



Análise Da Viabilidade De Abordagens Computacionais Para Dimensionamento De Sistemas De Fundeio

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado¹, Manoel Rodrigues Justino Filho²,

¹Escola Politécnica da UFRJ / DES - Departamento de Estruturas / pedro.de.machado@poli.ufrj.br

²Escola Politécnica da UFRJ / DES - Departamento de Estruturas / manoeljustino@poli.ufrj.br

Resumo

Os píeres têm como objetivo permitir o acesso a embarcações com calados maiores ou que não possam atracar diretamente na costa. Normalmente fixos, são engastados no leito do rio ou do mar. Porém, em regiões com escassez de recursos e difícil acesso, os píeres flutuantes podem melhorar o acesso de comunidades isoladas a itens essenciais e serviços, sendo mais fáceis de implementar e exigindo menos licenças ambientais. Para demonstrar sua viabilidade, realizou-se um estudo de caso em uma região próxima a Itacoatiara-AM, empregando análises computacionais dos esforços de corrente e vento locais para dimensionar o sistema de fundeio. Utiliza-se o software Ansys Fluent 2024 R1 para modelar cenários de ações ambientais atuantes sobre o píer flutuante para gerar e utilização a recomendação espanhola ROM 2.0-11 para comparar os resultados. Com isso, visa-se apresentar a discussão sobre as duas abordagens e os seus resultados.

Palavras-chave

Píer flutuante; CFD no Ansys Fluent; Sistema de fundeio.

Introdução

A infraestrutura portuária é essencial para a logística e o comércio de um país, especialmente em regiões onde o transporte hidroviário desempenha um papel fundamental. No Brasil, a vasta rede fluvial apresenta um grande potencial para navegação, porém, a carência de infraestrutura adequada em áreas mais remotas dificulta o transporte de mercadorias e passageiros (Adapta Brasil, 2019).

Com base na contextualização apresentada, a implementação de píeres flutuantes surge como uma alternativa viável para suprir essa deficiência estrutural, permitindo a atracação segura de embarcações, o que facilita o transporte de cargas e passageiros. Diferente dos píeres fixos, que requerem fundações robustas no leito dos rios, os píeres flutuantes oferecem maior flexibilidade, exigindo menos intervenções ambientais e apresentando menor custo de implementação.

A cidade de Itacoatiara-AM, situada às margens do Rio Amazonas, enfrenta desafios logísticos devido à ausência de infraestrutura portuária adequada. A inexistência de estruturas apropriadas para carga e descarga impacta negativamente o desenvolvimento socioeconômico da região, dificultando o acesso a bens essenciais. A viabilidade da instalação de um píer flutuante na região pode ser avaliada por meio de análises computacionais que consideram os esforços atuantes na estrutura, provenientes de correntes fluviais e ação do vento.

Este estudo tem como objetivo analisar a aplicabilidade de modelos computacionais para o dimensionamento de sistemas de fundeio de píeres flutuantes. Para isso, são utilizados o software *Ansys Fluent*, baseado na modelagem CFD (*Computational Fluid Dynamics*), e a recomendação espanhola ROM 2.0-11, permitindo uma comparação entre os resultados numéricos e os critérios normativos. A abordagem metodológica inclui a simulação computacional dos esforços atuantes na

estrutura e a análise da estabilidade hidrostática do píer, garantindo sua viabilidade técnica e operacional.

A pesquisa contribui para o desenvolvimento de soluções estruturais adaptáveis a diferentes contextos, oferecendo uma alternativa eficiente para regiões ribeirinhas que dependem do transporte fluvial. A aplicação de ferramentas computacionais para o dimensionamento de sistemas de fundeio pode otimizar projetos futuros, assegurando maior segurança e eficiência na operação de píeres flutuantes.

Cargas de Vento, Corrente e Atrito

Para determinar as cargas de vento, deve-se considerar a área de obstrução do píer às componentes transversal e longitudinal do vento, a velocidade sustentada, a densidade do ar, o coeficiente de arrasto e o ângulo de incidência sobre a estrutura. Os esforços gerados são calculados pelas equações definidas na recomendação da ROM 2.0-11 (2012), como mostrado pelas equações a seguir aplicadas na Figura 1.

