



**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL REMANESCENTE ATRAVÉS DE NOVA ABORDAGEM
PARA ANÁLISE DO DANO POR FADIGA EM RISERS FLEXÍVEIS**

Mateus Milanez

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Bianca de Carvalho Pinheiro
Ilson Paranhos Pasqualino

Rio de Janeiro
Setembro de 2018

AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL REMANESCENTE ATRAVÉS DE NOVA ABORDAGEM
PARA ANÁLISE DO DANO POR FADIGA EM RISERS FLEXÍVEIS

Mateus Milanez

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Bianca Pinheiro

Prof.ª Bianca de Carvalho Pinheiro, DSc.

Ilson Paranhos

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, DSc.

Breno Pinheiro Jacob

Prof. Breno Pinheiro Jacob, DSc.

Allan Carré de Oliveira

Dr. Allan Carré de Oliveira, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2018

Milanez, Mateus

Avaliação da vida útil remanescente através de nova abordagem para análise do dano por fadiga em *risers* flexíveis / Mateus Milanez. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIV, 81p.: il, 29,7cm.

Orientadores: Bianca de Carvalho Pinheiro

Ilson Paranhos Pasqualino

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 72-74

1. Fadiga. 2. *Risers* flexíveis. 3. Dados Meteoceanográficos. I. Pinheiro, Bianca de Carvalho *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

“A incapacidade de se fazer previsões em ambientes sujeitos ao Cisne Negro, aliada à ausência geral de consciência dessa condição, significa que certos profissionais, apesar de acreditarem ser experts, na verdade não o são.”.

Nassim Nicholas Taleb

(Ensaísta, estatístico, analista de risco e matemático líbano-americano, 1960 –)

AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS S.A., na figura da Unidade de Operações de Exploração e Produção do Espírito Santo (UO-ES), pela oportunidade oferecida e recursos disponibilizados que possibilitaram a minha participação nessa pós-graduação, em especial ao Carlos Roberto Neves de Souza, Cézar Augusto Monteiro Siqueira, Ricardo de Souza Cavati e Rômulo Góes Furtado.

Aos colegas de trabalho do CENPES, Allan Carré de Oliveira, Carlos Alberto Duarte de Lemos e Ludimar Lima de Aguiar pelo apoio e conhecimento compartilhado durante a elaboração deste trabalho.

À minha esposa, Luara Schulz Batista, e meus pais, Assis Tozzi Milanez e Liliane Maria Altoé Milanez, pela paciência, apoio e compreensão durante essa etapa de meu desenvolvimento.

Aos meus orientadores, Prof.^a Dr^a Bianca de Carvalho Pinheiro e Prof. Dr. Ilson Paranhos Pasqualino, pela importante contribuição, habilidade e suporte para a conclusão desta dissertação.

Agradeço, também, à banca Dr. Allan Carré de Oliveira, Prof. Dr. Breno Pinheiro Jacob, Prof. Dr. Ilson Paranhos Pasqualino e Prof.^a Dr^a Bianca de Carvalho Pinheiro pelos excelentes comentários durante a defesa dessa dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL REMANESCENTE ATRAVÉS DE NOVA ABORDAGEM
PARA ANÁLISE DO DANO POR FADIGA EM RISERS FLEXÍVEIS**

Mateus Milanez

Setembro/2018

Orientadores: Bianca de Carvalho Pinheiro
Ilson Paranhos Pasqualino

Programa: Engenharia Oceânica

O gerenciamento da integridade dos *risers* flexíveis deve prezar pela garantia da segurança operacional e manter a competência do retorno financeiro dos projetos instalados. Cumprir esse equilíbrio, para projetos de longo prazo em que a imprevisibilidade dos acontecimentos é elevada, impõe a utilização de conservadorismos para torná-lo cada vez mais robusto. Este trabalho analisa a divergência dos principais fatores que determinam a vida útil em fadiga de *risers* flexíveis instalados em uma UEP (Unidade Estacionária de Produção) quando comparados os dados previstos em projeto e os dados reais coletados. Foram consideradas informações referentes ao fluido transportado (pressão interna), calado da unidade e dados ambientais (vento, onda e corrente), além da simultaneidade na ocorrência dos eventos. Essa avaliação demonstra a importância de considerar os dados reais nas reavaliações de vida útil remanescente como forma de incorporar os eventos acontecidos e dispor de um resultado mais genuíno possível. Portanto, dispõe sobre a relação entre o mérito dos fatores de segurança definidos na fase de projeto como forma de contingência pela aleatoriedade das ocorrências.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

