



METODOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DE RESPOSTA EXTREMA DE PLATAFORMAS FIXAS

Thais Fernandes Ferreira da Silva

Fernando Jorge Mendes de Sousa

Luís Volnei Sudati Sagrilo

tfernande@gmail.com

fjmsousa@laceo.coppe.ufrj.br

sagrilo@coc.ufrj.br

Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ

LACEO - Cidade Universitária, CEP: 21941-596, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. Atualmente encontram-se disponíveis na literatura diversas metodologias para a obtenção da resposta extrema em estruturas offshore. A opção por qualquer uma delas depende de vários fatores, tais como o tempo disponível para o desenvolvimento do projeto, a complexidade da estrutura e o custo computacional envolvido. A principal norma de projeto de plataformas fixas, API-RP-2A (2000), apresenta duas metodologias para avaliação da resposta extrema, a Onda Regular Centenária e a Tempestade de Projeto. Já a NORSOK Standard N003 (2007) apresenta, além destas metodologias, o Contorno Ambiental e a Estatística de Longo Prazo da Resposta. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma análise comparativa dos resultados obtidos pelas diversas metodologias de análise de curto e longo prazo, para obtenção dos valores extremos mais prováveis de tensões combinadas em diferentes elementos estruturais da jaqueta de plataformas fixas. Neste trabalho foram realizadas análises no domínio do tempo de duas jaquetas em diferentes lâminas d'água, e os valores extremos de tensão combinada foram avaliados pelos quatro métodos citados anteriormente. Os resultados obtidos pelas metodologias Tempestade de Projeto e Contorno Ambiental são muito similares entre si, e sistematicamente menores que aqueles obtidos pela metodologia da Estatística de Longo Prazo da Resposta. Já a metodologia de Onda Regular fornece valores ora maiores ora menores que aqueles obtidos com a metodologia da Estatística de Longo Prazo da Resposta.

Palavras chave: Plataformas Fixas, Critérios de Projeto, Resposta extrema

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as plataformas fixas são sistemas estruturais muito encontrados em todas as bacias offshore, tanto em campos já consolidados, tais como PCH-1 (Plataforma Cherne-1) até plataformas recém-projetadas e instaladas, como MOP-1 (Módulo de Operação de PIGS), desenvolvida para servir de apoio ao gasoduto Sul-Norte Capixaba, que vai escoar a produção de gás do Pré-sal. Como não existe a previsão de desmobilização de plataformas fixas mais antigas nos próximos anos, o desenvolvimento de metodologias de análise mais refinadas, que permitam definir de forma mais rigorosa o estado destas plataformas, é de suma importância.

Ao longo dos últimos anos, a indústria tem dedicado grande esforço para aprimorar os critérios de projeto, cálculos e procedimentos visando melhorar a relação entre os investimentos econômicos exigidos e a segurança estrutural. O objetivo principal do projeto estrutural de uma plataforma fixa é atender alguns critérios funcionais e econômicos da plataforma que suporta o convés superior. É essencial que a estrutura tenha uma alta confiabilidade em relação a falhas estruturais, uma vez que vidas humanas e enormes investimentos econômicos estão em risco quando a estrutura está exposta às grandes forças de ondas, vento e correntes durante uma condição de tempestade ou condição extrema.

Dentre as diversas considerações de projeto para avaliação de condições extremas, a norma API-RP-2A (2000) define as principais práticas e recomendações de projeto de plataformas fixas que são usualmente utilizadas no Brasil. Esta norma apresenta duas metodologias de análise de resposta extrema, a da onda regular (denominada neste trabalho Onda Regular de Projeto) e a da onda irregular (denominada neste trabalho Tempestade de Projeto) – ambas consideram condições centenárias, e admitem que a resposta extrema da estrutura está associada à ocorrência da condição ambiental extrema, definida através de seu período de retorno.

Outra norma de projeto também utilizada nos projetos de plataformas fixas é a NORSOK Standard N-003 (2007), que também menciona as ações e efeitos de carregamento em estruturas offshore, apresentando as metodologias de Estatística de Longo Prazo e de Contorno Ambiental, mostrando o avanço e busca de novos procedimentos para a geração de resposta extrema nas estruturas.

Sendo assim, este trabalho busca realizar uma avaliação das metodologias de estimativa de resposta extrema disponíveis para os projetos de plataformas fixas.

2 METODOLOGIAS DE ANÁLISE

Existem na literatura várias metodologias disponíveis para a verificação de extremos de projetos de estruturas oceânicas na condição já instalada (in-situ). A utilização de uma ou outra metodologia depende da complexidade da estrutura e dos recursos computacionais disponíveis. Em geral, as análises de extremos de estruturas oceânicas são de caráter dinâmico, determinístico ou aleatório, e o principal objetivo é obter o valor extremo de um dado parâmetro de projeto.

As disposições de projeto para estas estruturas têm como objetivo comum garantir um nível de segurança aceito pela comunidade profissional. A aplicação prática destas se faz, normalmente, através do estabelecimento de valores para carregamentos ou efeitos de carregamento que tenham um período de retorno especificado, como, por exemplo, 100 anos, ou especificando uma probabilidade de não-excedência anual.

2.1 Onda regular de projeto

Para o projeto de estruturas offshore, onde os efeitos de carga a serem considerados são principalmente de natureza quasi-estática, a metodologia da Onda Regular de Projeto é utilizada para a geração da resposta extrema. Para as plataformas fixas, tem sido prática comum a realização da verificação do projeto para a chamada onda regular de 100 anos. É considerada a metodologia mais simplificada e foi a primeira a ser utilizada em projetos de estruturas oceânicas. Nesta metodologia a elevação da superfície do mar, que é de natureza aleatória, é substituída por uma onda determinística equivalente.

Os parâmetros que definem a onda regular são determinados a partir da estimativa da altura significativa de onda H_{s-100} , altura significativa de onda com período de recorrência de 100 anos. Esta estimativa pode ser feita através da estatística de ordem (Ang e Tang, 1984), uma vez que se disponha de uma função de distribuição de probabilidades de longo prazo da altura significativa da onda.