$$\phi(\alpha) = \arctg[(A_{V,L}/A_{V,T}) \cdot \text{tg } \alpha] \quad (1)$$

$$R_V(\alpha) = \frac{\rho_{ar}}{2} \cdot V_k^2 \cdot \frac{C_{DV,L}(\alpha) \cdot A_{V,T} \cdot \cos^2 \alpha + C_{DV,T}(\alpha) \cdot A_{V,L} \cdot \text{sen}^2 \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2)$$

$$F_{V,L}(\alpha) = R_V(\alpha) \cdot \cos \phi \quad (3)$$

$$F_{V,T}(\alpha) = R_V(\alpha) \cdot \text{sen } \phi \quad (4)$$

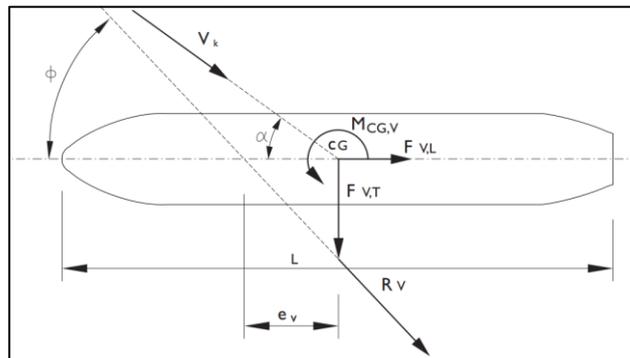


Figura 1 – Esforços atuantes na embarcação causados pelo vento (ROM 2.0-11, 2012).

A força da corrente é calculada ao se considerar a área de obstrução submersa, a velocidade da corrente, a densidade da água e os coeficientes de arrasto. A metodologia do cálculo leva em conta fatores como a relação entre profundidade e calado, proporcionando uma análise completa das forças atuantes na estrutura. Os esforços longitudinal e transversal devido à pressão da corrente são calculados pelas equações a seguir (ROM 2.0-11, 2012).

$$\phi(\alpha) = \arctg[(A_{C,L}/A_{C,T}) \cdot \text{tg } \alpha] \quad (5)$$

$$R_C(\alpha) = \frac{\rho_a}{2} \cdot V_{C,t}^2 \cdot \frac{C_{DC,L}(\alpha) \cdot A_{C,T} \cdot \cos^2 \alpha + C_{DC,T}(\alpha) \cdot A_{C,L} \cdot \text{sen}^2 \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (6)$$

$$F_{C,L}(\alpha) = R_C(\alpha) \cdot \cos \phi \quad (7)$$

$$F_{C,T}(\alpha) = R_C(\alpha) \cdot \text{sen } \phi \quad (8)$$

Já as forças oriundas do atrito, surgem do contato entre a corrente de água e a superfície do píer e a metodologia para determinação dessas forças inclui o cálculo do número de *Reynolds* e o coeficiente de fricção, fundamentais para estimar os esforços resistivos. Esses cálculos permitem avaliar como o atrito lateral afeta e o comportamento do píer em diferentes condições de uso e podem ser calculadas pelas equações a seguir (ROM 2.0-11, 2012).

$$Re = \frac{V_{c,t} \cdot L_{pp} \cdot |\cos(\alpha)|}{\nu} \quad (5)$$

$$C_{fc} = \frac{0,075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2} \quad (6)$$

$$F_{C \text{ fricção},L}(\alpha) = \frac{\rho_w}{2} \cdot V_{c,t}^2 \cdot C_{fc} \cdot A_{fc,L} \cdot \cos^2(\alpha) \quad (7)$$

$$F_{C \text{ fricção},T}(\alpha) = \frac{\rho_w}{2} \cdot V_{c,t}^2 \cdot C_{fc} \cdot A_{fc,T} \cdot \sin^2(\alpha) \quad (8)$$

Cenários de solicitação

Nesta seção apresentam-se as combinações de ações atuantes em formas de cenários de solicitação, em que cada cenário apresenta uma particularidade que os difere dos demais, conforme a Tabela 1. Com isso, visa-se abranger todos os cenários possíveis de solicitações para definir o mais crítico, o qual deve ser utilizado para o comparativo de dados com os esforços obtidos via software nas etapas futuras do trabalho para velocidades de vento e corrente de 18,52 m/s e 3,09 m/s, respectivamente.

Tabela 1 - Orientações adotadas para a incidência das ações ambientais atuantes sobre o píer.

Cenários	Orientações adotadas	
	Vento	Corrente
1	45°	90°
2	45°	135°
3	90°	225°
4	90°	90°

Outro fator importante é que para uma orientação padronizada, utiliza-se a mesma referência adotada pela ROM 2.0 11 (2012), ou seja, a proa do píer é considerada com o ângulo de incidência de 0°, conforme apresentado na Figura 2.

