



REVISTA

Naval e Oceânica

<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rno>

OS IMPACTOS DE ONDAS EXTREMAS NA ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS

Impacts of Extreme Waves on the Stability of Ocean Structures

Rodrigo Balbino Rodrigues^a, Patrícia dos Santos Matta^b

Recebido em: 01 dez. 2024 | Aceito em: 10 jan. 2025

RESUMO

Ondas extremas, também conhecidas como ondas monstruosas ou ondas de tempestade, representam um desafio significativo para a engenharia de estruturas oceânicas, como plataformas offshore, turbinas eólicas marítimas, navios e quebra-mares. Essas ondas, caracterizadas por alturas substancialmente maiores do que a média da região, podem causar danos catastróficos, desde falhas estruturais até a perda completa da instalação. O estudo de seus impactos envolve compreender a interação hidrodinâmica entre a onda e a estrutura, levando em conta fatores como altura, comprimento de onda, e direção em relação ao objeto. Modelos numéricos avançados e testes experimentais são amplamente utilizados para prever os carregamentos extremos que essas ondas impõem às estruturas, permitindo a identificação de pontos críticos de falha. Além disso, as mudanças climáticas e o aumento da frequência de tempestades intensas potencializam a ocorrência de ondas extremas, tornando a análise de sua influência ainda mais relevante. Para mitigar os riscos, abordagens inovadoras incluem o uso de materiais de alta resistência, design otimizado para dissipação de energia e sistemas de monitoramento em tempo real para antecipar falhas estruturais. Essa pesquisa examina os principais efeitos de ondas extremas na estabilidade estrutural, os métodos de análise e simulação mais utilizados e as soluções práticas implementadas no campo da engenharia oceânica, fornecendo caminhos para o desenvolvimento de projetos mais resilientes.

Palavras-chave: Impactos. Ondas. Estruturas.

ABSTRACT

Extreme waves, also known as monster waves or storm waves, pose a significant challenge to the engineering of ocean structures such as offshore platforms, offshore wind turbines, ships and breakwaters. These waves, characterized by heights substantially greater than the average for the region, can cause catastrophic damage, ranging from structural failures to the complete loss of the facility. The study of its impacts involves understanding the hydrodynamic interaction between the wave and the structure, taking into account factors such as height, wavelength, and direction in relation to the object. Advanced numerical models and experimental tests are widely used to predict the extreme loads that these waves impose on structures, allowing the identification of critical points of failure. Furthermore, climate change

^aUniversidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil.

^bUniversidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil.

*Autor correspondente: Rodrigobalbinorodrigues2@gmail.com



and the increase in the frequency of intense storms increase the occurrence of extreme waves, making the analysis of their influence even more relevant. To mitigate risks, innovative approaches include the use of high-strength materials, optimized design for energy dissipation, and real-time monitoring systems to anticipate structural failures. This research examines the main effects of extreme waves on structural stability, the most used analysis and simulation methods, and practical solutions implemented in the field of ocean engineering, providing paths for developing more resilient projects.

1 INTRODUÇÃO

Ondas extremas são fenômenos raros e altamente destrutivos que apresentam desafios significativos para a engenharia oceânica. Caracterizadas por alturas superiores a duas vezes a média das ondas na região, essas ondas podem causar falhas catastróficas em estruturas marítimas, incluindo plataformas offshore, turbinas eólicas, navios e sistemas costeiros. O entendimento de sua formação, propagação e impacto é crucial para o desenvolvimento de projetos que garantam a segurança e funcionalidade de empreendimentos marítimos em cenários extremos (MDPI, 2021)

No Brasil, o Atlântico Sudoeste é uma região notável por sua vulnerabilidade a ciclones extratropicais, que frequentemente geram ondas de grande magnitude. Pesquisas realizadas no país destacam a relação entre a evolução desses sistemas ciclônicos e a ocorrência de ondas extremas, com atenção especial para eventos documentados na costa sul e sudeste. Estudos baseados em dados históricos e modelagem numérica, como os do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), mostram que eventos extremos, como os ciclones de maio de 2011, podem gerar ondas de até 12 metros, impactando diretamente a exploração de petróleo e gás na Bacia de Santos (SCIELO, 2013)