Em geral, as normas de projeto especificam como a onda de projeto deve ser escolhida caso estimativas mais precisas não estejam disponíveis; apresentam também recomendações para variação do período de onda T em intervalos estipulados.

No presente trabalho, a altura H_{100} da onda determinística equivalente é dada pela relação:

$$H_{100} = 1.86 \cdot H_{s-100} \quad (1)$$

O período desta onda foi considerado como sendo igual ao valor de T_p (período de pico do estado de mar) cuja função cumulativa condicionada de probabilidades $F_{T_p|H_s}(t|H_{s-100})$ assume o valor de 50%, i.e.,

$$F_{T_p|H_s}(t|H_{s-100}) = 0.50 \quad (2)$$

Esta metodologia gera séries temporais de resposta que são regulares (ou determinísticas) assim como a solicitação, e, sendo a série da resposta determinística, o valor extremo da resposta corresponde ao valor máximo observado na série temporal após a análise vencer a fase do transiente da resposta dinâmica.

2.2 Tempestade de projeto

Na metodologia da Tempestade de Projeto considera-se a natureza aleatória da elevação da superfície do mar (mar irregular). Utiliza-se uma análise aleatória com os parâmetros (H_s e T_p ou T_z) do estado de mar associado ao período de retorno pré-estabelecido, usualmente sendo o centenário. A representação das ondas aleatórias é feita através do espectro de onda.

A definição da condição ambiental extrema pode ser realizada de duas maneiras. A primeira corresponde à condição de H_{s-100} , variando-se os períodos de pico conforme a

distribuição deste condicionada a esta altura significativa centenária. A outra usa como condições ambientais de projeto aquelas condições de curto prazo definidas segundo a técnica do contorno ambiental extremo, que será apresentada no próximo item.

Para a metodologia da Tempestade de Projeto, o valor extremo mais provável de H_s , associado a um período de retorno de N anos, foi calculado através da seguinte relação:

$$F_{H_s}(H_{s-100}) = 1 - \frac{1}{2920 \cdot N} \quad (3)$$

onde 2920 é o número de estados de mar de 3 horas de duração (período de curto prazo assumido neste trabalho) e N é o período de retorno, igual a 100 anos. No presente trabalho, o valor de T_p associado ao valor extremo foi definido através da distribuição condicional deste parâmetro ao H_{s-100} , Eq. (2).

Como a resposta de uma estrutura oceânica a uma excitação de onda aleatória pode ser não linear, esta análise é feita no domínio do tempo, onde se obtém uma série temporal aleatória do parâmetro de resposta de interesse. Assim, um tratamento estatístico desta série deve ser realizado, de forma a obter um valor característico de projeto. Usualmente, as normas de projeto consideram o valor extremo mais provável de curto prazo (3-h) como sendo o valor característico de projeto.

2.3 Contorno Ambiental Centenário

Segundo a norma NORSOK Standard N003 (2007), uma formulação apropriada da metodologia Tempestade de Projeto é a utilização de combinação de alturas significativas de onda e períodos de pico do espectro localizados ao longo de linhas de contorno do plano H_s e T_p associadas a um período de retorno de 100 anos. Também de acordo com a NORSOK Standard N003 (2007), existem diferentes maneiras para determinação desta linha de contorno. No presente trabalho o contorno ambiental foi determinado pelo método de Winterstein et al. (1993), baseado no método de confiabilidade de primeira ordem FORM (First Order Reliability Method).

O método pode ser aplicado para uma locação no oceano se a função densidade de probabilidades conjunta de H_s e T_p estiver disponível. A partir desta distribuição, um contorno de valores H_s e T_p extremos é definido para uma dada probabilidade de excedência (associada a um período de retorno), e análises de curto prazo, para pontos localizados sobre este contorno, são realizadas de maneira similar à metodologia da Tempestade de Projeto. Também, como valor característico de projeto, toma-se o mais crítico entre todos os valores extremos mais prováveis associados aos pontos do contorno analisados.

2.4 Estatística de Longo Prazo

A metodologia de Estatística de Longo Prazo de Resposta consiste basicamente em obter as respostas de curto prazo para todos os estados de mar “possíveis” para uma dada locação de interesse e, depois, através da soma das contribuições individuais de cada estado de mar analisado, obter a resposta de longo prazo, possibilitando estimar valores extremos

mais prováveis e outros parâmetros estatísticos (Silva, 2014). Inicialmente é estimada a distribuição de probabilidades de longo prazo do pico da resposta considerada levando em conta todos os estados de mar “possíveis” que atuam sobre a estrutura analisada. Posteriormente, determina-se como valor característico de projeto o valor mais provável da resposta extrema para um período de retorno pré-definido, que usualmente é 100 anos. De acordo com Farnes (1990), a distribuição do longo prazo de resposta é dada numericamente por:

$$F_p(x) = \sum_{i=1}^{N_{H_s}} \sum_{j=1}^{N_{T_p}} \frac{\nu(h_i, t_j)}{\bar{\nu}} \cdot F_{p|H_s, T_p}(x | h_i, t_j) \cdot f_{H_s, T_p}(h_i, t_j) \Delta t \Delta h \quad (4)$$

onde:

$f_{H_s, T_p}(h, t)$ é a distribuição conjunta dos parâmetros ambientais de onda H_s e T_p (longo prazo);

$F_{p|H_s, T_p}(x | h, t)$ é a função cumulativa de probabilidades dos picos da resposta de curto prazo, i.e., distribuição condicionada a $H_s = h$ e $T_p = t$;

$\nu(h, t)$ é a frequência de picos da resposta de curto prazo;

$\bar{\nu}$ é a frequência média dos picos dada por:

$$\bar{\nu} = \sum_{i=1}^{N_{H_s}} \sum_{j=1}^{N_{T_p}} \nu(h_i, t_j) \cdot f_{H_s, T_p}(h_i, t_j) \Delta t \Delta h \quad (5)$$

onde N_{H_s} e N_{T_p} são, respectivamente, os números de pontos discretos para H_s e T_p adotados para representar apropriadamente o domínio de integração de acordo com os intervalos de integração Δh e Δt . Desta forma, tem-se uma malha de pontos N_{H_s} e N_{T_p} que representa o domínio de integração com os intervalos de integração Δh e Δt .

