada	Pequenas profundidades
<i>AASHTO</i>	emersa	Laje vigada	Grandes profundidades
<i>Marin</i>	emersa/submersa	Laje vigada	Pequenas profundidades

Como se pode observar, para lajes vigadas emersas localizadas em profundidades intermédias a pequenas, como é o caso da estrutura em estudo, as fórmulas disponíveis são: *Overbeek e Klabbers (2001)*, *McConnell et al. (2004)* [4], *Douglass et al. (2006)* [5], *McPherson (2008)* [6] e *Marin (2009)*. Nenhuma destas cinco fórmulas tem em conta a direção de propagação da onda incidente, isto é, são para agitação normal à laje, que consideram representar a situação mais conservativa em termos do cálculo de forças. Destas fórmulas, apenas a de *Marin (2009)* tem em conta o período da onda indiretamente, através do comprimento de onda.

Para o cálculo de forças aplicado ao caso de estudo, a fórmula de *Overbeek e Klabbers (2001)* não é aqui utilizada já que os próprios autores consideraram que seria necessário um estudo mais completo para obter uma fórmula mais precisa no dimensionamento deste tipo de estruturas [1]. Em relação à fórmula de *Marin (2009)*, esta foi desenvolvida para o caso em que o comprimento de onda era da mesma ordem de grandeza da largura da laje e para estruturas parcialmente submersas, o que não é o caso da estrutura em estudo e como tal não foi aplicada para o cálculo de forças.

O método *AASHTO* de 2008 (American Association of State Highway and Transportation Officials), embora tenha sido desenvolvido especificamente para o cálculo de forças em pontes vulneráveis às tempestades marítimas e ser válida para grandes profundidades, foi aqui considerado por ser o método que inclui mais parâmetros, incluindo diretamente o período e o comprimento de onda no cálculo das forças e tendo em conta mais parâmetros relacionados com a

geometria da estrutura que qualquer outra fórmula. No entanto, não foi disponível obter na literatura a informação necessária para calcular a força horizontal com esta fórmula.

A fórmula de *Bea et al. (1999)* [1], embora analise lajes em plataformas *offshore*, é aqui considerada por ser baseada num modelo analítico, utilizando a equação de Morison e a teoria das ondas (5ª ordem de Stokes) para obter as velocidades / acelerações das ondas, e com base nelas, a força total vertical.

Assim, são aqui aplicadas ao cálculo de forças em lajes de pontes-cais as fórmulas de *Douglass et al. (2006)*, *McPherson (2008)*, *McConnell et al. (2004)*, *AASHTO (2008)* e *Bea et al. (1999)*.

#### 4. MODELO NUMÉRICO IH2VOF

##### 4.1 Descrição do modelo

O modelo IH2VOF é um modelo bidimensional que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência,  $k-\varepsilon$ , tridimensional (Losada et al., 2008). O modelo incorpora ainda um método de seguimento da superfície livre do tipo "Volume of Fluid" (VOF).

Para o escoamento em meios porosos inclui um modelo de dissipação de energia não linear, que corresponde a uma variação das equações RANS e que se obtém a partir de uma integração num volume de controlo no meio poroso, considerando-se assim o meio poroso como um meio contínuo. Os obstáculos e zonas de diferentes porosidades são definidos através de funções contínuas. Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade e o tamanho dos elementos que o compõem e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados.

O IH2VOF tem sido extensivamente validado para estruturas emersas e submersas e para condições de rebentação em taludes permeáveis (Garcia et al., 2004 e Lara et al., 2006).

##### 4.2 Estudo de convergência com a malha

As equações RANS são resolvidas em vários pontos do domínio, sendo estes definidos pela dimensão da malha e por sua vez influenciam a precisão dos resultados.

Para verificar qual a discretização da malha que permite uma correta representação dos fenómenos com o menor custo computacional possível foi realizado um estudo de convergência. Para tal, foi feita uma análise dos resultados de elevação de superfície livre, forças na laje e tempo de cálculo pelo modelo na Secção 6, considerando a agitação regular com altura de onda,  $H=1.61$  m e período,  $T=12$  s, condição limite de serviço, e com quatro níveis de refinamento da malha, de uma malha grosseira, com 45864 elementos, M1, até uma malha fina, com 213210 elementos, M4. O domínio computacional foi dividido em 3 zonas, quer em  $x$  quer em  $y$ : duas onde a dimensão da malha é variável e uma zona, junto à estrutura, onde a dimensão é fixa e mínima. Nas zonas de dimensão variável esta vai variando progressivamente do valor mínimo a um valor máximo que é escolhido criteriosamente, de acordo com as indicações que constam no manual do modelo [7]. Essa dimensão mínima,  $\Delta x$  em  $x$  e  $\Delta y$  em  $y$ , variou de malha para malha e o seu valor é o apresentado no Quadro 5, juntamente com o total de células no domínio e em cada eixo.