Esses fenômenos não se limitam a impactos diretos sobre estruturas. O aumento da frequência e intensidade de ciclones e tempestades, impulsionado pelas mudanças climáticas, eleva a relevância de estudos que combinam análises de valores extremos, modelagem hidrodinâmica e monitoramento em tempo real. A literatura internacional e nacional tem contribuído para a compreensão das interações entre ondas e estruturas, com propostas de abordagens práticas para reduzir os riscos, como o uso de materiais avançados, estruturas mais resilientes e estratégias de adaptação baseadas em condições ambientais regionais (MDPI, 2023)

Este trabalho tem como objetivo investigar os impactos de ondas extremas em estruturas oceânicas, com ênfase nas especificidades do contexto brasileiro. Esse esforço busca fornecer



subsídios para o desenvolvimento de infraestruturas mais seguras e sustentáveis em um cenário de desafios ambientais crescentes.

Figura 1 - Plataforma durante tempestade



Fonte: FAPERJ (2015)

2 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem metodológica abrangente e integrada, combinando revisão bibliográfica, análise de dados históricos, modelagem numérica avançada e estudos de casos práticos para avaliar os impactos de ondas extremas nas estruturas oceânicas, com foco no contexto brasileiro. O estudo se baseia em fontes nacionais e internacionais que abordam a interação entre eventos de ondas extremas e infraestruturas marítimas, sendo fundamentado em pesquisas anteriores de Diogo Fagundes Christovam, Mariana Manacorda e Pedro Velasquez, realizados na Universidade Federal Fluminense (UFF), além de outros estudos acadêmicos relevantes.

1. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica constituiu a base teórica para compreender as características e os efeitos das ondas extremas sobre as estruturas oceânicas. A revisão abrangeu diferentes aspectos, como:

1.1 Características das Ondas Extremas

A literatura revisada discutiu a formação e as condições que geram ondas extremas no contexto do Atlântico Sudoeste. O trabalho de Christovam (2018) forneceu uma análise detalhada das ondas associadas a ciclones extratropicais e subtropicais, identificando os padrões

climáticos que influenciam a magnitude das ondas nas regiões costeiras do Brasil. Além disso, a pesquisa de Manacorda (2020) sobre o comportamento hidrodinâmico de plataformas flutuantes sob condições de mar grosso forneceu insights sobre os mecanismos de interação entre essas ondas e as estruturas oceânicas, incluindo os efeitos das altas cargas dinâmicas e dos momentos de ressonância gerados pelas ondas extremas.

1.2. Impactos em Estruturas Oceânicas

Os estudos revisados também abordaram as falhas estruturais causadas por ondas extremas em diferentes tipos de infraestrutura, como plataformas de petróleo e gás, e a importância do dimensionamento de estruturas para resistir a tais eventos. A análise de Velasquez (2021) se concentrou em como as ondas extremas afetam a estabilidade de portos e canais de navegação, sugerindo melhorias no planejamento e execução de projetos de dragagem e construção de infraestrutura marinha.

1.3. Mitigação e Resiliência

A literatura da Scielo aborda soluções adaptativas para regiões vulneráveis, incluindo o aprimoramento do design estrutural e a adoção de materiais inovadores. Essas medidas são discutidas em conjunto com propostas apresentadas por Velasquez (2021), que enfatiza a importância de abordagens integradas para mitigar os efeitos das ondas extremas.

2. Análise de Dados Históricos

A análise de dados históricos desempenha um papel essencial na compreensão dos impactos das ondas extremas em estruturas oceânicas, especialmente no contexto brasileiro. Ela permite identificar padrões de ocorrência de eventos extremos, analisar suas frequências e intensidades ao longo do tempo, e avaliar os efeitos desses eventos sobre infraestruturas costeiras e marinhas. O uso de dados históricos proporciona uma base sólida para a construção de modelos preditivos, validação de hipóteses e elaboração de estratégias de mitigação. A seguir, detalha-se os métodos e fontes utilizadas na análise dos dados históricos, com base nos estudos realizados por autores como Christovam (2018), Manacorda (2020), Velasquez (2021), além de dados provenientes de programas nacionais e fontes acadêmicas como a SciELO e o IAG.