Evidentemente, executar a análise de todos os estados de mar “possíveis” representaria um custo computacional proibitivo. Para contornar este problema, neste trabalho foi adotada a mesma solução empregada por Videiro (1998), que executa análises aleatórias de curto prazo para um número pequeno de estados de mar por direção, formando uma malha de integração, e interpola os parâmetros da distribuição de curto prazo da resposta $F_{p|H_s, T_p}(x | h_i, t_j)$ para todos os estados de mar do domínio de integração a partir dos valores obtidos nas análises previamente executadas.

Por fim o valor extremo mais provável de longo prazo x_{lp} pode ser obtido resolvendo-se a seguinte equação (Ang e Tang, 1984):

$$F_p(x_{lp}) = 1 - \frac{1}{N_{lp}} \therefore x_{lp} = F_p^{-1} \left(1 - \frac{1}{N_{lp}} \right) \quad (6)$$

onde N_{lp} é o número esperado de picos da resposta no período de retorno considerado. Por exemplo, a resposta centenária é obtida com $N_{lp} = \bar{\nu} \cdot 10800 \cdot 2920 \cdot 100$.

É amplamente conhecido que o cálculo da resposta baseado na estatística de longo prazo fornece as estimativas mais apropriadas, embora seja claramente o método de análise mais custoso do ponto de vista computacional. De fato, a análise de longo prazo calcula o parâmetro de interesse para uma grande quantidade de estados de mar, incluindo aqueles estados que contribuem pouco ou nada para o resultado final (Chakrabarti, 2005).

A fim de determinar a contribuição de cada estado de mar para o valor extremo mais provável, possibilitando verificar quais os estados de mar mais importantes para a resposta dinâmica da estrutura, são calculados os coeficientes de participação de cada estado de mar, de acordo com a Equação (7) apresentada abaixo (Videiro, 1998).

$$C_{i,j} = \frac{\frac{\nu(h_i, t_j)}{\bar{\nu}} \cdot (1 - F_{p|H_s, T_p}(x | h_i, t_j)) \cdot f_{H_s, T_p}(h_i, t_j) \Delta t \Delta h}{Q} \quad (7)$$

onde $Q = 1 - F_p(x_{lp})$.

2.4.1 Procedimento para avaliação numérica da Estatística de Longo Prazo

Conforme já mencionado, a precisão dos resultados para a metodologia da Estatística do longo prazo é condicionada a discretização do domínio $H_s - T_p$, entretanto uma elevada discretização pode inviabilizar a análise, devido ao alto custo computacional (Silva, 2014).

Sendo assim no presente trabalho as análises foram realizadas para uma malha grosseira de pontos H_s e T_p com dimensão 5 x 27. Foram desenvolvidas análises dinâmicas no domínio do tempo, para cada um dos estados de mar de curto prazo desta malha, com duração de 10800 segundos. A partir da determinação da série temporal do parâmetro de resposta, foi ajustada uma distribuição de Weibull, sendo calculados os parâmetros da distribuição (α e λ), a frequência de picos da série da resposta e a média, obtendo-se os parâmetros de interesse para a malha mais grosseira.

O domínio da integração propriamente dito é composto por 1600 pontos, cujos parâmetros foram obtidos a partir da interpolação dos parâmetros das análises da malha grosseira de pontos, conforme apresentado na Figura 1.

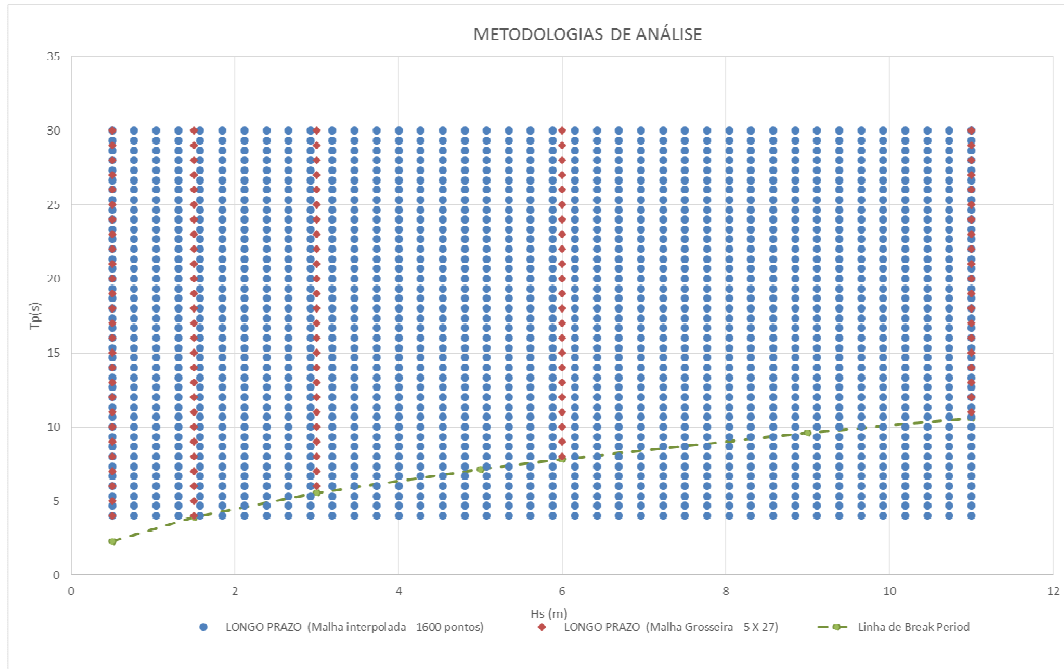


Figura 1. Malha de pontos interpolada – Estatística de Longo Prazo

Assim, a função distribuição da resposta condicionada aos estados de mar de curto prazo adotada, $F_{p|H_s, T_p}(x | h_i, t_j)$, corresponde a uma distribuição de Weibull, ajustada aos picos da série temporal normalizada da resposta (tensões combinadas), escrita da seguinte forma:

$$F_{p|H_s, T_p}(x | h_i, t_j) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \mu_x(h, t)}{\alpha(h, t)}\right)^{\lambda(h, t)}\right) \quad (8)$$

onde $\mu_x(h, t)$ corresponde à média da série temporal da resposta e $\lambda(h, t)$ e $\alpha(h, t)$ são os parâmetros de forma e de escala da distribuição ajustados pelo método dos momentos, de forma que a série tenha média e desvio padrão iguais aos correspondentes valores da amostra dos picos positivos da série temporal gerada para $H_s = h$ e $T_p = t$.