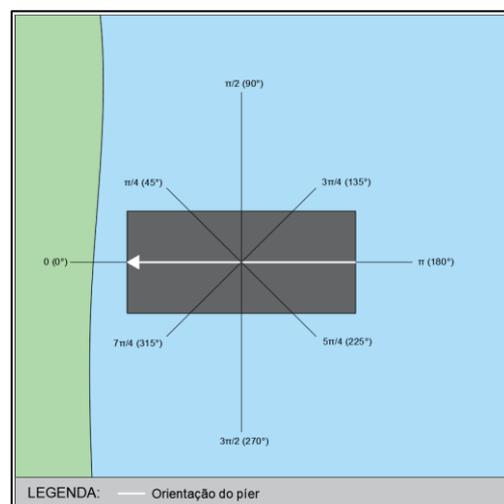


Figura 2 – Orientação adotada para incidência das ações ambientais sobre o píer.

Verificação Da Estabilidade Estática Do Píer Flutuante

Nessa seção, são realizadas duas análises no software *MaxSurf Stability* (Bentley, 2018): a primeira abordará a estabilidade estática na condição leve, enquanto a segunda analisará a condição carregada do píer flutuante. Os parâmetros obtidos em ambas as condições serão avaliados conforme os critérios da NORMAM N° 202 de 2024 (Marinha, 2024) para assegurar uma operação segura da estrutura do píer flutuante. A Figura 3 ilustra a geometria externa (A), e a seção transversal (B) para a estrutura do píer para a realização das análises de estabilidade.

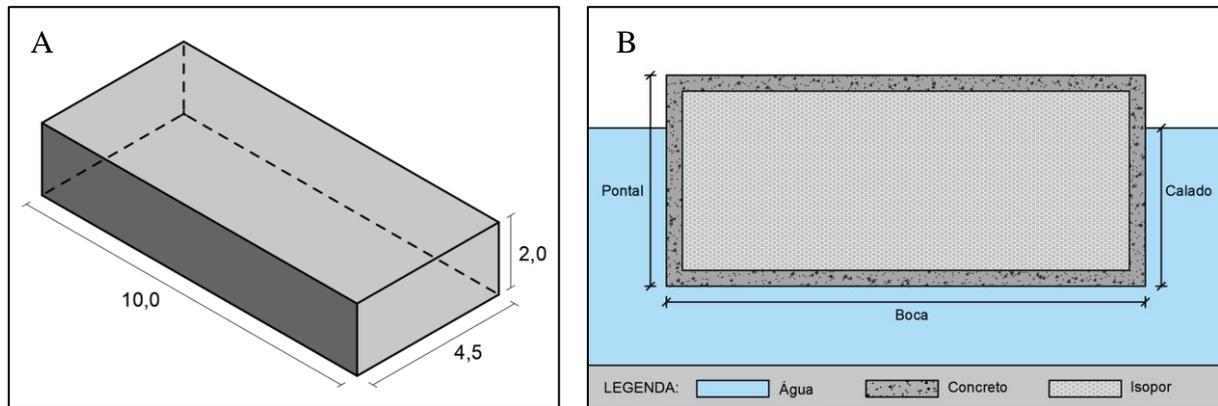


Figura 3 – Dimensões da geometria externa (A) e da seção transversal (B) do píer flutuante.

Para o cálculo da estabilidade estática, adota-se uma espessura de 15 cm para as paredes da viga caixão que formam o píer flutuante. Segundo Machado (2025), o píer apresenta para a condição de carregamento leve um calado de 1,317 m e 1,524 m para a condição de carregamento total.

Para a condição de peso leve, os dados são aplicados no programa com suas respectivas coordenadas com origem na ré do píer a meio calado, conforme ilustrado na Tabela 2. Já para a condição de peso total, tem-se os dados obtidos a partir da Tabela 3, isto é, o peso leve acrescido das sobrecargas (Cargas e empilhadeiras). Com isso, esses dados são aplicados no programa com suas respectivas coordenadas do ponto de aplicação, centro de massa de cada componente, isto é, o peso leve acrescido as sobrecargas (Cargas e empilhadeiras) com origem na ré do píer a meio calado.

Tabela 2 - Entrada de dados no Maxsurf Stability para a condição de peso leve.

Item	Quant.	Massa (t)	Massa total (t)	Alavanca longitudinal (m)	Alavanca transversal (m)	Alavanca vertical (m)
Concreto armado	1,00	51,855	51,855	5,000	0,000	1,000
Isopor de alta densidade	1,00	1,415	1,415	5,000	0,000	1,000
Outfit	1,00	6,000	6,000	5,000	0,000	1,000
Peso leve	-	-	59,270	5,000	0,000	1,000
Fluido (água doce)	-	-	-	-	-	1,000

Tabela 3 - Entrada de dados no Maxsurf Stability para a condição de peso total.