2.1. Fonte de Dados e Instrumentos Utilizados

A primeira etapa na análise de dados históricos consiste na coleta de informações detalhadas sobre eventos de ondas extremas ao longo da costa brasileira. Para esse estudo, foram utilizados dados obtidos pelo Programa Nacional de Boias (PNBOIA), que monitora as condições marítimas em tempo real, incluindo a altura das ondas, direção e períodos de pico.



Esses dados são coletados por boias instaladas em pontos estratégicos ao longo da costa, permitindo uma análise detalhada das condições oceânicas e sua relação com eventos climáticos extremos, como ciclones e tempestades subtropicais.

Além disso, a base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi utilizada para acessar informações sobre fenômenos climáticos, como a intensidade e a duração dos ciclones tropicais, que têm forte influência sobre a formação de ondas extremas. A combinação de dados oceanográficos com informações meteorológicas forneceu uma visão holística dos eventos analisados.

2.2. Seleção de Períodos de Estudo

O próximo passo envolveu a seleção de períodos representativos de eventos de ondas extremas, com base em dois critérios principais: a intensidade das ondas e a sua associação com fenômenos meteorológicos de grande escala, como os ciclones extratropicais e subtropicais. O estudo focou em eventos ocorridos durante a década de 2010, com ênfase nos ciclones de 2011 e 2016, que causaram danos significativos nas regiões costeiras sul e sudeste do Brasil.

A pesquisa de Christovam (2018), por exemplo, analisa esses eventos no contexto do Atlântico Sudoeste, com ênfase na interação das ondas geradas pelos ciclones com plataformas offshore e outras infraestruturas marinhas. A partir dessa análise, foram selecionados períodos em que as condições meteorológicas se alinharam com a ocorrência de ondas extremas que impactaram as estruturas marinhas, permitindo uma análise detalhada dos efeitos dessas ondas nas diferentes configurações de infraestrutura.

2.3. Análise Estatística e Modelagem de Valores Extremos

A análise estatística foi fundamental para quantificar os riscos associados às ondas extremas, considerando sua frequência e intensidade. Utilizou-se a análise de valores extremo para estimar a probabilidade de ocorrência de ondas de grandes dimensões em determinados períodos. Essa abordagem é crucial para entender a recorrência desses eventos e, a partir disso, prever cenários futuros. A análise de valores extremos permite classificar as ondas em categorias, com base na sua altura, duração e poder de dissipação, facilitando a comparação com as condições de projeto das infraestruturas oceânicas.

A pesquisa de Velasquez (2021), por exemplo, fez uso dessa técnica ao analisar dados de navegação e ondas para mapear as condições de mar grosso nas proximidades de portos e canais de navegação. A modelagem estatística desses dados fornece informações sobre o comportamento das ondas durante eventos extremos e como esses parâmetros afetam diretamente a operação de plataformas e portos, com ênfase na segurança estrutural e operacional.

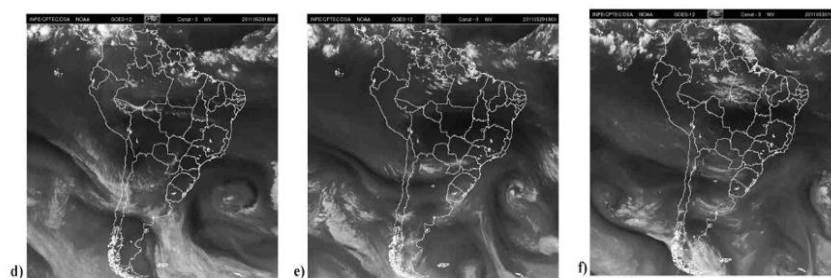


2.4. Identificação de Padrões e Tendências

A análise de dados históricos permitiu a identificação de padrões e tendências nos eventos de ondas extremas e sua relação com mudanças climáticas e variabilidades sazonais. De acordo com Manacorda (2020), as ondas geradas por ciclones extratropicais e subtropicais no Atlântico Sul apresentam características específicas, como a direção predominante das ondas e a duração dos períodos de mar grosso, que variam de acordo com a estação do ano e a intensidade dos fenômenos meteorológicos. Esses padrões são cruciais para a previsão de eventos extremos e para a elaboração de políticas de mitigação.

