Gestão:
Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

ANÁLISE DE RESPOSTA EXTREMA DE LONGO-PRAZO DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS SUJEITAS A MARES BIMODAIS

Queiroz, D. F. C. S. [1]; Sagrilo, L. V. S. [2]; Simão, M. L. [3]; Videiro, P. M. [4]
[1]Bolsista de DSC do PRH 07/UFRJ, curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro – RJ.
E-mail: diego.queiroz@coc.ufrj.br
[2]Docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.
E-mail: sagrilo@coc.ufrj.br

MOTIVAÇÃO

Estruturas marítimas são frequentemente submetidas a carregamentos ambientais variáveis no tempo, causados pelas ações de ondas, vento e corrente, e a estimativa da resposta extrema de longo-prazo constitui um aspecto importante de seu projeto para garantir a integridade estrutural. Dados meteorológicos e oceanográficos podem incluir estados de mar bimodais, caracterizados pela ação combinada de ondas com diferentes direções de incidência, isto é, ondas de mar local (*wind-sea*) e de *swell*. Devido à complexidade envolvida na representação dessas condições, simplificações de projeto são frequentemente adotadas para facilitar a análise. Entretanto, uma representação mais detalhada dos estados de mar pode aumentar a precisão da modelagem. Métodos de integração numérica completa de longo-prazo permitem a consideração direta de estados de mar bimodais, porém exigem um grande número de análises estruturais de curto-prazo para estimar adequadamente a resposta extrema de longo-prazo, o que pode tornar o procedimento computacionalmente ineficiente.

Um procedimento simplificado muito utilizado para estimativa de respostas de longo-prazo é o **Método do Contorno Ambiental**. Trata-se de uma técnica aproximada de menor custo computacional amplamente utilizada na indústria offshore. O método considera um conjunto de estados de mar com parâmetros ambientais característicos que representam eventos ambientais extremos. A resposta de longo-prazo é estabelecida a partir da condição crítica de curto-prazo do contorno ambiental associado ao período de retorno de interesse. Como é necessário apenas um número limitado de análises estruturais de curto-prazo, o esforço computacional é significativamente reduzido em comparação à Integração Completa de Longo-Prazo. Contudo, este método foi desenvolvido integralmente com base em estados de mar unimodais e, portanto, tem sido aplicado a problemas estruturais que envolvam ações de mares unimodais.

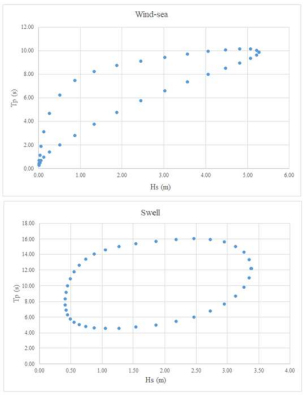


Figura 1 – Contornos ambientais centenários de mar local e *swell* em uma localização na costa brasileira.

OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e investigar uma metodologia simplificada baseada em contornos ambientais para a análise de respostas extremas de sistemas de ancoragem de estruturas marítimas flutuantes submetidos à ação combinada de ondas de mar local e *swell*. Assim, busca-se adaptar o Método do Contorno Ambiental para considerar diretamente estados de mar bimodais, de maneira a se propor uma alternativa eficiente e acurada para aplicação em projeto.

APLICAÇÃO NO SETOR DE PETRÓLEO E ENERGIA

A expansão das atividades offshore para águas cada vez mais profundas aumenta as exigências impostas às unidades flutuantes e aos seus sistemas de ancoragem, visto que os efeitos dinâmicos nos componentes estruturais são cada vez mais relevantes conforme a profundidade de operação aumenta. Nesse contexto, a correta estimativa da resposta extrema de longo-prazo é fundamental para garantir adequação do projeto estrutural, desempenho operacional e segurança. O Método do Contorno Ambiental é particularmente importante em etapas preliminares de projeto por se tratar de uma metodologia prática para a avaliação da resposta extrema de uma ampla gama de estruturas e alternativas de projeto. A metodologia proposta neste trabalho busca permitir a consideração direta de estados de mar compostos por ondas de mar local e de *swell*, ao estender a aplicação de contornos ambientais a estados de mar bimodais comumente presentes em dados meteoceanográficos. Desta forma, a utilização do procedimento proposto pode contribuir tanto para análises mais eficientes quanto para uma representação mais fidedigna das condições ambientais.