Item	Quantidade	Massa (t)	Massa total (t)	Alavanca longitudinal (m)	Alavanca transversal (m)	Alavanca vertical (m)
Peso leve	1,00	59,270	59,270	5,000	0,000	1,000
Carga (paletes + pessoas)	1,00	8,500	8,500	5,500	0,350	1,000
Empilhadeiras	1,00	0,800	0,800	8,000	2,000	0,700
Peso total	-	-	68,570	5,081	0,056	0,998
Fluido (água doce)	-	-	-	-	-	0,998

Ao realizar a rodada de cálculo no *MaxSurf Stability*, com base nos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, é possível gerar as curvas de estabilidade estática do píer para as duas condições de carregamento previstas, como está mostrado na Figura 4.

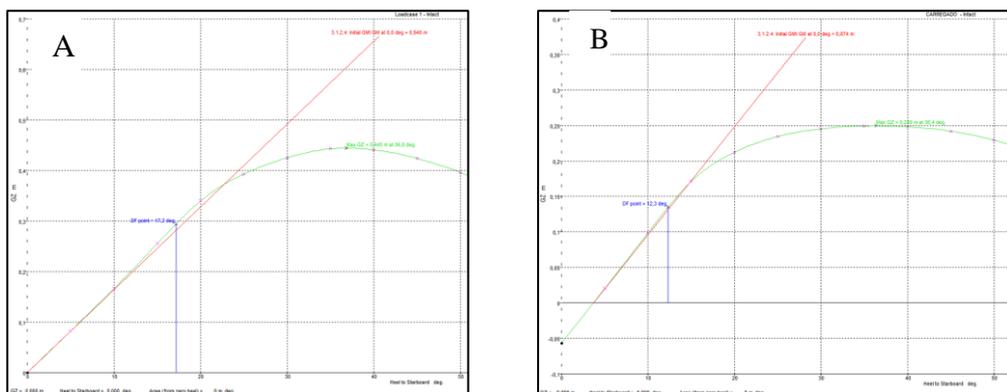


Figura 4 – Gráfico da curva de estabilidade do píer para a condição de peso leve (A) e peso total (B).

Os valores calculados para os critérios de estabilidade presentes na Figura 4 podem ser vistos nas Tabelas 4 e 5, as quais também apresentam a verificação dos critérios de estabilidade estática, para a condição de peso leve e peso total do píer flutuante, respectivamente.

Tabela 4 - Verificação dos critérios de estabilidade do píer no Maxsurf Stability para a condição de peso leve.

Critério	Valor mínimo (critério)	un.	Valor calculado	Condição	Margem (%)
GZ máximo entre 0° e 90°	0,20	m	0,45	Atende	122,50
Ângulo máximo de GZ	25,00	deg (°)	36,80	Atende	47,20
GMt inicial	0,35	m	0,94	Atende	168,57

Tabela 5 - Verificação dos critérios de estabilidade do píer no Maxsurf Stability para a condição de peso total.

Critério	Valor mínimo (critério)	un.	Valor calculado	Condição	Margem (%)
GZ máximo entre 0° e 90°	0,20	m	0,25	Atende	24,50
Ângulo máximo de GZ	25,00	deg (°)	36,4	Atende	45,46
GMt inicial	0,35	m	0,87	Atende	149,71

Aplicação

A aplicação da metodologia para a modelagem CFD (*Computational Fluid Dynamics*) no software *Ansys Fluent* requer que, inicialmente, a geometria do píer e do domínio computacional seja definida. Para isso, utiliza-se no caso deste estudo, o conceito de corpo duplo (*Double Body*), e com isso, a altura considerada para a geometria do píer é dobrada frente a geometria proposta, com as dimensões ajustadas para representar os diferentes cenários em função do calado e incidência de esforços.

O domínio computacional é configurado com proporções adequadas, proporcionais às dimensões do píer em suas respectivas direções, garantindo que as interações entre o píer e os fluidos sejam modeladas, de forma a se evitar efeitos de borda ou compressão do fluido ao longo de todo o domínio.

A geração da malha é realizada no *Ansys Meshing*, considerando as limitações da versão gratuita do software empregado, que restringe o número máximo de 1.048.576 elementos. O tamanho mínimo da aresta do elemento de análise foi definido como 0,85 m, que corresponde à menor dimensão para que a estrutura tenha o maior número de elementos na malha, que respeite a sua limitação quantitativa. Após a formação inicial da malha, ela é convertida para o formato poliédrico no *Fluent*, o que otimiza a aplicação do Método dos Volumes Finitos (VOF) nas superfícies de controle. Cada superfície do domínio é nomeada para que as condições de contorno sejam aplicadas corretamente, abrangendo as superfícies de entrada (*Inlet*), saída (*Outlet*), paredes laterais (*Wall*) e a estrutura do píer.