REMAINING LIFE ASSESSMENT THROUGH NEW APPROACH FOR ANALYSIS OF
FATIGUE IN FLEXIBLE RISERS

Mateus Milanez

September/2018

Advisors: Bianca de Carvalho Pinheiro
Ilson Paranhos Pasqualino

Department: Oceanic Engineering

Integrity Management of flexible *risers* should be valued for ensuring operational safety and maintaining the financial return of installed projects. Fulfill this balance, to long-term projects that is high unpredictability of events, it requires the use of conservatism to make it increasingly robust. This paper analyzes the divergence of the main factors determining the fatigue life of flexible *risers* installed in a SPU (Stationary Production Unit) when comparing the expected design data and the real data collected. Information regarding the fluid transported (internal pressure), draft of the unit and environmental data (wind, wave and current), as well as the simultaneity in the occurrence of the events were considered. This evaluation demonstrates the importance of considering the real data in the revaluations of the remaining useful life as a way to incorporate the happened events and have a most genuine possible result. Therefore, it deals with the relationship between the merit of the safety factors defined in the design phase as a form of contingency by chance occurrences.

Sumário

I.	Lista de figuras	x
II.	Siglas.....	xiv
1.	Introdução.....	1
1.1.	Considerações gerais	1
1.2.	Objetivo	6
1.3.	Importância do trabalho	7
1.4.	Estrutura do trabalho	8
2.	Conceitos gerais.....	10
2.1.	Sistema submarino de produção	10
2.2.	Dutos submarinos.....	10
2.2.1.	Dutos flexíveis	11
2.2.2.	<i>Risers</i> flexíveis	14
2.3.	Projeto de <i>risers</i> flexíveis.....	16
2.4.	Fadiga	18
2.4.1.	Permeação de gases.....	21
2.4.2.	Cálculo de vida útil em fadiga	23
2.5.	Gerenciamento da integridade e segurança operacional	28
3.	Metodologia	32
3.1.	Modelo numérico	34
3.2.	Dados	36
3.2.1.	Fluido interno.....	37
3.2.2.	Calado da unidade	40
3.2.3.	Dados ambientais (histórico oceanográfico)	42
3.2.4.	Eventos de simultaneidade.....	46
3.3.	Condições de projeto e eventos de simultaneidade	53
4.	Resultados.....	57
4.1.	Simulação – análise global	57

4.1.1.	Condição de projeto.....	61
4.1.2.	Dados reais	64
4.1.3.	Análise dos resultados.....	67
5.	Conclusões.....	70
5.1.	Próximos passos	71
6.	Referências	72
7.	Anexo	75

I.Lista de figuras

Figura 1: Fatores influenciadores do preço do petróleo	2
Figura 2: Projeção do preço do petróleo divulgada pela Petrobras.....	3
Figura 3: Cenários de projeção do preço do petróleo divulgada pelo EIA (<i>U.S. Energy Information Administration</i>)	3
Figura 4: Representação dos cenários de postergação e antecipação do descomissionamento	4
Figura 5: Exemplo de retorno de um empreendimento com limite econômico de produção.....	4
Figura 6: Evidências das mudanças climáticas	5
Figura 7: Máxima altura significativa de onda (Hs) anual e Hs centenária estimada	8
Figura 8: Esquemático de seções transversais típicas de <i>Bonded</i> (a) e <i>Unbonded</i> (b) <i>Flexible Pipe</i>	12
Figura 9: Duto Flexível – Principais camadas	13
Figura 10: Exemplos de configurações dinâmica comuns de <i>risers</i> flexíveis	15
Figura 11: Relação de dados para análise de vida útil em fadiga	17
Figura 12: Interação de várias ondas regulares formando um mar irregular	18
Figura 13: Curvas S-N para aço ASTM A490 em água do mar com proteção catódica	20
Figura 14: Esquemático de permeação de gases para o anular do duto.....	21
Figura 15: Influência da condição do anular na vida útil em fadiga	22
Figura 16: Exemplo de Análise Global	23
Figura 17: Principais regiões a serem consideradas na Análise Local	24
Figura 18: Etapas para Análise de Fadiga	26
Figura 19: Exemplos de técnicas de monitoramento para dutos flexíveis	30
Figura 20: Esquemático da instalação do sistema MODA.....	31
Figura 21: Formação da Matriz de Carregamento.....	33
Figura 22: Esquemático do riser em configuração de catenária livre com dados do modelo no ANFLEX	34
Figura 23: Esquemático do modelo utilizado no ANFLEX (FPSO, <i>riser</i> e carregamentos)	34
Figura 24: Esquemático da metodologia: uso de dados reais	36
Figura 25: Distribuição do histórico de pressão operacional	38
Figura 26: Distribuição discretizada do histórico de pressão operacional.....	39
Figura 27: Distribuição das medições do calado nas condições operacionais	41