A análise também revelou a importância de monitorar a variabilidade climática de longo prazo, que pode alterar a intensidade e a frequência de ondas extremas, especialmente com o agravamento das mudanças climáticas. A comparação de eventos passados com as tendências atuais permite estimar a probabilidade de eventos futuros e prever os impactos para as infraestruturas marítimas

Figura 2 - Demonstração da formação do deslocamento de um ciclone no litoral



Figuras 2 - Imagens do satélite GOES-12 no canal vapor d'água para as 18:00Z dos dias 25 (a), 26 (b), 27 (c), 28 (d), 29 (e) e 30 (f) de Maio de 2011, evidenciando o deslocamento anômalo do ciclone, com maior aproximação da costa no dia 29. Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

Fonte: Scielo. 2013

2.5. Validação dos Resultados com Estudos de Caso

A validação dos resultados obtidos na análise de dados históricos foi realizada por meio de comparações com estudos de caso específicos, que documentam o impacto de ondas extremas em infraestruturas costeiras e marinhas. Com base nas pesquisas de Velasquez (2021), que estudou o impacto das ondas em portos e canais de navegação, e em trabalhos de Christovam (2018), que abordam plataformas offshore, foi possível confrontar as previsões feitas com os danos reais observados durante os eventos de 2011 e 2016.

Esses estudos de caso foram fundamentais para validar as simulações de modelos hidrodinâmicos e de elementos finitos, fornecendo uma base prática para entender a realidade das condições extremas e suas consequências sobre as estruturas oceânicas. A comparação entre os dados históricos e os resultados das simulações computacionais possibilitou ajustes nos modelos, melhorando a precisão das previsões para futuras ocorrências.

3. Modelagem Numérica e Simulações Computacionais

A modelagem numérica e as simulações computacionais são componentes essenciais deste estudo, permitindo uma análise detalhada do comportamento das ondas extremas e suas interações com diferentes tipos de estruturas oceânicas. As simulações fornecem uma visão precisa das condições extremas que poderiam ser difíceis de observar diretamente em campo, além de possibilitar a avaliação de cenários diversos sob diferentes condições meteorológicas e marítimas. Esta etapa da metodologia foi baseada em modelos hidrodinâmicos e de elementos finitos, fundamentados tanto em dados históricos como nas investigações realizadas em diferentes estudos acadêmicos e artigos de referência.

3.1. Modelagem Hidrodinâmica:

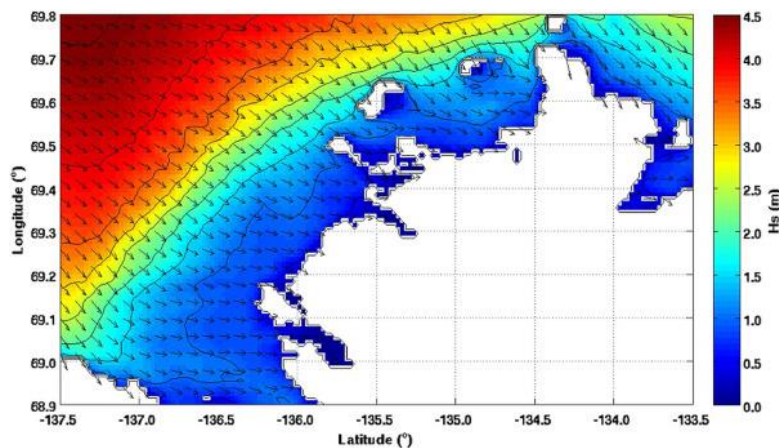
A modelagem hidrodinâmica constitui a base para simular a propagação e a dissipação de energia das ondas em condições extremas, sendo fundamental para o entendimento do impacto dessas ondas em estruturas fixas e flutuantes. A partir dos estudos de Christovam (2018) e Manacorda (2020), foi adotado o modelo **SWAN** (*Simulating Waves Nearshore*), uma ferramenta amplamente utilizada para simular as ondas em regiões costeiras e estuarinas. O modelo SWAN permite calcular as características das ondas, como altura significativa, direção e período, e como esses parâmetros são afetados por variáveis meteorológicas, como a velocidade do vento e a pressão atmosférica, condições que variam significativamente em eventos de ondas extremas.