Quadro 5. Características das malhas usadas no IH2VOF para a Secção 6.

Identificação da malha	M4	M3	M2	M1
$\Delta x$ (m)	0.1	0.125	0.25	0.25
$\Delta y$ (m)	0.1	0.1	0.14	0.2
Total de células segundo $x$	2369	1936	819	819
Total de células segundo $y$	90	90	67	56
Total de células no domínio	213210	174240	54873	45864

A Figura 4 apresenta o domínio de cálculo numérico aplicado à Secção 6, no ambiente de trabalho da interface do modelo IH2VOF, o CORAL, onde a linha azul horizontal indica a posição da superfície livre em repouso, a amarelo a estrutura em estudo, impermeável, e a trama verde indica a discretização da malha nas duas direções.

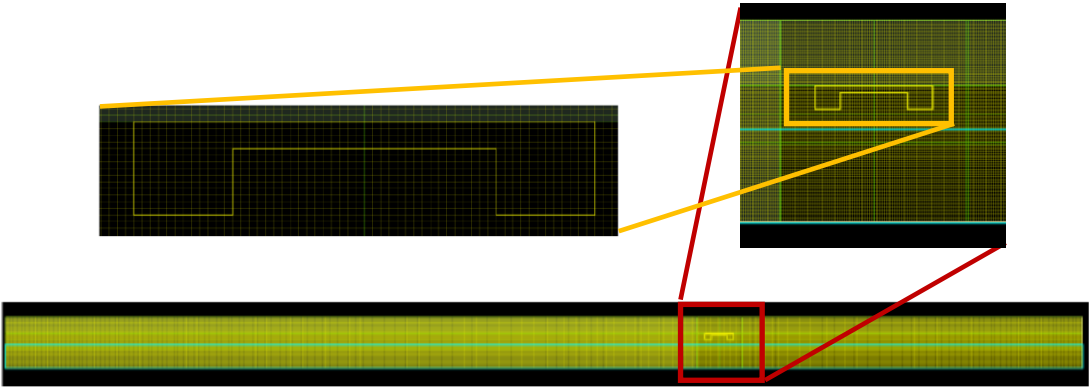


Figura 4. Domínio de cálculo numérico na Secção 6.

Para a análise de convergência analisaram-se as séries temporais de elevação da superfície livre em 16 sondas localizadas ao longo do domínio de cálculo, dos quais 7 na zona da estrutura, respetivos espectros e as forças em três superfícies na parte inferior da laje e nas duas superfícies verticais do lado de barlar da estrutura, tal como indicado na Figura 5, já que são estas as que contribuem para a instabilização da estrutura.

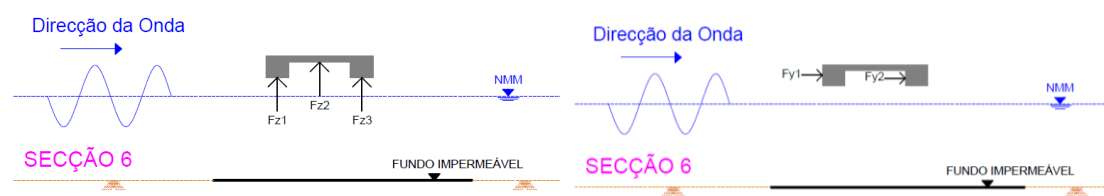


Figura 5. Forças verticais e horizontais na Secção 6.

As forças atuantes na estrutura correspondem à média das forças obtidas na estrutura na passagem de 47 ondas regulares. No Quadro 6 e na Figura 6, apresenta-se o valor das forças médias verticais em cada uma das superfícies na base da estrutura,  $F_{z1}$  a  $F_{z3}$ , e a força média total,  $F_{zTotal}$ , para as quatro malhas utilizadas.

Quadro 6. Forças verticais na base da estrutura para as 4 malhas.

Identificação da malha	M4	M3	M2	M1
$F_{z1}$ (kN/m)	2.97	4.13	9.35	8.57
$F_{z2}$ (kN/m)	0	0.015	3.67	0.88
$F_{z3}$ (kN/m)	1.76	1.77	4.77	4.82
$F_{zTotal}$ (kN/m)	2.97	4.13	10.85	8.34