Na configuração do modelo numérico, adota-se o VOF com o modelo de turbulência *k- ω SST*, que apresenta características de aplicação mais precisas para capturar os fenômenos de turbulência na escala da estrutura analisada e afastada das bordas do domínio.

Com isso, pode-se inserir outras condições de contorno necessárias para simulação, sendo elas as fases dos fluidos a serem analisados, assim como a configuração da altura em relação a base do domínio computacional, a qual se deseja a borda superior da região de ar e de água. As condições de contorno também incluem a velocidade e direção dos fluidos na entrada, pressão ambiente na saída e condições de não deslizamento nas paredes do modelo.

Por fim, encerra-se a modelagem ao estabelecer o número máximo de interações a serem realizadas. No caso deste trabalho permitiu-se simulações de até 1.000 iterações, para que haja a convergência do modelo. Com isso, é possível a partir do *Ansys CFD Post* extrair os resultados numéricos dos esforços longitudinais e transversais atuantes sobre o píer, para que possam ser comparados com os valores encontrados com a ROM 2.0-11, a fim de verificar a conformidade dos resultados. A Figura 5 ilustra a interface gráfica do *Ansys CFD Post* com alguns dos resultados de comportamento hidrodinâmico da estrutura do píer flutuante.

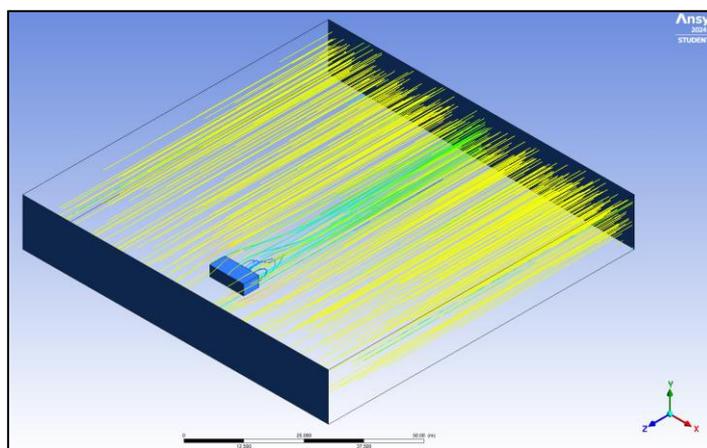


Figura 5 – O píer no Ansys CFD Post após sua modelagem partir do cenário 4 com esforços de corrente atuando sobre o píer estando carregado.

Ao concluir a rodada da modelagem CFD, deve-se analisar se os resultados encontrados respeitam os critérios de convergência previamente estabelecidos, com resíduos limitados a convergência na ordem de 1×10^{-3} para variáveis como continuidade, velocidades e frações volumétricas das fases dos fluidos. A Figura 6 mostra um exemplo de uma das verificações da convergência dos resíduos após uma rodada de simulação.

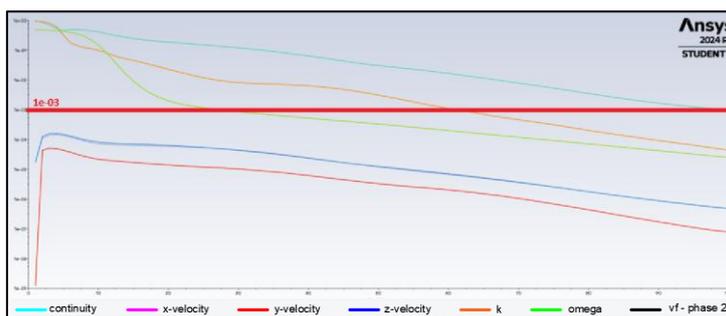


Figura 6 – Gráfico para acompanhamento dos resíduos da modelagem.

Outra verificação importante após a realização da modelagem CFD, é verificar se há a convergência da malha utilizada no modelo. Essa verificação consiste na análise de sensibilidade das malhas nos cenários mais críticos, como as condições de maior área de superfície submersa ou emersa. O critério a ser respeitado é que a diferença entre os resultados dos esforços calculados por meio de duas malhas com dimensões e quantidade de elementos similares, não pode apresentar uma variação superior a 5%. Caso a variação entre os dois valores calculados para um mesmo cenário de aplicação respeite o critério estabelecido, a qualidade da malha com base no refinamento adotado para a presente aplicação é aceitável para ser aplicada.

Tabela 6 - Verificação dos critérios de convergência da malha.