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos neste estudo são baseados em dois grupos de exemplos: um modelo teórico idealizado e um estudo de caso real correspondente a um FPSO com sistema de ancoragem do tipo *spread-moored*. Na metodologia proposta pontos selecionados do contorno ambiental de um tipo de onda são combinados com a condição ambiental associada à mediana da outra. As respostas obtidas pelo **Método do Contorno Ambiental adaptado** (RC) são comparadas às estimativas de referência calculadas por **Integração Completa de Longo-Prazo**, pelo método ISMCS (Simulação Monte Carlo com Amostragem por Importância), considerando duas formulações distintas para a integração de longo-prazo (R1 e R3). Para a comparação dos resultados, utiliza-se o **fator de resposta extrema** F_E, definido pela razão entre a resposta de referência e a resposta obtida pelo Método do Contorno Ambiental adaptado.

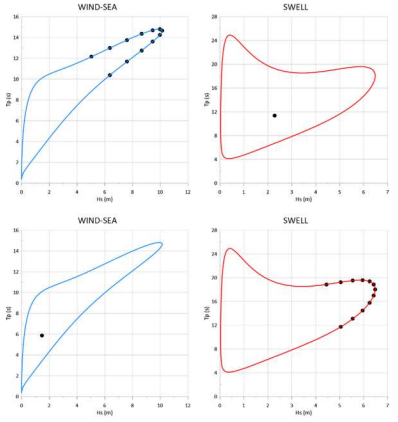


Figura 2 – Configurações adotadas para a metodologia de contornos ambientais.

Tabela 1 – Valores de média e desvio padrão dos fatores de resposta extrema F_E.

Locação de Interesse	$F_{E_{R1/RC}}$		$F_{E_{R3/RC}}$	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
A	1,18	0,09	1,06	0,04
B	1,21	0,10	1,10	0,04

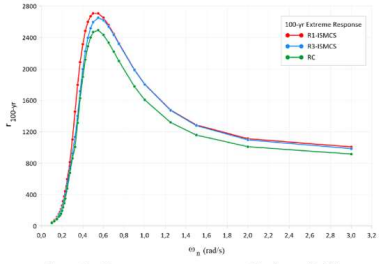


Figura 3 – Resposta extrema centenária (Locação B).

No modelo teórico idealizado, foram analisados 32 casos representativos de diferentes comportamentos estruturais, definidos por valores distintos de frequência natural em duas locações de interesse (LOI-A e LOI-B). A **Tabela 1** apresenta os resultados obtidos, em que 24 e 30 combinações de direções de ondas de mar local e *swell* foram consideradas nas análises para LOI-A e LOI-B, respectivamente. O método proposto demandou 576 e 720 análises para LOI-A e LOI-B, respectivamente, em comparação com 2.000 simulações utilizadas pelo método ISMCS, correspondendo a reduções de 71,2% e 64,0% no número de análises.

No estudo de caso real, foi analisado um FPSO *spread-moored* composto por 24 linhas de ancoragem, das quais quatro foram consideradas nas análises. Para essas linhas, os resultados obtidos são apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Valores de média e desvio padrão dos fatores de resposta extrema F_E.

Locação de Interesse	$F_{E_{R1/RC}}$		$F_{E_{R3/RC}}$	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
A	1,22	0,07	1,22	0,09
B	1,05	0,06	1,04	0,07

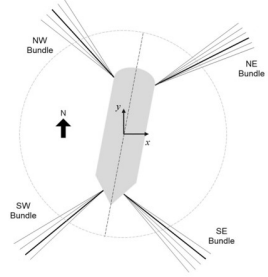


Figura 4 – Layout do FPSO com sistema de ancoragem do tipo *spread-moored*.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta apresenta resultados promissores para a representação direta de ondas de mar local e *swell* no Método do Contorno Ambiental, demonstrando redução significativa do esforço computacional em comparação à Integração Completa de Longo-Prazo. Os resultados preliminares indicam boa concordância das estimativas de resposta extrema com as referências adotadas. Estudos complementares são necessários para ampliação da aplicabilidade prática do procedimento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/17534-5.