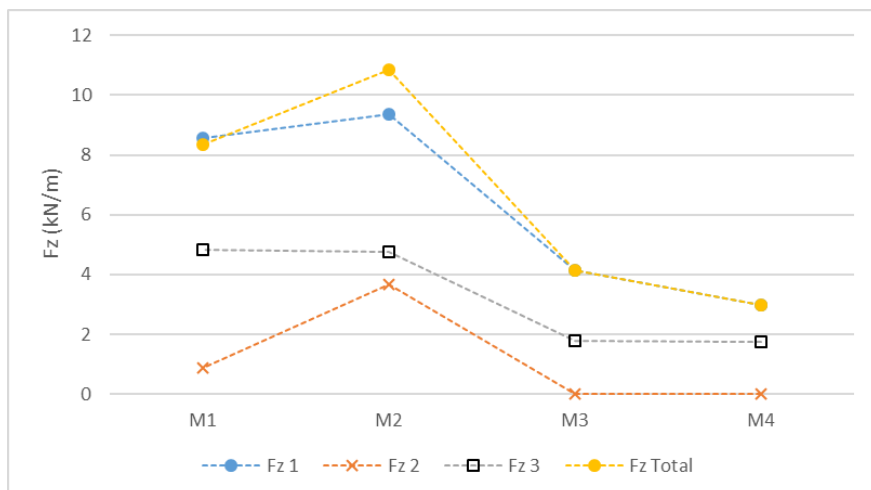


Figura 6. Forças médias verticais na base da estrutura para as 4 malhas.

Como se pode observar, as malhas M3 e M4 apresentam resultados dentro da mesma ordem de grandeza e há uma estabilização da tendência de alteração dos valores das forças médias. Efetivamente, diminuindo a dimensão da malha em  $x$  de 0.125 m (M3) para 0.1 m (M4) praticamente não altera o valor  $Fz\ 2$  e  $Fz\ 3$ . No entanto o valor de  $Fz\ 1$  e, consequentemente, o valor de  $Fz\ Total$ , ainda não se encontram completamente estabilizados.

No que se refere à agitação, as diferenças médias quadráticas entre os valores das séries temporais de agitação obtidas com as malhas M3 e M4 é sempre inferior a 0.18 e o respetivo índice de concordância entre os resultados com estas duas malhas é sempre superior a 0.98.

A diferença de tempo de cálculo entre estas duas malhas é de cerca de 9 h, passando de 715 minutos para 1257 minutos para um tempo de simulação de 750 s.

Analisando a precisão dos resultados e o tempo de cálculo, optou-se por utilizar a malha M4 nos cálculos que aqui se apresentam.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Fórmulas

Para o cálculo das forças de subpressão e na face da barlar de cada uma das secções em estudo (Figura 2) aplicaram-se as fórmulas referidas anteriormente para a condição de agitação apresentada no Quadro 2.

Para esta condição de agitação incidente, os resultados das forças obtidos por cada fórmula em cada uma das seis secções são apresentados nos Quadros 7 e 8, onde  $Fz$  corresponde à força total de subpressão na laje e  $Fy$  à força total na face de barlar. Note-se que as forças obtidas são apresentadas por unidade de área ( $m^2$ ) de modo a permitir comparar as forças entre secções, uma vez que estas têm áreas diferentes.



Quadro 7. Cálculo das forças verticais obtidas com as fórmulas para a condição da agitação em estudo.

	$F_z$ (kN/m <sup>2</sup> )					
<b>Fórmula \ Secção</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<i>Douglass (2006)</i>	34	33	26	20	20	13
<i>McPherson (2008)</i>	19	18	17	14	12	9
<i>AASHTO (2008)</i>	11	9	16	13	8	9
<i>McConnell (2004)</i>	30	29	25	21	22	17
<i>Bea (1999)</i>	4	4	3	3	2	2

Quadro 8. Cálculo das forças horizontais obtidas com as fórmulas para a condição da agitação em estudo.

	$F_y$ (kN/m <sup>2</sup> )					
<b>Fórmula \ Secção</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<i>Douglass (2006)</i>	81	78	41	32	41	23
<i>McPherson (2008)</i>	22	21	18	10	15	12
<i>McConnell (2004)</i>	20	20	15	11	11	6
<i>Bea (1999)</i>	28	29	25	22	22	19

## 5.2 Modelo numérico

As simulações numéricas com o modelo numérico IH2VOF permitiram calcular as forças de subpressão e verticais nas faces de barlar da estrutura utilizando, tal como referido anteriormente, uma malha com um espaçamento de 0.1 m na zona da estrutura. Obtiveram-se ainda as séries temporais da agitação em diferentes secções do domínio, 6 a barlar da estrutura, 7 na zona da estrutura e 3 a sotamar da estrutura. As simulações foram feitas para as secções 1 a 6. Foram ainda feitas considerando agitação regular com altura e período correspondentes à altura de onda significativa e período de pico da condição de agitação em estudo (Quadro 2). Para tal, e de forma a que não ocorresse rebentação antes da estrutura, o domínio foi alterado aumentando-se a profundidade junto ao gerador em 4 m e inclui-se uma rampa de transição com um declive de 1% até atingir a profundidade da secção em estudo (Figura 7). A condição de agitação no baterador foi tal que se obtivesse, junto à estrutura, a altura de onda e período correspondente à agitação incidente na estrutura e apresentada no Quadro 2.