Cenários		Tamanho do elemento (m)	Nº de elementos da malha	Nº de nós da malha	Esforços Longitudinais (N)	Esforços Transversais (N)	Condição (variação ≤ 5%)
2	Vento	0,85	1.036.711	179.736,00	1.947,51	3.055,12	-
		0,86	1.006.745	174.617,00	1.940,73	3.011,75	-
	Variação	1,18%	2,89%	2,85%	0,35%	1,42%	Atende
2	Corrente	0,85	872.595	15.1227	-22.851,8	68.838,5	-
		0,86	844.617	14.6473	-22.390,8	68.630	-
	Variação	1,18%	3,21%	3,14%	2,02%	0,30%	Atende

Resultados

Os resultados oriundos das aplicações das metodologias por meio da ROM 2.0-11 (2012) e do *Ansys Fluent*, são mostrados nas Tabelas 7 e 8, que representam os esforços para os cenários onde o píer flutuante se encontra em condições de carregamento de peso leve e de peso total, respectivamente.

Tabela 7 - Resultados da ROM 2.0-11 (2012) e do Ansys Fluent para o píer em peso leve.

Cenários Peso Leve	Solicitações	VENTO		CORRENTE		ATRITO	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Forças calculadas ROM (N)	486,89	1081,97	0	73562,86	0	18,21
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	525,35	1221,98	-455,34	61107,5	-	-
2	Forças calculadas ROM (N)	486,89	1081,97	-19868,48	44152,19	-85,09	38,31
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	525,35	1221,98	-19596,25	57768,5	-	-
3	Forças calculadas ROM (N)	0	1440,71	-19868,48	-44152,1	-85,09	-38,31
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	0,3	1572,14	-19596,25	-57768,5	-	-
4	Forças calculadas ROM (N)	0	1440,71	0	73562,86	0	18,21
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	0,3	1572,14	-455,34	61107,5	-	-

Tabela 8 - Resultados da ROM 2.0-11 (2012) e do Ansys Fluent para o píer em peso total.

Cenários Peso total	Solicitações	VENTO		CORRENTE		ATRITO	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Forças calculadas ROM (N)	772,86	1799,76	0	91673,22	0	21,06
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	1947,51	3055,12	-34,36	73684,5	-	-
2	Forças calculadas ROM (N)	772,86	1799,76	-24428,28	54285,06	-98,47	44,31
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	1947,51	3055,12	-22851,75	68838,5	-	-
3	Forças calculadas ROM (N)	0	2624,08	-24428,28	-54285,06	-98,47	-44,31
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	-8,12	3170,96	-22851,75	-68838,5	-	-
4	Forças calculadas ROM (N)	0	2624,08	0	91673,22	0	21,06
	Forças calculadas <i>Ansys</i> (N)	-8,12	3170,96	-34,36	73684,5	-	-

Para o início da análise dos resultados obtidos por meio das duas metodologias empregadas, deve-se consultar a Tabela 9, que apresenta as variações percentuais absolutas entre as metodologias da ROM 2.0-11 (2012) e do *Ansys Fluent* para os cálculos dos esforços longitudinais e transversais para cada cenário proposto com base nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 9 - Variação percentual absoluta entre a ROM 2.0-11 (2012) e o Ansys Fluent, para o píer em ambas as condições de peso para o carregamento.

Cenários	Solicitações	VENTO		CORRENTE	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Peso leve	7%	11%	100%*	20%
2		7%	11%	1%	24%
3		100%*	8%	1%	24%
4		100%*	8%	100%*	20%
1	Peso total	60%	41%	100%	24%
2		60%	41%	7%	21%
3		100%*	17%	7%	21%
4		100%*	17%	100%*	24%

Ao analisar a condição de carregamento de peso leve do píer nos cenários de solicitação indicados na Tabela 9, nota-se que, para os esforços de vento com incidência a 45° nos cenários 1 e 2, ambas as metodologias apresentam intensidades de força semelhantes, com variações absolutas de 7% na transversal e 11% na longitudinal. Por outro lado, para os esforços das correntes nos cenários 2 e 3, com incidência de 135° e 225°, respectivamente, observa-se uma variação de 24% nos esforços transversais e de 1% nos esforços longitudinais, considerando valores absolutos.

Para os cenários de vento com incidência a 90°, verifica-se que os resultados, nos cenários 1 e 2, apresentam variações absolutas de até 8% nos esforços transversais. Entretanto, nos esforços longitudinais, constata-se uma variação de 100% entre os valores obtidos pelas duas metodologias. Ao analisar os esforços provenientes das correntes nos cenários 1 e 4, ambos com incidência a 90°, observa-se uma variação de 20% para os esforços transversais e de 100% para os longitudinais.