Essas simulações podem ser ajustadas para refletir diferentes cenários de ciclones extratropicais e subtropicais, como os identificados na pesquisa de Christovam (2018), que descreve o comportamento das ondas geradas por esses sistemas climáticos nas regiões costeiras do Brasil. O modelo leva em conta a interação das ondas com a plataforma continental, o que é crucial para a avaliação da dinâmica das ondas perto da costa e o impacto nas estruturas marinhas. Complementarmente, a pesquisa de Velasquez (2021) demonstrou a importância de ajustar esses modelos para as particularidades locais, como a profundidade e a topografia do fundo marinho, a fim de refletir as condições reais do litoral brasileiro.

A utilização de modelos de propagação de ondas como o SWAN, aliados a dados coletados por boias e sensores ambientais (como o PNBOIA), permite que o comportamento das ondas em condições extremas seja projetado com maior precisão, oferecendo uma base confiável para os próximos passos da modelagem estrutural.

Figura 3 - Aplicação do modelo SWAN para simulação de ondas geradas por tempestades no Mar de Beaufort canadense





Fonte: Journal of Ocean Engineering and Science, 2020

3.2. Modelagem de Estruturas Oceânicas com Elementos Finitos (FEA)

Após a modelagem hidrodinâmica das ondas, a simulação do impacto dessas ondas nas estruturas oceânicas foi realizada por meio da modelagem de elementos finitos (FEA), amplamente utilizada para analisar a resposta dinâmica de sistemas complexos e multicomponentes, como plataformas offshore e infraestruturas portuárias. A abordagem de FEA permite a modelagem de uma estrutura tridimensional, considerando suas propriedades materiais, a geometria da estrutura e as interações dinâmicas com os efeitos das ondas.

Para as plataformas flutuantes, o uso de modelos FEA ajuda a simular as forças dinâmicas, incluindo os efeitos de ressonância das ondas, que podem resultar em oscilações amplificadas, aumentando a probabilidade de falhas estruturais. Manacorda (2020) detalhou como as plataformas flutuantes, especialmente as localizadas na Baía de Santos, podem ser vulneráveis a esse tipo de ressonância quando submetidas a condições de mar grosso. A análise computacional focou na interação das forças hidrodinâmicas com os sistemas de ancoragem e os sistemas de estabilização das plataformas, possibilitando a avaliação da sua resistência a essas forças extremas.

Além disso, a pesquisa de Velasquez (2021) incluiu a análise de canais de navegação, como aqueles presentes nos portos brasileiros, e o uso de FEA para prever a deformação das infraestruturas portuárias sob ondas extremas. Esse tipo de modelagem é essencial para entender como os molhes, as estruturas de quebra-mar e outras infraestruturas costeiras reagem ao impacto de ondas de grande magnitude. Ao integrar esses modelos, as simulações possibilitam uma análise preditiva das condições de stress nas estruturas e fornecem dados cruciais para a elaboração de estratégias de reforço estrutural e manutenção.

3.3. Validação de Modelos e Comparação com Dados Reais

A validação dos modelos computacionais foi um passo crucial para garantir que as simulações representassem com precisão as condições reais de ondas extremas e suas interações com as estruturas oceânicas. Para isso, foram utilizados dados empíricos provenientes de estudos anteriores, como os realizados por Christovam (2018) e Velasquez (2021), que detalham as condições observadas em eventos extremos, como os ciclones de 2011 e 2016, que afetaram a costa brasileira.

A comparação entre os resultados obtidos nas simulações e os dados observados foi realizada por meio de uma análise de erro estatístico, o que permitiu identificar e corrigir discrepâncias nas previsões. Esse processo de calibração assegurou que os modelos fossem representativos das condições reais de carga e impacto em cenários de ondas extremas. Além disso, a integração de dados de sensores oceanográficos e estações meteorológicas, conforme sugerido pela literatura do IAG e da Scielo, possibilitou a obtenção de um conjunto de dados mais robusto, abrangendo diferentes tipos de eventos climáticos e suas interações com a infraestrutura marinha.