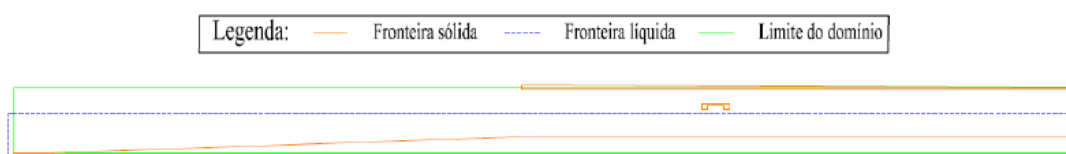


Figura 7. Domínio de cálculo numérico na Secção 6.



Para ilustrar os resultados obtidos, apresenta-se, para a Secção 1, as superfícies horizontais e verticais que compõem a estrutura, isto é, as sete superfícies horizontais na parte inferior da laje e as quatro superfícies verticais do lado de barlar da estrutura, tal como indicado na Figura 8. Com base nas forças obtidas pelo modelo em cada uma destas superfícies calculou-se a força total vertical de subpressão,  $F_{ztotal}$ , e horizontal na direção da incidência da agitação,  $F_{ytotal}$ . Na Figura 9 apresenta-se a série temporal das forças  $F_{ztotal}$  e  $F_{ytotal}$  na estrutura e no Quadro 9 os respectivos valores médios (em 47 ondas),  $\bar{F}_z$  e  $\bar{F}_y$ , e máximos,  $F_z \text{ máx}$  e  $F_y \text{ máx}$ .

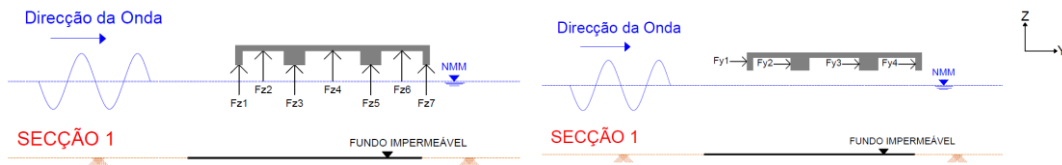


Figura 8. Superfícies de cálculo das forças de subpressão e horizontal na direção da incidência da agitação na Secção 1.

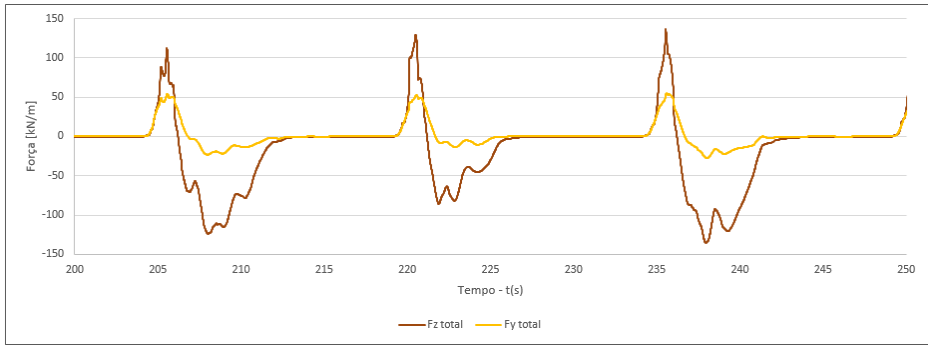


Figura 9. Série temporal das forças de subpressão,  $F_{z \text{ total}}$ , e horizontal na direção da incidência da agitação,  $F_{y \text{ total}}$ , na Secção 1.

Quadro 9. Valores médios e máximos das forças  $F_z$  e  $F_y$  na Secção 1.

Superfície	1	2	3	4	5	6	Total
$\bar{F}_y$ (kN/m)	29.2	18.1	12.1	8.3	-----	-----	59.4
$F_y \text{ máx}$ (kN/m)	32.6	35.8	36.6	38.1	-----	-----	89.6
$\bar{F}_z$ (kN/m)	7.7	43.6	20.0	42.9	14.6	21.6	140.8
$F_z \text{ máx}$ (kN/m)	15.9	103.9	29.9	99.2	34.5	59.2	233.0

Apresenta-se na Figura 10 a série temporal da superfície livre obtida em quatro sondas, uma próxima da zona de geração da agitação (sonda 3), duas na proximidade da estrutura, uma antes desta (sonda 6) e outra depois (sonda 19) e uma na zona central da estrutura (sonda 12). Na Figura 11 apresenta-se o espectro obtido nas sondas 3, 6 e 19. O espectro na sonda 12 não é apresentado já que a superfície livre representa não só a elevação sob a laje mas integra também a coluna de água em cima da laje devido ao galgamento da mesma. Da análise dessas figuras, pode-se constatar que a superfície livre e o espectro na sonda 3 apresentam características semelhantes ao da onda incidente regular devido ao facto de se encontrar distante da estrutura e, consequentemente, longe da influência das ondas provenientes da interação da onda incidente com a estrutura. Já a superfície livre nas sondas 6, 12 e 19 apresentam características mais

complexas e os espectros nas sondas 6 e 19 apresentam uma redução da energia na frequência fundamental e aumento nas harmônicas, devido à interação da onda com a estrutura.