Já ao considerar a condição de carregamento de peso total do píer, aplicada aos cenários de solicitação conforme a Tabela 9, verifica-se que as ações de vento com incidência a 45° nos cenários 1 e 2 apresentam intensidades de força significativamente diferentes entre as metodologias utilizadas. A discrepância nos resultados absolutos corresponde a 60% para os esforços transversais e 41% para os longitudinais. Por outro lado, para as ações oriundas das correntes nos cenários 2 e 3, com incidência a 135° e 225°, observa-se uma variação de 21% nos esforços transversais e de 7% nos longitudinais, considerando os valores absolutos encontrados.

Para os cenários de vento com incidência a 90°, as metodologias apresentam discrepâncias nos resultados para os cenários 1 e 2, com variações de 17% nos esforços transversais e 100% nos esforços longitudinais. Analisando os esforços provenientes das correntes nos cenários 1 e 4, ambos também com incidência a 90°, verifica-se uma variação de 24% para os esforços transversais e, novamente, 100% para os esforços longitudinais.

Uma observação sobre os resultados apresentados é que, apesar de nos cenários 3 e 4 para vento e nos cenários 1 e 4 para corrente, independentemente da condição de carregamento aplicada ao píer, serem indicadas variações de 100% nos esforços longitudinais ao comparar com a ROM 2.0-11 (2012), tais variações correspondem a valores residuais, isto é, irrisórios, que podem ser desconsiderados. Isso ocorre devido à magnitude desses valores, que são pouco representativos em termos absolutos, considerando que um valor como 0,3 tende a zero em um cenário de forças com intensidade na ordem superior a 10^3 . Além disso, esses valores não possuem relevância significativa quando comparados à ordem de grandeza das forças longitudinais em relação às forças transversais encontradas.

A análise detalhada das variações de cada esforço possibilita identificar inconsistências nos resultados que, quando consideradas, podem distorcer os dados da realidade. Após realizar as devidas correções e ajustes necessários nos resultados, torna-se viável elaborar a tabela que apresenta os esforços totais atuantes sobre o píer, conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação dos esforços atuantes totais entre a ROM 2.0-11 (2012) e o Ansys Fluent, para o píer em ambas as condições de carregamento.

Cenários	Condição	PESO LEVE		PESO TOTAL	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Forças totais ROM (N)	486,89	74663,04	772,86	93494,04
	Forças totais Ansys (N)	525,35	62329,48	1947,51	76739,62
	Variação	7%	20%	60%	22%
2	Forças totais ROM (N)	-19466,68	45272,47	-23753,89	56129,13
	Forças totais Ansys (N)	-19070,90	58990,48	-20904,25	71893,62
	Variação	2%	23%	14%	22%
3	Forças totais ROM (N)	-19953,57	-42749,70	-24526,75	-51705,29
	Forças totais Ansys (N)	-19596,25	-56196,37	-22851,75	-65667,54
	Variação	2%	24%	7%	21%
4	Forças totais ROM (N)	0,00	75021,78	0,00	94318,36
	Forças totais Ansys (N)	0,00	62679,64	0,00	76855,46
	Variação	-	20%	-	23%

Diante das considerações realizadas, pode-se chegar a algumas conclusões a partir dos resultados obtidos. Em cenários onde a geometria da estrutura analisada apresenta superfícies simples, sem sobreposição de estruturas, e independentemente do ângulo de incidência dos esforços sobre a estrutura ser ortogonal ou não, ou seja, para os cenários com esforços de corrente e vento sem considerar a área de contribuição dos paletes (condição de carregamento leve), as discrepâncias variam entre 20% e 24%. Já para os cenários de vento que consideram a presença dos paletes (condição de carregamento total), a ROM 2.0-11 (2012) não inclui a área real dos paletes devido ao uso apenas de sua projeção no plano. Com isso, apenas metade da área influenciada pelo vento é contabilizada para os esforços transversais (4 paletes em vez de 8), e um quarto da área de contribuição é considerado para os esforços longitudinais (2 paletes de 8).

Outra observação feita é que a metodologia da ROM 2.0-11 (2012) utiliza valores prefixados, obtidos a partir de tabelas baseadas em ensaios de laboratório conduzidos sob condições específicas e para geometrias predominantemente com curvaturas definidas, como a parte inferior do casco de navios ou a proa. Essa metodologia, no entanto, não permite que a estrutura seja avaliada em sua totalidade, considerando apenas a projeção de sua seção longitudinal ou transversal nos respectivos planos. Tal abordagem pode resultar em alterações na representação da geometria real da estrutura, levando a resultados que, embora se aproximem da realidade até certo ponto, não refletem com precisão as condições reais de solicitação.