3.4. Aplicação de Resultados em Cenários Reais

Com a modelagem validada, os resultados foram aplicados a cenários reais, como o impacto das ondas extremas nas plataformas da Bacia de Santos, uma área de alta produção de petróleo no Brasil. As simulações indicaram as zonas mais vulneráveis às forças das ondas, como áreas de maior pressão dinâmica nos pontos de ancoragem das plataformas. A partir dos resultados obtidos, foram propostas recomendações para melhorar o design das plataformas flutuantes, incluindo o uso de materiais mais resistentes e o aprimoramento dos sistemas de estabilização e ancoragem.

Além disso, os estudos de caso, como os portos de Paranaguá e Itajaí, possibilitaram a análise da interação entre as ondas extremas e as infraestruturas portuárias. Com o uso de FEA, foi possível identificar falhas estruturais potenciais, como a instabilidade de molhes e a erosão das margens dos canais de navegação durante eventos de mar grosso. Esses dados, combinados com as simulações hidrodinâmicas, oferecem uma base para desenvolver estratégias de adaptação e proteção para essas infraestruturas, prevenindo danos significativos.

4. Estudo de Casos

O estudo de casos é uma etapa essencial para validar os resultados obtidos a partir das análises de dados históricos e simulações numéricas. Ele permite entender os efeitos práticos



das ondas extremas em infraestruturas reais, considerando variáveis complexas que podem não ser totalmente capturadas por modelos teóricos. A realização de estudos de caso focados em diferentes tipos de infraestruturas oceânicas, como plataformas offshore, portos e canais de navegação, possibilita uma análise profunda e contextualizada, além de contribuir para a implementação de melhorias no design e nas operações dessas estruturas.

4.1. Impactos em Plataformas Offshore

As plataformas offshore, especialmente aquelas localizadas em áreas vulneráveis às ondas extremas, como na Bacia de Santos e outras regiões costeiras do Brasil, são frequentemente expostas a condições severas de mar grosso e tempestades. Estudo realizado por Christovam (2018) sobre a interação de ondas de grande altura com plataformas flutuantes fornece um ponto de partida para entender como essas estruturas reagem a eventos de ondas extremas.

Essas plataformas, que geralmente possuem sistemas de ancoragem e estabilização complexos, podem ser suscetíveis a danos estruturais em condições de ondas extremas, que exigem um projeto robusto e adaptável. A interação das ondas com as plataformas é particularmente desafiadora devido aos fenômenos dinâmicos gerados por forças combinadas de vento, corrente e a própria dinâmica das ondas. A pesquisa de Manacorda (2020), por exemplo, detalha a importância de modelos numéricos avançados para simular a resposta dessas plataformas a ondas de alta intensidade, ajudando a otimizar seus designs e aumentar sua resistência a impactos dinâmicos extremos.

Estudos de caso documentados, como o de Velasquez (2021), mostram que em eventos de ciclones subtropicais, como os observados no sul do Brasil em 2011, plataformas de petróleo e gás experimentaram movimentações significativas, o que comprometeu sua estabilidade e, em alguns casos, resultou em danos estruturais. O acompanhamento desses eventos ajudou a identificar os principais pontos de falha e os fatores de risco que mais influenciam a segurança das plataformas.

4.2. Impactos em Infraestruturas Portuárias

Além das plataformas offshore, os portos e canais de navegação também são vulneráveis às ondas extremas. O estudo de Velasquez (2021) enfoca a análise dos impactos das ondas extremas sobre os portos brasileiros, especialmente nas regiões sul e sudeste, que são frequentemente atingidas por ciclones e tempestades subtropicais. As infraestruturas portuárias, que incluem terminais de carga, cais e sistemas de ancoragem, devem ser projetadas para suportar as forças exercidas pelas ondas de grande altura e mar grosso.



A pesquisa de Christovam (2018) destaca a importância do monitoramento contínuo das condições marítimas para prever os impactos dessas ondas no comportamento dos navios e nas operações portuárias. Durante eventos extremos, como os ciclones de 2011, os portos do sul do Brasil experimentaram uma elevada dinâmica de ondas, o que resultou no aumento da necessidade de manutenção e no risco de falhas operacionais. As ondas fortes afetaram principalmente os canais de navegação, exigindo medidas de dragagem e reforço das infraestruturas para evitar obstruções e danos estruturais.