3 EXEMPLOS NUMÉRICOS

Neste trabalho serão apresentados dois exemplos de jaquetas de plataformas fixas, considerando diferentes lâminas d'água. Nos dois exemplos foram selecionados elementos estruturais das mesas, pernas e diagonais das jaquetas. Para cada um dos elementos foram geradas as séries temporais das forças axiais e momentos fletores por análises dinâmicas aleatórias, e foram calculadas as séries de tensões combinadas, onde se aplicou a estatística de extremos para a obtenção de valores extremos. Todas as séries temporais utilizadas neste trabalho foram de comprimento igual a 10800s após desprezar os efeitos de transientes iniciais. As jaquetas das plataformas analisadas são mostradas na Figura 2.

As tensões combinadas $\sigma_j(t)$ em 8 pontos da seção transversal de um elemento de seção circular ($j=1,2,\dots,8$), são dadas por

$$\sigma_j(t) = \frac{Fx(t)}{A} + \frac{My(t)}{I} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \cdot (j-1)\right) + \frac{Mz(t)}{I} \cdot R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} \cdot (j-1)\right) \quad (9)$$

onde $Fx(t)$, $My(t)$ e $Mz(t)$ correspondem as séries temporais de força axial e momentos fletores nos planos y e z, respectivamente; R , A e I são o raio externo, a área e o momento de inércia da seção transversal, respectivamente.

Para todas as metodologias avaliadas, o mesmo ponto na seção transversal do elemento foi avaliado de forma que a comparação dos valores característicos de projeto foi feita sempre para o mesmo ponto.

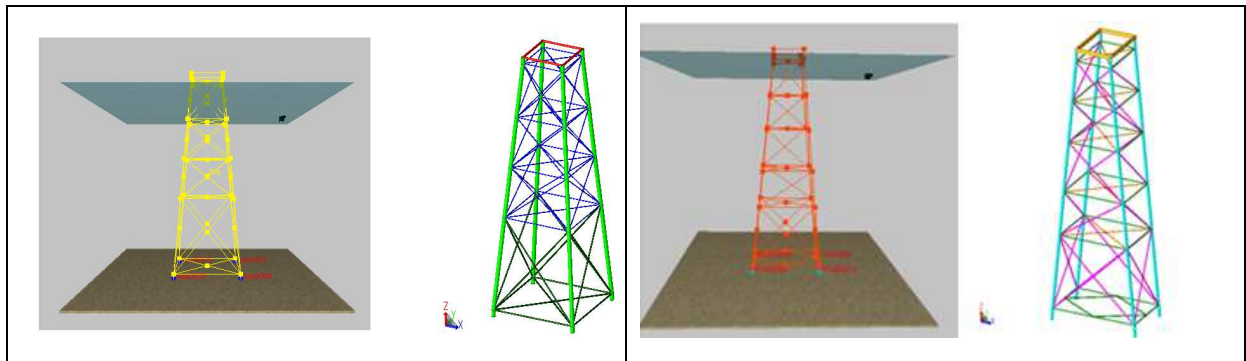


Figura 2. Modelos Numéricos: Jaqueta 1 (LDA=100m) e Jaqueta 2 (LDA=65m)

Em ambos os exemplos foram consideradas as metodologias de Onda Regular Centenária, Tempestade de Projeto, Contorno Ambiental Centenário; e de Estatística de longo prazo para as séries de tensões combinadas nos elementos.

Neste trabalho não foi modelada a separação entre *sea* e *swell* nem a direcionalidade das ondas, e para as análises dos exemplos investigados considerou-se uma função conjunta de densidade de probabilidades definida através de duas distribuições lognormais (Sagrilo *et al.*, 2005). Nesse caso a distribuição conjunta de probabilidades de H_s e T_p é modelada por:

$$f_{H_s, T_p}(h_i, t_j) = f_{H_s}(h) \cdot f_{T_p|H_s}(t|h) \quad (10)$$

onde $f_{H_s}(h)$ é função densidade de probabilidades das alturas significativa de ondas H_s e $f_{T_p|H_s}(t|h)$ é a função densidade de probabilidades de T_p condicionada a valores de H_s . Estas distribuições para o presente trabalho são dadas, respectivamente, por:

$$f_{H_s}(h) = \frac{1}{(h \cdot \xi_{H_s} \cdot \sqrt{2\pi})} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln(h) - \lambda_{H_s}}{\xi_{H_s}} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$f_{T_p|H_s}(t|h) = \frac{1}{(t \cdot \xi_{T_p}(h) \cdot \sqrt{2\pi})} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln(t) - \lambda_{T_p}(h)}{\xi_{T_p}(h)} \right)^2 \right] \quad (12)$$

onde os parâmetros são:

$$\xi_{H_s} = 0.333 \quad (13)$$

$$\lambda_{H_s} = 0.620$$

$$\xi_{T_p}(h) = 0.00638 + 0.285 \cdot e^{(-0.031 \cdot h^2)} \quad (14)$$

$$\lambda_{T_p}(h) = 1.827 + 0.181 \cdot h^{0.85}$$

A Figura 3 apresenta a função distribuição conjunta considerada no trabalho.