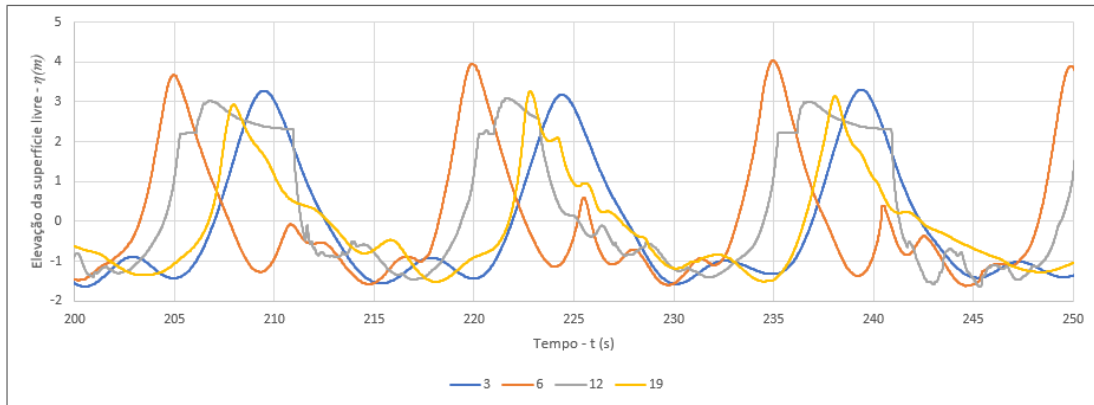


Figura 10. Série temporal da elevação da superfície livre nas sondas 3, 6, 12 e 19 na Secção 1.

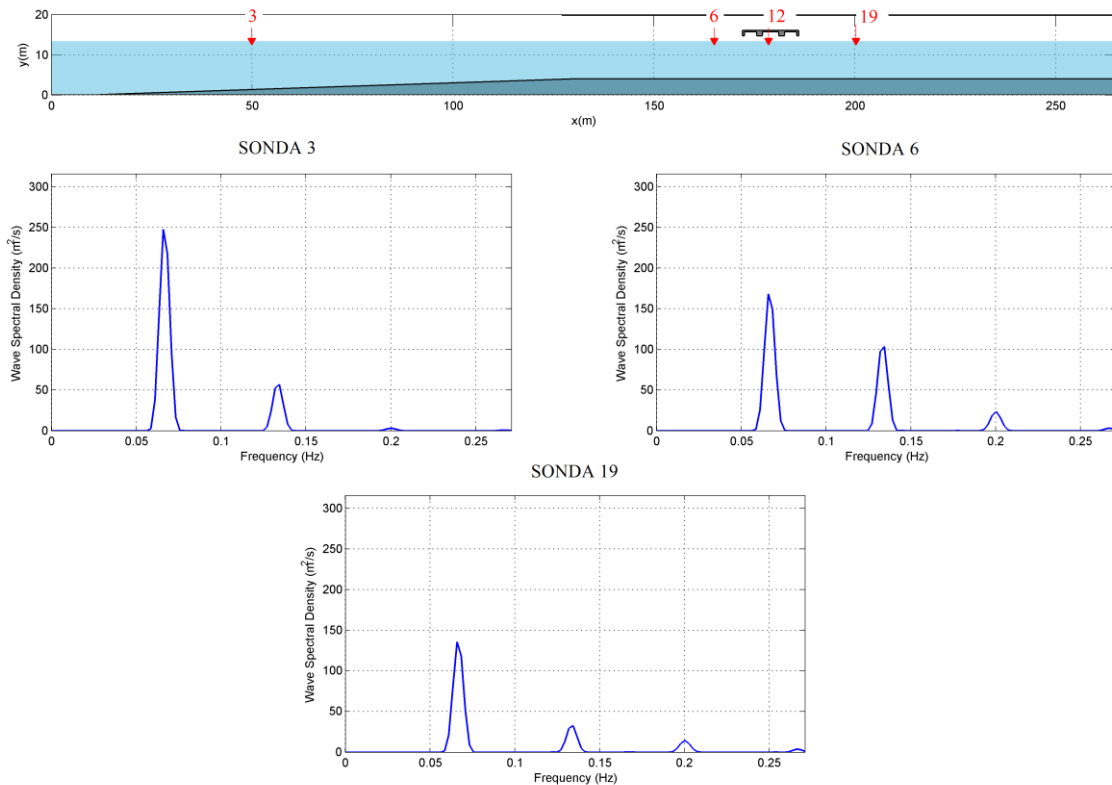


Figura 11. Espectro da onda nas sondas 3, 6 e 19 na Secção 1.