A utilização de dados históricos e modelos computacionais, como os de Manacorda (2020), tem sido essencial para entender as variáveis que afetam o comportamento das ondas em áreas costeiras e para prever os efeitos de tempestades extremas nas operações portuárias. Esses estudos mostram que, além da altura das ondas, fatores como a frequência e a direção das ondas também desempenham papéis cruciais no planejamento e na operação dos portos.

4.3. Impactos nas Estruturas de Navegação e Canais de Acesso

Outro foco importante no estudo de casos foi a análise dos impactos das ondas extremas em canais de acesso e estruturas de navegação. Velasquez (2021) e Manacorda (2020) discutem como os canais de navegação são vulneráveis à obstrução durante eventos de mar grosso, que alteram sua profundidade e aumentam os riscos para a segurança da navegação.

O caso do porto de São Francisco do Sul, que enfrentou impactos severos durante os ciclones de 2011, foi analisado para entender a relação entre o comportamento das ondas e os danos nas infraestruturas de navegação. Durante este evento, os canais de acesso ao porto sofreram modificações significativas em sua profundidade e perfil, o que dificultou a operação de embarcações e causou um impacto econômico considerável. O estudo também destacou a necessidade de manutenção e adaptação contínua das infraestruturas portuárias para lidar com esses impactos, especialmente considerando as mudanças climáticas que podem intensificar a frequência e a força das ondas extremas.

5. Integração dos Resultados e Propostas de Mitigação

A integração dos resultados obtidos a partir das análises de dados históricos, simulações numéricas e estudos de caso é uma etapa crucial para fornecer soluções práticas e viáveis que possam ser aplicadas para mitigar os impactos das ondas extremas sobre as estruturas oceânicas. Essa abordagem multidisciplinar permite não apenas uma melhor compreensão do comportamento das ondas e suas consequências, mas também a criação de estratégias de mitigação que sejam robustas e adaptativas às condições regionais e globais variáveis. A



integração é fundamental para transformar os conhecimentos teóricos em ações práticas que aumentem a segurança e a eficiência das infraestruturas marítimas.

5.1. Identificação de Padrões Críticos

A primeira etapa na integração dos resultados é a análise dos padrões críticos identificados durante o estudo. A combinação de dados históricos, modelagem numérica e estudos de caso permite observar os fatores que mais influenciam os danos nas infraestruturas oceânicas, como a altura e a frequência das ondas extremas, a intensidade das tempestades, a direção das ondas, a velocidade do vento e a interação dessas variáveis. Christovam (2018), Manacorda (2020) e Velasquez (2021) indicam que esses fatores, em conjunto, desempenham um papel essencial na determinação da vulnerabilidade das estruturas oceânicas, especialmente plataformas offshore e portos, que estão localizados em regiões mais suscetíveis a condições meteorológicas extremas.

Além disso, a análise das falhas observadas em estudos de caso, como os eventos de ciclones de 2011, proporciona informações valiosas sobre os pontos de fragilidade das estruturas. Velasquez (2021), por exemplo, discute como as ondas extremas podem afetar os canais de navegação, alterando sua profundidade e perfil e, assim, prejudicando a segurança e a operação dos portos. Com base nesses dados, é possível identificar os padrões críticos de ocorrência e comportamento dessas ondas, os quais são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de mitigação.

5.2. Propostas de Mitigação para Plataformas Offshore

As plataformas offshore, especialmente as que operam em áreas vulneráveis às ondas extremas, devem ser projetadas para resistir a forças dinâmicas de grande intensidade. A pesquisa de Christovam (2018) sugere que o aprimoramento no design dessas plataformas deve focar na resistência a cargas dinâmicas e nos sistemas de ancoragem, que devem ser mais robustos para suportar movimentos excessivos. A utilização de modelos de elementos finitos (FEA) para simular essas interações, como destacado por Manacorda (2020), é uma técnica eficaz para otimizar o design estrutural e prever o comportamento das plataformas em cenários de ondas extremas.

Além disso, a proposta de Velasquez (2021), que enfatiza a importância de ajustes no tempo de resposta das plataformas durante eventos de mar grosso, destaca a necessidade de incorporar sistemas de controle ativo para reduzir os efeitos das forças externas. As plataformas de petróleo e gás, por exemplo, poderiam se beneficiar do uso de sistemas de flutuação

adaptativa, que permitem uma resposta mais flexível aos movimentos do mar. Tais melhorias aumentariam a segurança e reduziram o risco de falhas estruturais.