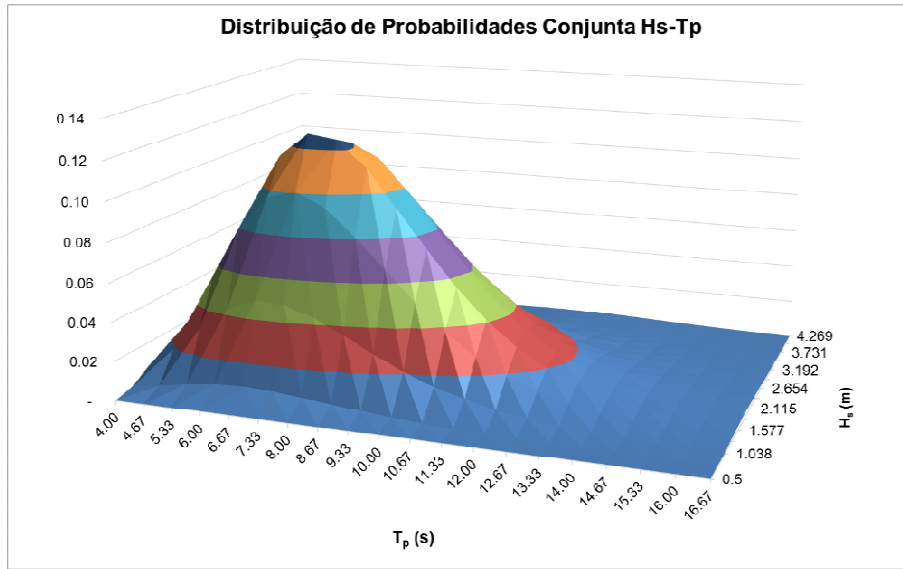


Figura 3. Distribuição conjunta de probabilidades de H_s e T_p

As funções cumulativas de probabilidades de H_s e T_p (condicionada a H_s) são dadas, respectivamente, por:

$$F_{H_s}(h) = \int_0^h f_{H_s}(h) dh \quad (15)$$

$$F_{T_p|H_s}(t|h) = \int_0^{tp} f_{T_p|H_s}(t|h) dt \quad (16)$$

No presente trabalho foi considerado o espectro de JONSWAP (Chakrabarti, 2005) para modelagem das ondas e não foram levados em conta nas análises os efeitos da corrente e do vento. Foi adotado também um critério de quebra de onda, ou seja, uma relação entre a altura significativa e o período de pico da onda que defina o limiar de quebra das ondas (Silva, 2014).

$$T_p = 3.2\sqrt{H_s} \quad (17)$$

As condições ambientais analisadas em cada uma das metodologias citadas anteriormente são apresentadas de forma resumida na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo das condições ambientais avaliadas nas metodologias

Metodologia	Condição Ambiental	
Onda Regular Centenária	Onda Regular incidindo a 45° (onda SW) $H_{100} = 15.5m$ e $T = 18.6s$	
Tempestade de Projeto	Estado de Mar incidindo a 45° (onda SW) - Espectro JONSWAP (Mar Irregular) $H_{s-100} = 8.3m$ e $T_p = 18.6s$	
Contorno Ambiental Centenário	Estado de Mar incidindo a 45° - Espectro JONSWAP (Mar Irregular)	
	$H_s (m)$	$T_p (s)$
	4.70	7.3
	5.70	10.0
	6.70	13.0
	7.50	15.6
	8.10	17.6
	8.30	18.6
	7.50	18.6
	6.70	18.5
	5.70	19.1
	4.70	20.7
	3.80	23.0
	3.00	25.5
	2.30	27.2
	1.70	27.4
	0.70	2.8
	0.60	3.2
	0.50	3.9
	0.40	4.8
	0.40	6.0

Tabela 1. Resumo das condições ambientais avaliadas nas metodologias

Metodologia	Condição Ambiental
Estatística de longo prazo	Estado de Mar incidindo a 45° (onda SW) - Espectro JONSWAP Malha 40 x 40 ($\Delta h = 0.269\text{m}$ e $\Delta t = 0.667\text{s}$) – 1600 pares $H_s - T_p$) H_s mínimo = 0.50 m e H_s máximo = 11 m T_p mínimo = 4 s e T_p máximo = 30 s

3.1 Jaqueta 1 – LDA = 100m

O primeiro exemplo corresponde a uma jaqueta simétrica de quatro pernas com aproximadamente 120m de altura, projetada para uma lâmina d'água de 100m. O convés da plataforma foi simulado através de elementos rígidos, recebendo uma carga de aproximadamente 13000 toneladas. O valor extremo da tensão combinada foi avaliado para 9 elementos da jaqueta: 3 elementos de pernas, 4 de mesas e 2 de diagonais. Os principais resultados das análises para todas as metodologias avaliadas encontram-se apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos de tensões combinadas mais críticas para os 9 elementos investigados para todas as metodologias investigadas. Nesta tabela apresenta-se o valor total da tensão mais crítica, valor este que inclui a parcela estática devido ao peso próprio e empuxo mais a parcela ambiental devido à parcela de tensão induzida pela ação da onda. A parcela estática é tomada como sendo o valor médio da série temporal.

Tabela 2. Tensões combinadas extremas nos elementos (MPa). Resumo dos resultados (parcela estática + parcela ambiental)

Elementos		Tensão combinada						
		(MPa)						
		(Parcela Estática + Parcela Ambiental)						
		Onda Regular de Projeto	Tempestade de Projeto	Contorno Ambiental	Longo Prazo	OR/TP	OR/CA	OR/LT
		(OR)	(TP)	(CA)	(LP)	(%)	(%)	(%)
PERNAS	JaQ-0085	114.7	116.1	116.2	118.9	99	99	96
	JaQ-0100	120.2	121.4	121.4	123.2	99	99	98
	JaQ-0285	115.2	115.2	115.2	115.3	100	100	100
MESAS	JaQ-0398	68.8	67.8	67.8	68.7	101	101	100
	JaQ-0635	44.1	42.5	42.8	44.3	104	103	99
	JaQ-0649	33.7	32.9	33.1	33.8	102	102	100
	JaQ-0515	64.8	60.9	61.4	64.3	106	105	101
DIAGONAIS	JaQ-01463	63.3	61.4	61.4	65.5	103	103	97
	JaQ-1616	80.6	71.6	71.6	77.1	113	113	105

A Tabela 3 apresenta um resumo somente considerando o valor da parcela ambiental da tensão extrema e a sua participação na resposta total.