Da mesma forma, para as restantes secções obtiveram-se as forças médias e máximas nas secções em estudo para a condição de agitação regular correspondente a essa secção. O resumo dos resultados das forças médias obtidos pela aplicação do modelo IH2VOF em cada uma das seis secções é apresentado no Quadro 10, onde  $F_z$  corresponde à força média total de supressão na laje e  $F_x$  à força média total na face de barlar.

Quadro 10. Forças médias obtidas com o modelo IH2VOF para a condição da agitação em estudo nas secções 1 a 6.

SECÇÃO	1	2	3	4	5	6
$F_y$ (kN/m)	59.4	49.5	37.6	36.2	26.2	14.7
$F_z$ (kN/m)	140.8	116.6	103.5	107.7	54.2	35.9

### 5.3 Comparação de resultados das forças máximas

Após a obtenção das forças máximas em cada secção através das fórmulas e do modelo IH2VOF, apresenta-se aqui a comparação dos respetivos resultados. Estes resultados encontram-se resumidos no Quadro 11 e Quadro 12 e nas Figura 12 e Figura 13.

Quadro 11.  $F_z$  máx obtido com as fórmulas e com o IH2VOF para as Secções 1 a 6.

Secção	1	2	3	4	5	6
<i>Douglass et al. (2006)</i>	473	456	183	138	197	93
<i>McPherson (2008)</i>	265	256	120	97	119	61
<i>AASHTO (2008)</i>	147	125	112	93	80	62
<i>McConnell et al. (2004)</i>	422	411	174	146	218	118
<i>Bea et al. (1999)</i>	52	50	23	18	23	13
IH2VOF	233	164	139	143	97	63

Quadro 12.  $F_y$  máx obtido com as fórmulas e com o IH2VOF para as Secções 1 a 6.

Secção	1	2	3	4	5	6
<i>Douglass et al. (2006)</i>	113	110	57	45	57	32
<i>McPherson (2008)</i>	31	30	25	14	21	16
<i>McConnell et al. (2004)</i>	28	27	21	15	15	9
<i>Bea et al. (1999)</i>	40	40	35	31	31	26
IH2VOF	90	66	47	45	39	18

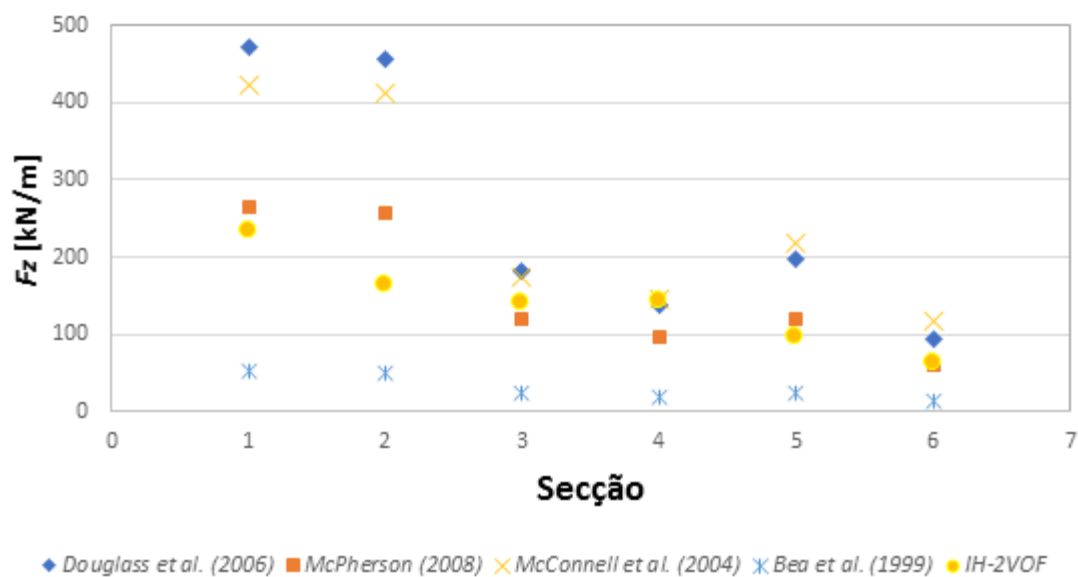


Figura 12.  $F_z$  máx obtido com as fórmulas e com o IH2VOF.