Figura 28: Esquemático da Rosa dos Ventos	42
Figura 29: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de norte	43
Figura 30: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de nordeste	44
Figura 31: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de leste.....	44
Figura 32: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de sudeste.....	44
Figura 33: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de sul.....	45
Figura 34: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de sudoeste.....	45
Figura 35: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de oeste e noroeste	45
Figura 36: Ocorrência dos eventos de simultaneidade.....	49
Figura 37: Ocorrência dos eventos de simultaneidade – 500 mais recorrentes.....	50
Figura 38: Ocorrência dos eventos de simultaneidade – 200 mais recorrentes.....	50
Figura 39: Ocorrência dos eventos de simultaneidade – 100 mais recorrentes.....	50
Figura 40: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Onda – Tp.....	51
Figura 41: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Onda – Hs	51
Figura 42: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Onda – Sentido.....	52
Figura 43: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Corrente – Velocidade	52
Figura 44: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Corrente – Sentido.....	52
Figura 45: Definição dos Sentidos e Direções de incidência das condições ambientais na UEP	54
Figura 46: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda – Tp	54
Figura 47: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda - Hs	54
Figura 48: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda – Sentido	55
Figura 49: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda – Direção	55
Figura 50: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Corrente - Velocidade.....	55
Figura 51: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto –Corrente - Sentido	56

Figura 52: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Corrente – Direção	56
Figura 53: Probabilidade de ocorrência dos casos simulados para as condições de projeto	58
Figura 54: Probabilidade de ocorrência dos casos simulados para as condições reais	59
Figura 55: Força de Tração no elemento de topo do <i>riser</i> - Vários casos simulados ..	59
Figura 56: Exemplos da simulação – Força de Tração no elemento de topo do <i>riser</i> ..	60
Figura 57: Força axial ao longo do duto para um caso simulado	60
Figura 58: Momento gerado pela curvatura do duto.....	61
Figura 59: Tensão média e amplitude de tensão na armadura de tração no topo do <i>riser</i> para cada caso simulado - Projeto.....	62
Figura 60: Máxima tensão na armadura de tração para cada caso simulado - Projeto62	
Figura 61: Fator de Utilização de tensão da armadura de tração – Condição de projeto	63
Figura 62: Histograma do fator de variação de tensão (R) - Projeto.....	63
Figura 63: Ocorrência dos níveis de tensão para o cenário de projeto.....	64
Figura 64: Probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão – condição de projeto	64
Figura 65: Tensão média e amplitude de tensão na armadura de tração no topo do <i>riser</i> para cada caso simulado - Real.....	65
Figura 66: Máxima tensão na armadura de tração para cada caso simulado - Real ...	65
Figura 67: Fator de Utilização de tensão da armadura de tração – Condição real	65
Figura 68: Histograma do fator de variação de tensão (R) - Real	66
Figura 69: Ocorrência dos níveis de tensão para a condição real.....	66
Figura 70: Probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão – condição real.....	66
Figura 71: Resultado da influência dos níveis de pressão e níveis de calado para os casos reais	67
Figura 72: Comparativo da tensão na armadura de tração para a condição de projeto e real	67
Figura 73: Comparativo da probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão para a condição de projeto e real.....	68
Figura 74: Diagrama de fadiga obtido através de curvas S-N	69
Figura 75: Vento - Dados de Projeto – Velocidade x Direção.....	75
Figura 76: Vento - Dados Reais – Velocidade x Direção.....	76
Figura 77: Vento – Direção – Projeto x Real	76
Figura 78: Vento – Velocidade – Projeto x Real.....	76

Figura 79: Onda - Dados de Projeto – Hs x Tp	77
Figura 80: Onda – Dados Reais – Hs x Tp.....	77
Figura 81: Onda – Hs – Projeto x Real	78
Figura 82: Onda – Tp – Projeto x Real.....	78
Figura 83: Onda – Dados de Projeto – Hs x Direção	79
Figura 84: Onda – Dados Reais – Hs x Direção.....	79
Figura 85: Onda – Direção – Projeto x Real.....	79
Figura 86: Corrente – Dados de Projeto – Velocidade x Direção	80
Figura 87: Corrente – Dados Reais – Velocidade x Direção	80
Figura 88: Corrente – Velocidade – Projeto x Real	81
Figura 89: Corrente – Direção – Projeto x Real.....	81