Tabela 3. Parcela ambiental nas tensões combinadas extremas (MPa)

Elementos		Tensão combinada- Parcela ambiental (MPa)							
		Onda Regular de Projeto		Tempestade de Projeto		Contorno Ambiental		Longo Prazo	
PERNAS	Jaq-0085	11.1	(10%)* ¹	11.8	(10%)* ¹	11.82	(10%)* ¹	14.19	(12%)* ¹
	Jaq-0100	3.9	(3%)* ¹	5.7	(5%)* ¹	5.7	(5%)* ¹	6.53	(5%)* ¹
	Jaq-0285	0.9	(1%)* ¹	1	(1%)* ¹	1.01	(1%)* ¹	1.08	(1%)* ¹
MESAS	Jaq-0398	6.2	(9%)* ¹	5.2	(8%)* ¹	5.24	(8%)* ¹	6.08	(9%)* ¹
	Jaq-0635	10.6	(24%)* ¹	8.8	(21%)* ¹	9.07	(21%)* ¹	10.54	(24%)* ¹
	Jaq-0649	5	(15%)* ¹	4.1	(12%)* ¹	4.32	(13%)* ¹	4.96	(15%)* ¹
	Jaq-0515	19	(29%)* ¹	14.9	(24%)* ¹	15.4	(25%)* ¹	18.33	(28%)* ¹
DIAGONAIS	Jaq-01463	20.7	(33%)* ¹	19.4	(32%)* ¹	19.41	(32%)* ¹	23.34	(36%)* ¹
	Jaq-01616	24.5	(30%)* ¹	15.6	(22%)* ¹	15.62	(22%)* ¹	21.15	(27%)* ¹

*1 Percentual da parcela ambiental no valor final da Tensão combinada

A Tabela 4 apresenta uma comparação relativa dos valores da parcela ambiental obtidos pelas diferentes metodologias de análise de extremos.

Tabela 4. Tensões combinadas extremas nos elementos (MPa) resumo dos resultados (parcela ambiental)

Elementos		Tensão Combinada – Parcela ambiental (MPa)			
		OR/LT	TP/LT	CA/LT	LT/LT
		(%)	(%)	(%)	(%)
PERNAS	Jaq-0085	78.2	83.2	83.3	100.0
	Jaq-0100	59.7	87.3	87.3	100.0
	Jaq-0285	83.3	92.6	93.5	100.0
MESAS	Jaq-0398	102.0	85.5	86.2	100.0
	Jaq-0635	100.6	83.5	86.1	100.0
	Jaq-0649	100.8	82.7	87.1	100.0
	Jaq-0515	103.7	81.3	84.0	100.0
DIAGONAIS	Jaq-01463	88.7	83.1	83.2	100.0
	Jaq-01616	115.8	73.8	73.9	100.0

A Figura 4 apresenta na forma de isolinhas os fatores de participação dos estados de mar na tensão combinada centenária no elemento Jaq-0515 obtida através da Estatística de longo prazo da resposta. No presente trabalho é apresentado o gráfico de Fator de Participação para apenas o elemento Jaq-0515, entretanto para todos os elementos analisados foi verificado que os estados de mar que apresentam sempre maior participação nos valores extremos mais prováveis das tensões combinadas pela análise do longo prazo são sempre os próximos ao estado de mar centenário com maior H_s (Silva, 2014).

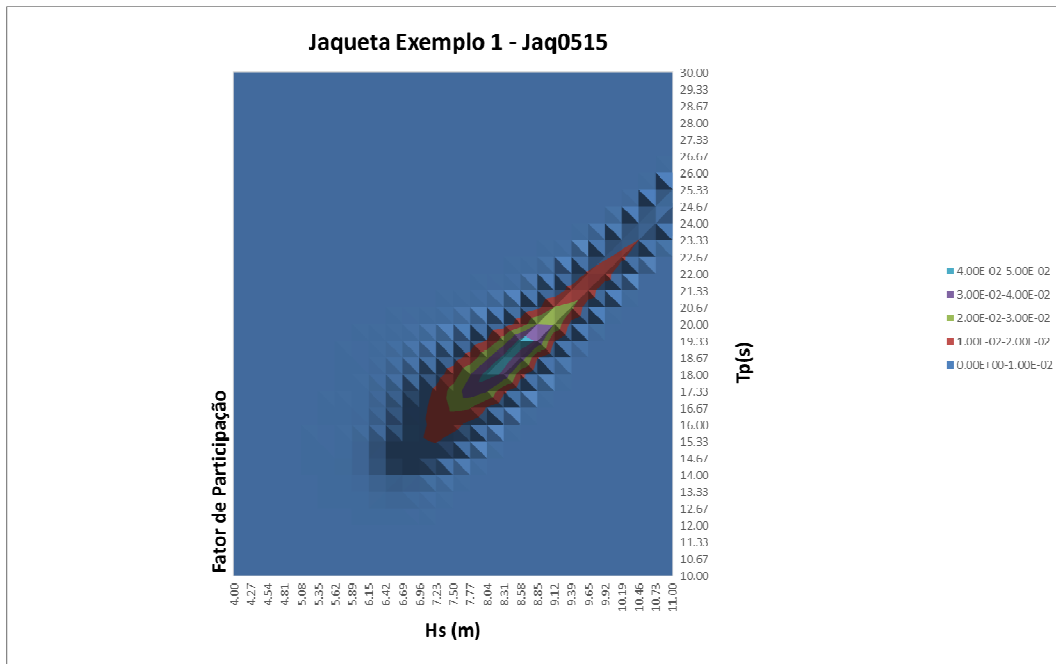


Figura 4. Fator de participação dos estados de mar na resposta extrema centenária: Elemento Jaq-0515