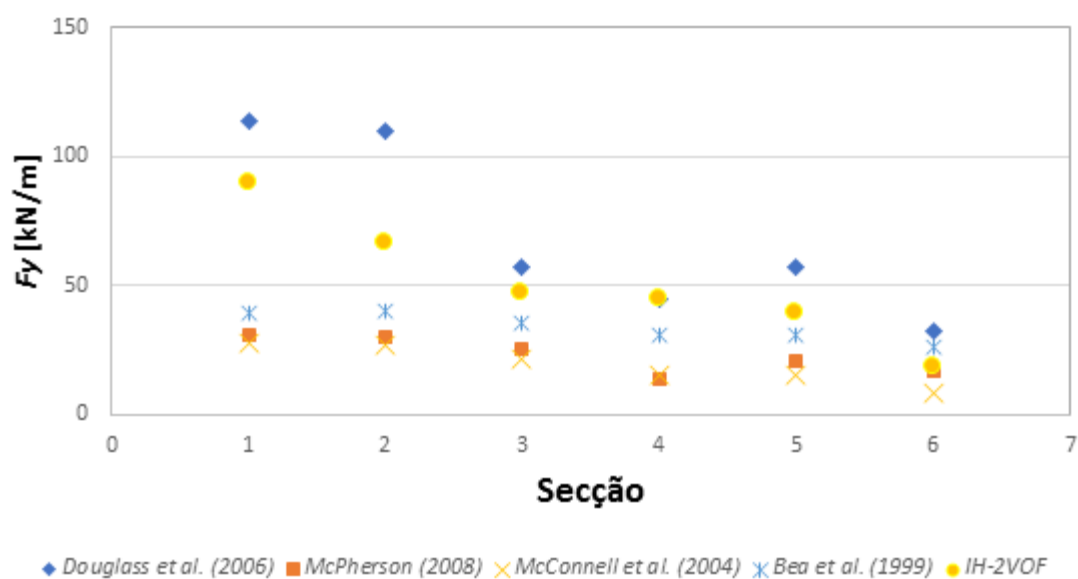


Figura 13.  $F_y$  máx obtido com as fórmulas e com o IH2VOF.

Da análise dos quadros e figuras anteriores pode-se verificar que as forças máximas ocorrem onde a profundidade é maior, ou seja, na Secção 1. Tanto as fórmulas como o modelo IH2VOF apresentam a mesma tendência na variação das forças ao longo da estrutura, sendo as forças verticais máximas, em geral, significativamente superiores às forças horizontais máximas.

As fórmulas de *McPherson (2008)* e *AASHTO (2008)* são as que, em geral, mais se aproximam dos resultados do IH2VOF em termos de forças verticais máximas, apresentando a mesma tendência global, com diferenças médias na ordem dos 19 a 23 %, respetivamente. As fórmulas de *Douglass et al. (2006)*, *McConnell et al. (2004)* e *Bea et al. (1999)* afastam-se mais dos resultados do IH2VOF apresentando diferenças médias na ordem dos 38 a 79 %.

Em relação às forças horizontais obtidas pelas fórmulas, estas são globalmente inferiores aos valores obtidos pelo modelo IH2VOF. No entanto, a fórmula de *Douglass et al. (2006)* apresenta valores da força horizontal da mesma ordem de grandeza que os obtidos com o modelo IH2VOF, com diferenças médias na ordem dos 26 %.

Importa salientar também que as conclusões obtidas anteriormente são similares às conclusões de Hayatdavoodi et al. [8] que comparou os resultados obtidos, em termos de forças, pelas fórmulas de *Douglass et al. (2006)*, *AASHTO (2008)*, *McPherson (2008)* e pelo modelo numérico OpenFOAM, um modelo numérico similar ao IH2VOF.

## 6. CONCLUSÕES

No presente artigo estudam-se as forças atuantes em secções transversais de lajes que estão sujeitas à ação da agitação marítima e cuja determinação é importante para efeitos do seu dimensionamento. Em particular, aplicaram-se dois métodos de cálculo de forças em estruturas tipo ponte-cais: as fórmulas e o modelo numérico IH2VOF, que resolve as equações RANS com superfície livre. Esses métodos foram aplicados a um caso de estudo de uma ponte cais, composta por lajes vigadas assentes em pilares, localizada em profundidades intermédias a pequenas profundidades e composto por seis secções que diferem entre si na sua geometria ou na profundidade.

Da revisão bibliográfica das fórmulas existentes foi possível concluir que existem poucos estudos que consideram as forças verticais atuantes em estruturas marítimas semelhantes a ponte-cais e cuja largura da laje é comparável ao comprimento de onda incidente. A maior parte dos estudos efetuados incide em estruturas situadas em grandes profundidades, nomeadamente em plataformas *offshore*. Existem, no entanto, alguns estudos mais recentes efetuados em estruturas marítimas tais como pontes, em águas pouco profundas, e que recorrem também à modelação numérica bidimensional.

O cálculo das forças na estrutura em estudo foi feito aplicando as fórmulas de *Douglass et al. (2006)*, *McPherson (2008)*, *McConnell et al. (2004)*, *AASHTO (2008)* e *Bea et al. (1999)*. Estas fórmulas são as que são aplicáveis a lajes vigadas emersas localizadas em profundidades intermédias a pequenas, como é o caso em estudo, ou que tem alguma particularidade que leva a que, embora fora do seu limite de aplicabilidade, seja interessante aqui analisar.