5.3. Conclusão das Propostas de Mitigação

A integração dos resultados das simulações numéricas, dados históricos e estudos de caso permite a criação de estratégias de mitigação mais precisas e adaptativas. As propostas para plataformas offshore e portos abrangem desde melhorias no design estrutural até inovações em tecnologias de monitoramento e controle. Com a consideração dos impactos das mudanças climáticas, é possível desenvolver estratégias que garantam a resiliência das infraestruturas oceânicas em um cenário de crescente intensidade de fenômenos climáticos extremos.

Em suma, a integração dos resultados e a aplicação dessas propostas de mitigação são essenciais para garantir a segurança e a eficiência das infraestruturas oceânicas, contribuindo para a sustentabilidade e continuidade das operações marítimas em regiões vulneráveis a ondas extremas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos impactos das ondas extremas em estruturas oceânicas, com ênfase no contexto brasileiro, evidencia a complexidade e a importância do tema para a segurança e sustentabilidade das infraestruturas marítimas, como plataformas offshore e portos. Em última análise, a integração dos dados históricos, das simulações e das observações de campo permite a criação de um conjunto de práticas de mitigação mais robustas e adaptativas. O uso de tecnologias inovadoras, como sensores inteligentes e inteligência artificial, pode fornecer dados em tempo real que possibilitam respostas rápidas e mais precisas durante eventos extremos. Esse conhecimento, aliado à implementação de estratégias proativas, é crucial para garantir a segurança, a durabilidade e a sustentabilidade das infraestruturas oceânicas, protegendo assim a infraestrutura e os recursos naturais das regiões costeiras e offshore, particularmente no Brasil, que é fortemente afetado por eventos climáticos extremos no Atlântico Sudoeste. As descobertas deste estudo são vitais não só para o avanço do conhecimento científico, mas também para orientar engenheiros, profissionais da indústria e autoridades governamentais na adoção de medidas que assegurem a resiliência das estruturas marítimas frente a desafios ambientais cada vez mais complexos.



REFERÊNCIAS

- Christovam, D. F. (2018). Análise de impactos das ondas extremas nas estruturas oceânicas. Universidade Federal Fluminense. Recuperado de <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/950/Diogo%20Fagundes%20Christovam.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Manacorda, M. (2020). Análise estrutural de plataformas flutuantes sob a ação de ondas extremas. Universidade Federal Fluminense. Recuperado de <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/11481/Projeto%20Final%20-%20Mariana%20Manacorda%20-%20Mariana%20Manacorda%20Da%20Costa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Velasquez, P. (2021). Impactos das ondas extremas sobre a infraestrutura portuária e canais de navegação. Universidade Federal Fluminense. Recuperado de https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/23345/TrabalhoConclusao_PedroVelasquez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ASME. (2023). Finding dangerous waves: Review of methods to assess wave risk for offshore structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 145(6), 060801. <https://asmedigitalcollection.asme.org/offshoremechanics/article/145/6/060801/1157525/Finding-Dangerous-Waves-Review-of-Methods-to>
- MDPI. (2021). Ocean wave prediction and analysis: Methods and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1052. <https://doi.org/10.3390/jmse9101052>
- MDPI. (2021). Numerical modeling of extreme wave events and their impacts on offshore structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse9121331>
- MDPI. (2023). Evaluation of wave-induced forces on coastal and offshore infrastructure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2087. <https://doi.org/10.3390/jmse11112087>
- SciELO. (2021). Análise de variáveis climáticas em eventos extremos no Atlântico Sudoeste. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 467-479. <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/zjgsy7PJJLTvhX4yx8mNHWM/?lang=pt>



IAG - Instituto de Astronomia. (2021). Impactos das condições climáticas extremas sobre as estruturas oceânicas: uma abordagem quantitativa. Repositório Institucional da UFF.

Recuperado de

https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/23345/TrabalhoConclusao_PedroVelasquez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MAR/Instituto de Pesquisa da Marinha. (2022). Estudo das condições meteorológicas e oceanográficas no Atlântico Sudoeste: impactos e estratégias. Recuperado de

<https://www.repositorio.mar.mil.br/handle/ripcmb/846483>