3.2 Jaqueta 2 – LDA = 65m

O segundo exemplo corresponde a uma jaqueta de quatro pernas com aproximadamente 71m de altura, projetada para uma lâmina d'água de 65m. O convés da plataforma foi simulado através de elementos rígidos, recebendo uma carga de aproximadamente 740 toneladas. O valor extremo da tensão combinada foi avaliado para 8 elementos da jaqueta: 2 elementos de pernas, 2 de mesas e 2 de diagonais das faces e 2 diagonais nas mesas. Os principais resultados das análises para todas as metodologias avaliadas encontram-se apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

A Tabela 5 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos para a tensão combinada extrema (parcela estática mais a parcela ambiental). A Tabela 6 apresenta um resumo somente considerando o valor da parcela ambiental da tensão extrema e a sua participação na resposta total e por fim a Tabela 7 apresenta uma comparação relativa dos valores da parcela ambiental obtidos pelas diferentes metodologias de análise de extremos.

Tabela 5. Tensões combinadas extremas nos elementos (MPa). Resumo dos resultados (parcela estática + parcela ambiental)

Elementos		Tensão combinada (MPa)						
		Parcela Estática + Ambiental						
		Onda Regular de Projeto	Tempestade de Projeto	Contorno Ambiental	Longo Prazo	OR/TP	OR/CA	OR/LT
		(OR)	(TP)	(CA)	(LP)	(%)	(%)	(%)
PERNAS	Plat00036	85.5	83.1	83.3	86.0	103%	103%	99%
	Plat00004	84.1	84.9	84.9	94.5	99%	99%	89%
MESAS	Plat00675	26.7	28.7	28.7	32.9	93%	93%	81%
	Plat00297	34.8	30.1	30.1	34.0	116%	116%	102%
DIAGONAIS MESA	Plat00717	23.5	22.0	22.5	25.1	107%	104%	94%
	Plat00893	31.7	30.7	31.0	32.3	103%	102%	98%
DIAGONAIS FACE	Plat01338	60.3	58.0	58.0	70.9	104%	104%	85%
	Plat00958	21.8	15.6	15.9	19.0	140%	137%	115%

Tabela 6. Parcela ambiental nas tensões combinadas extremas (MPa)

Elementos		Tensão combinada – Parcela ambiental (MPa)							
		Onda Regular de Projeto		Tempestade de Projeto		Contorno Ambiental		Longo Prazo	
PERNAS	Plat00036	14.0	16% ^(*)	11.6	14% ^(*)	11.7	14% ^(*)	14.2	17% ^(*)
	Plat00004	42.6	51% ^(*)	37.0	44% ^(*)	36.95	44% ^(*)	46.1	49% ^(*)
MESAS	Plat00675	16.4	61% ^(*)	17.7	62% ^(*)	17.73	62% ^(*)	22.0	67% ^(*)
	Plat00297	16.8	48% ^(*)	11.4	38% ^(*)	11.43	38% ^(*)	15.3	45% ^(*)
DIAGONAIS MESAS	Plat00717	12.8	54% ^(*)	11.7	53% ^(*)	12.27	54% ^(*)	14.8	59% ^(*)
	Plat00893	7.8	25% ^(*)	6.2	20% ^(*)	6.48	21% ^(*)	7.8	24% ^(*)
DIAGONAIS FACES	Plat01338	55.1	91% ^(*)	52.7	91% ^(*)	52.71	91% ^(*)	65.7	93% ^(*)
	Plat00958	18.0	82% ^(*)	11.8	76% ^(*)	12.14	76% ^(*)	15.0	79% ^(*)

*1 Percentual da parcela ambiental no valor final da Tensão combinada

Tabela 7. Tensões combinadas extremas nos elementos (MPa) resumo dos resultados (parcela ambiental)

Elementos		Tensão combinada – Parcela ambiental (MPa)			
		OR/LT	TP/LT	CA/LT	LT/LT
		(%)	(%)	(%)	(%)
PERNAS	Plat00036	98.0	81.5	82.2	100.0
	Plat00004	92.5	80.2	80.2	100.0
MESAS	Plat00675	74.6	80.5	80.5	100.0
	Plat00297	109.8	74.8	74.8	100.0
DIAGONAIS MESAS	Plat00717	86.3	79.4	83.0	100.0
	Plat00893	99.9	78.7	82.7	100.0
DIAGONAIS FACES	Plat01338	83.8	80.2	80.2	100.0
	Plat00958	119.9	78.6	81.0	100.0

3.3 Comentários sobre os resultados

Conforme pode ser verificado a partir dos resultados apresentados na Tabela 2, quando se observa o valor total da tensão extrema, todas as metodologias fornecem valores similares embora a Estatística de Longo Prazo da resposta forneça valores que são sistematicamente maiores que aqueles obtidos pelas metodologias da Tempestade de Projeto e Contorno Ambiental. Com relação à Onda Regular de Projeto, os valores fornecidos pela análise de longo prazo ora estão acima ora estão abaixo. Dois aspectos podem ser identificados como responsáveis por estes resultados: a dominância da parcela estática e a resposta extrema ambiental dominada pela região próxima do H_s centenário com maior altura significativa, conforme mostrado na Figura 4.

Este comportamento já era esperado, uma vez que as tensões extremas obtidas pela metodologia do contorno ambiental haviam sido definidas por este mesmo estado de mar ou outro bem próximo a este (Silva, 2014).

No exemplo da Jaqueta 1 foi verificado que a resposta é dominada pela parcela estática (carregamento de peso próprio e empuxo), vide Tabela 3. Conforme pode ser observado, a maior participação da parcela ambiental é em torno de 30% para uma das diagonais investigadas. Porém, quando são examinados somente os resultados da parcela ambiental (Tabela 3 e Tabela 4) pode-se notar que sistematicamente a resposta pela metodologia da Estatística de Longo Prazo da resposta é maior que aquela obtida pelas metodologias do Contorno Ambiental e da Tempestade de Projeto. Porém, como neste caso a maior região de contribuição para resposta extrema vem do H_s centenário com maior altura significativa as respostas das duas últimas metodologias são similares.