Dos resultados das fórmulas, importa referir que se teve em consideração o cálculo bidimensional (kN/m) de forma a se poder comparar os resultados com os do modelo IH2VOF. Conclui-se que as secções mais solicitadas pela agitação são as secções localizadas a maiores profundidades, neste caso, entre 9.5 m e 8.5 m. Com as fórmulas de *Douglass et al. (2006)*, *McPherson (2008)* e *McConnell et al. (2004)* verificou-se para todas as secções que a força vertical máxima é bastante superior à força horizontal máxima. No entanto, na fórmula de *Bea et al. (1999)*, que se encontra fora do seu limite de validade, esta tendência não se verifica. As fórmulas de *Douglass et al. (2006)* e *McConnell et al. (2004)* apresentam resultados de forças verticais semelhantes, no entanto, a fórmula de *Douglass et al. (2006)* apresenta valores das forças horizontais superiores ao das restantes fórmulas especialmente nas secções de maior profundidade. *McPherson*, ao propor a sua fórmula, ajustou as forças horizontais por considerar que a fórmula de *Douglass et al. (2006)* sobrestimava esse valor.

Para o cálculo das forças com o modelo numérico IH2VOF fez-se o estudo de convergência com a malha para verificar qual a malha que permite uma representação mais correta dos fenómenos com um menor custo computacional. Sendo assim foi feita uma análise dos resultados de elevação de superfície livre e das forças obtidas pelo modelo numa das secções em estudo com quatro níveis de refinamento da malha, de uma malha grosseira, com 45864 elementos, até uma malha fina, com 213210 elementos. Após o estudo de convergência das malhas e, consequentemente, a escolha da discretização da malha mais indicada, efetuou-se o cálculo das forças, com o modelo numérico IH2VOF, nas diferentes secções tipo da estrutura em estudo, com larguras e profundidades variáveis.

Dos resultados do cálculo das forças com o modelo IH2VOF e consequente comparação com os resultados das fórmulas é possível concluir que as forças máximas, verticais e horizontais, ocorrem onde a profundidade é maior. Tanto as fórmulas como o modelo IH2VOF apresentam

variação das forças com as mesmas tendências ao longo da estrutura, sendo as forças verticais máximas, em geral, significativamente superiores às forças horizontais máximas. As fórmulas de *McPherson (2008)* e *AASHTO (2008)* são as que, em geral, mais se aproximam dos resultados do IH2VOF em termos de forças verticais máximas e apresentam a mesma tendência global ao longo das diferentes secções, com diferenças médias na ordem dos 19 a 23 %, respetivamente. Por outro lado, as forças horizontais obtidas pelas fórmulas são globalmente inferiores aos valores obtidos pelo modelo IH2VOF. No entanto, a fórmula de *Douglass et al. (2006)* apresenta valores da força horizontal da mesma ordem de grandeza que os obtidos com o modelo IH2VOF, com diferenças médias na ordem dos 26 %.

No entanto, é necessário ter em conta na análise dos resultados obtidos quer com as fórmulas quer com a modelação numérica, que é bidimensional, isto é, desprezou-se o efeito dos pilares no modelo estrutural aplicado e a incidência oblíqua da agitação, o que terá influência nas forças na estrutura em estudo.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. M. Sheppard and J. Marin, "Wave loading on bridge decks," no. December, p. 177, 2009.
- [2] G. Cuomo, M. Tirindelli, and W. Allsop, "Wave-in-deck loads on exposed jetties," *Coast. Eng.*, vol. 54, no. 9, pp. 657–679, 2007.
- [3] D. Kisacik, P. Troch, and P. Van Bogaert, "Experimental Results of Breaking Wave Impact on a Vertical Wall With an Overhanging Horizontal Cantilever Slab," *Coast. Eng. Proc.*, vol. 1, no. 32, pp. 1–10, 2011.
- [4] K. McConnell, W. Allsop, and I. Cruickshank, *Piers, Jetties and Related Structures Exposed to Waves: Guidelines for Hydraulic Loadings*. 2004.
- [5] S. L. Douglass, Q. J. Chen, and J. M. Olsen, "Wave Forces on Bridge Decks," no. June, 2006.
- [6] D. C. H. Lum, "Assessment of the Vulnerability of Oahu's Coastal Bridges to Storm Waves and Tsunami Inundation," *Water*, 2011.
- [7] D. E. Hflr and J. Ldirrr, "IH2VOF COURSE," 2012.
- [8] M. Hayatdavoodi, R. C. Ertekin, I. N. Robertson, and H. R. Riggs, "Vulnerability assessment of coastal bridges on Oahu impacted by storm surge and waves," *Nat. Hazards*, vol. 79, no. 2, pp. 1133–1157, 2015.