II. Siglas

- ANM – Árvore de Natal Molhada
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API – *American Petroleum Institute*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CAPEX – *capital expenditure* – investimentos em bens de capital
DGPS – sistema de posicionamento global diferencial
DNV-GL - *Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd*
DTS - *Distributed Temperature Sensing*
FBS - *fiber Bragg grating sensors*
FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*
Hs – altura significativa de onda
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
ISO - *International Organization for Standardization*
MODA – Monitoramento Ótico Direto no Arame
NORSOK - *Norsk Sokkels Konkurranseposisjon*
OPEX – operational expenditure – custos operacionais
PLEM – Pipeline End Manifold
PLET – Pipeline End Termination
PSA-Norway – Petroleum Safety Authority Norway
RAO – *Response Amplitude Operator*
RGO – razão gás-óleo
SGSS – Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional de Sistemas Submarinos
Tp – período de pico primário
UEP – Unidade Estacionária de Produção
UNEP - *United Nations Environment Programme*
UNESCO-IOC - *Intergovernmental Oceanographic Commission*
VPL – valor presente líquido
WMO – World Meteorological Organization

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

A indústria de petróleo apresentou importante crescimento durante o século XX, em grande parte devido ao desenvolvimento dos motores a combustão e por seus produtos constituírem bens estratégicos para a segurança nacional de vários países. Dispor de reservas de óleo e gás e tecnologias para explorá-las passou a ser fator decisivo para o desenvolvimento de nações e pretexto para várias das guerras ocorridas neste período.

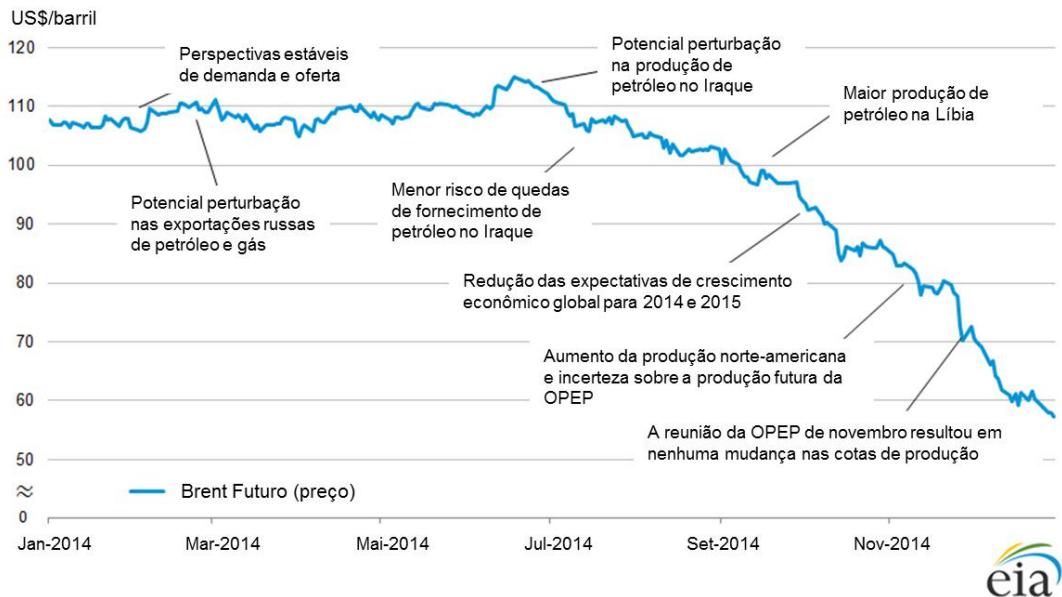
O setor de óleo e gás movimenta enormes quantidades de recursos humanos e financeiros por um longo período nas áreas de exploração de seus produtos. Conhecimentos em engenharia, administração, finanças, segurança, meio ambiente e fatores sociais são indispensáveis para o bom desempenho das empresas deste setor.

O momento atual traz várias incertezas sobre a economia e estabilidade mundial, incertezas essas jamais observadas na história da humanidade. Incertezas relativas às eleições brasileiras, às negociações entre as Coréias do Norte e do Sul, à pujança da economia chinesa, ao acordo nuclear com o Irã, à crise imigratória na União Europeia, a atos terroristas cada vez mais difíceis de serem previstos, à crise na OPEP, entre incontáveis outros gatilhos que podem atingir o mercado internacional de petróleo.