Em relação à metodologia de Onda Regular de Projeto, pelos resultados obtidos, não há como caracterizar uma tendência acerca dos resultados extremos por ela fornecidos.

A partir da observação dos resultados do exemplo da Jaqueta 1, os resultados do segundo modelo, uma jaqueta menor e esbelta, com uma carga de convés menor, e que fosse menos dominado pela parcela estática, foram analisados a fim de avaliar se o comportamento das tensões continua fornecendo maiores valores para estados de mar muito próximos do H_s , T_p centenário.

Este segundo modelo apresentou uma maior participação da parcela ambiental no valor extremo da tensão combinada, sendo alguns elementos predominantemente dominados por esta parcela. Entretanto, é possível verificar que mesmo com essa diferença de comportamento as observações feitas para exemplo anterior são praticamente as mesmas. No resultado final a diferença das metodologias não é significativa, porém observa-se que a metodologia de longo prazo da resposta obteve valores extremos mais prováveis da parcela ambiental para as tensões combinadas que são sistematicamente maiores que aqueles obtidos pelas metodologias Tempestade de Projeto e Contorno Ambiental Extremo. Como a maior contribuição para esta parcela neste exemplo também vem do H_s centenário com maior altura significativa, estas duas últimas metodologias fornecem valores similares. A metodologia da Onda Regular de Projeto apresentou o mesmo comportamento do exemplo anterior, ora fornecendo valores maiores ora menores que os resultados do longo prazo.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar as metodologias existentes na literatura para a obtenção dos valores extremos mais prováveis de curto e longo prazo para jaquetas de plataformas fixas. Os estudos de caso analisados corresponderam a dois modelos numéricos de jaquetas em lâminas d'água de 100m e 65m, onde o parâmetro de resposta investigado foi a tensão combinada em um ponto da seção transversal dos elementos tubulares da jaqueta.

Para ambos os modelos foi utilizada a mesma distribuição de probabilidades conjunta de H_s e T_p (Sagrilo et al., 2005) e não foi levado em conta nas análises o efeito da corrente e do vento. Esta distribuição conjunta de probabilidade dos parâmetros ambientais não representa uma função real, e sim uma expressão simplificada, calibrada de forma a gerar valores de altura significativa centenária de onda próximos aos valores estimados para a Bacia de Campos.

Para determinação das séries temporais dos esforços (e posterior transformação em tensões) foram feitas análises dinâmicas no domínio do tempo com duração de 10800s.

As metodologias de projeto avaliadas neste trabalho foram:

- Metodologias do curto Prazo:
 - o Onda Regular de Projeto (Resposta máxima para uma onda determinística de recorrência centenária);
 - o Tempestade de Projeto (Resposta máxima para um estado de mar de recorrência centenária);
 - o Contorno Ambiental Extremo (Resposta máxima para estados de mar localizados sobre o contorno ambiental centenário)
- Metodologia de Estatística de Longo Prazo da resposta extrema centenária (baseada na integração de longo prazo)

É importante ressaltar que as conclusões deste trabalho assumem apenas um caráter ilustrativo da utilização das metodologias propostas para estimativas de extremos. Assim sendo, as principais conclusões obtidas neste trabalho foram:

- 1) A partir da avaliação dos resultados obtidos nos dois exemplos, foi observado que o comportamento da parcela ambiental apresentou variação no valor final da tensão combinada extrema em vista do tipo de elemento estrutural da jaqueta;
- 2) Em geral, o resultado final da tensão extrema, considerando ambos os efeitos estático e ambiental, é similar entre todas as metodologias;
- 3) Com relação especificamente a parcela ambiental, as metodologias de Contorno Ambiental Extremo e de Tempestade de Projeto fornecem sistematicamente valores menores (75%-85%) que aqueles obtidos com a metodologia de Estatística de Longo Prazo da resposta;
- 4) As metodologias de Tempestade de Projeto e Contorno Ambiental Extremo apresentaram resultados muito similares entre si, pelo fato de que, para a maioria dos elementos, o estado de mar centenário com H_s de maior altura significativa, nos dois exemplos analisados, foi o que mais contribuiu para o valor extremo da tensão; Com relação à parcela ambiental, não é possível concluir sobre nenhuma

tendência a respeito da metodologia de Onda Regular de Projeto, pois ora esta fornece valores maiores ora menores que aqueles obtidos com a metodologia de Longo Prazo da Resposta

- 5) A metodologia do longo prazo é a que apresenta um maior esforço computacional e também exige uma atenção e conhecimento maiores para usá-la devido à sua complexidade.

REFERÊNCIAS

- Ang, A.H.S., Tang, W.H., 1984. Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II, John Wiley and Sons, New York, USA.
- API RP 2A, 2000. Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 21st ed., American Petroleum Institute, Washington, USA.
- Chakrabarti, S.K., 2005. Handbook of Offshore engineering. Volume 1 Elsevier, Plainfield, Illinois, USA
- Farnes, K.-A., 1990, Long-Term statics of response in non-linear Marine Structures, Tese de M.Sc., Norwegian Research Council, Noruega
- NORSOK Standard N-003, 2007. Actions and action effects, 2nd ed., Standards Norway, Strandveien, Norway.
- Sagrilo, L.V.S, Lima, E.C.P., Sousa, F.J.M, Dantas, C.M.S, Siqueira, M.Q., Torres, A.L.F.L., 2005. "Steel Lazy Wave Riser Design: API-RP-2RD and DNVOS- F201 Criteria". Proceedings of the OMAE Conference, OMAE05/67040, Halkidiki, Greece, June 12-17.
- Silva, T. F. F., 2014, Metodologias para estimativa de Resposta Extrema de Plataformas Fixas, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Videiro, P.M.,1998, Reliability Based Design of Marine Structures, Tese de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Winterstein, S. R., Ude, T. C., Cornell, C. A., Bjerager, P., and Haver, S., 1993, Environmental Contours for Extreme Response: Inverse FORM with Omission Factors, Proceedings of the International Conference on Structural Safety and Reliability, Innsbruck.