Também se observa que o Ansys Fluent considera efeitos hidrodinâmicos, como zonas de alta e baixa pressão, o que resulta em esforços adicionais de arrasto que não são contemplados pela ROM 2.0-11 (2012). Consequentemente, isso leva a um aumento nos esforços de resistência ao avanço. Esse efeito é amplificado em fluidos mais densos, apresentando discrepâncias maiores entre as duas metodologias na presença de água em comparação com líquidos menos densos. Esse fenômeno torna-se mais evidente ao analisar a geometria mais complexa dos paletes, especialmente se comparada à estrutura de um paralelepípedo submerso na água. No entanto, os efeitos hidrodinâmicos são sempre mais significativos quando a água é empregada em relação ao ar para uma mesma estrutura.

Por fim, ao analisar a Tabela 11, verifica-se que o maior esforço atuante em qualquer eixo, considerando as combinações dos diferentes cenários de solicitação para a Força de Tração de Projeto é de 94.318,36 N ou aproximadamente 94,32 kN para o cálculo do sistema de fundeio (MACHADO, 2025).

Tabela 11 - Valores máximos dos esforços solicitantes encontrados entre a ROM 2.0-11(2012) e o Ansys Fluent atuantes sobre o píer flutuante.

Forças	Condição	PESO LEVE		PESO TOTAL	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Forças máximas ROM (N)		-19953,57	75021,78	-24526,75	94318,36
Forças máximas Ansys (N)		-19596,25	62679,64	-22851,75	76855,46
Forças máximas em módulo (N)		19953,57	75021,78	24526,75	94318,36

Conclusões

O estudo proposto apresentou uma abordagem computacional para a determinação de esforços atuantes sobre píeres flutuantes modulares para dimensionamento dos seus sistemas de fundeio, visando atender às demandas por soluções viáveis e eficientes em regiões remotas. Utilizando ferramentas computacionais modernas e metodologias consagradas, o trabalho explora a aplicabilidade de técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e a análise crítica dos resultados para a obtenção de resultados robustos e aplicáveis.

As forças de vento e corrente foram avaliadas considerando os coeficientes de arrasto, geometria da estrutura e características da região. As cargas de atrito, embora frequentemente subestimadas, foram igualmente analisadas para entender sua influência no comportamento do sistema.

Os resultados obtidos das simulações foram comparados com os cálculos de recomendação proposto pela ROM 2.0-11 (2012), evidenciando uma diferença de aproximadamente 24% nos esforços transversais. Essa discrepância foi atribuída à capacidade do *Ansys Fluent* de simular geometrias complexas e superfícies refinadas sem a necessidade de valores tabelados para coeficientes de arrasto. As cargas longitudinais, no entanto, apresentaram variações mais discrepantes entre as duas metodologias, contudo, a origem para essa diferença pode ser compreendida, acarretando alguns ajustes para um cálculo percentual justo.

Apesar das limitações do uso de uma versão estudantil do software e com isso, estar sujeito a restrições de malha computacional, os resultados demonstraram a validade da metodologia proposta para o emprego de modelagem CFD. A análise numérica complementou as abordagens tradicionais, oferecendo uma visão detalhada e adaptável das interações entre o píer flutuante e os fluidos. A integração das duas metodologias forneceu uma base robusta para o pré-dimensionamento do módulo do píer, confirmando sua estabilidade hidrostática e capacidade de operar em condições adversas.

Concluindo, o estudo destaca a importância da integração entre a modelagem CFD e critérios metodológicos já conhecidos para dimensionar sistemas de fundeio de forma segura. A abordagem adotada demonstra a aplicabilidade da metodologia proposta para regiões remotas, permitindo o desenvolvimento de infraestrutura eficiente e sustentável.

Por fim, recomenda-se que futuros estudos utilizem versões comerciais completas do software e malhas mais refinadas para aumentar ainda mais a precisão das simulações. O uso de malhas dinâmicas também é sugerido para modelar o comportamento realista da estrutura em relação à sua flutuabilidade.

Referências

- ADAPTA BRASIL. Infraestrutura Portuária, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2019. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/detalhes-portos>. Acesso em 11/03/2024.
- ANSYS. Ansys Fluent Tutorial Guide, Ansys Inc.. 2018. Disponível em: <https://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf>. Acesso em 17/08/2024.
- BENTLEY. MaxSurf User Manual, Bentley Systems. 2018. Disponível em: <https://www.bentley.com/software/maxsurf/#data-sheet>. Acesso em 10/08/2024.
- MACHADO, P. Análise da Viabilidade de Abordagens Computacionais Para Dimensionamento de Sistemas de Fundeio, Programa de Projetos de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2025.
- MARINHA, NORMAM 202. Diretoria de Portos e Costas, Marinha do Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/content/normam-202>. Acesso em 05/09/2024.
- RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS: ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre. Tomos I e II. Ministerio de Fomento Puertos del Estado, España. 2012.