Além das incertezas conhecidas, os setores produtivos, principalmente a indústria de óleo e gás, devem apostar em projetos com elevada robustez econômica, para que sejam vantajosos durante toda a duração do mesmo. Essas considerações são de grande importância visto que os projetos na indústria do petróleo são elaborados para operar, de forma economicamente viável, por décadas.

Isso demonstra que, além dos cenários conhecidos, a existência de eventos desconhecidos e imprevisíveis, mas com potencial de gerar grandes impactos e até mudanças estruturais em vários segmentos não devem ser desprezados. Esses eventos são conhecidos como “Cisnes Negros” [1].

Um exemplo clássico dessas mudanças estruturais é a queda no preço do barril de petróleo (*Brent futuro*) ocorrida em 2014, que pode ser observada na Figura 1. De 2 de janeiro a 31 de dezembro daquele ano, o valor caiu de US\$ 108 para US\$ 57 por barril. Fatores como a elevação da oferta de petróleo, redução da expectativa de crescimento econômico e perturbações no fornecimento foram responsáveis por esse declínio, principalmente na segunda metade do ano.



Outro ponto a ser considerado é o declínio da participação do petróleo no consumo de energia. De acordo com Pedro Parente, então presidente da Petrobras, em palestra realizada no dia 1º de agosto de 2017 [3], essa participação, que hoje se encontra na casa dos 60%, deve crescer com velocidade mais baixa até 2035, e no pior dos cenários pode chegar a 20% em 2040. Parente afirma que a participação dos combustíveis fósseis se reduz em todos os cenários, mas ainda não se sabe qual será o substituto na matriz energética do futuro.

A influência destes cenários pode ser observada nas projeções divulgadas por grandes empresas (Figura 2) e por entidades governamentais (Figura 3), que optam por manter projeções mais estáveis para os próximos anos. Todas essas hipóteses devem ser consideradas nas avaliações econômicas dos projetos de forma a torná-lo o mais rentável possível, independente das mudanças estruturais que ocorram.

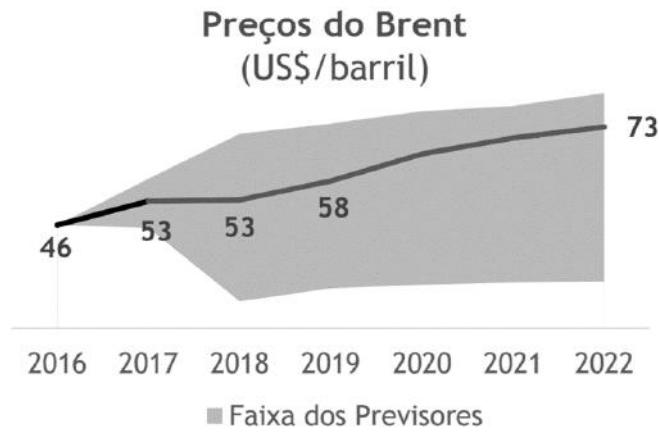


Figura 2: Projeção do preço do petróleo divulgada pela Petrobras.
Fonte: Plano de Negócios e Gestão 2018-2022 – Petrobras – Modificado. [4]

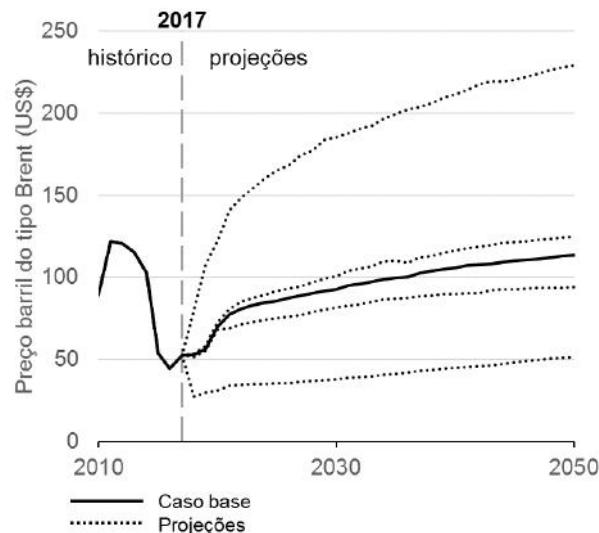


Figura 3: Cenários de projeção do preço do petróleo divulgada pelo EIA (U.S. Energy Information Administration)
Fonte: AEO2018 (Annual Energy Outlook 2018) – Modificado. [5]

Assim, somente sobreviverão as indústrias de petróleo que conseguirem operar com um custo de extração mais baixo, que é sensivelmente influenciada pela postergação do descomissionamento e aumento do fator de recuperação.

A Figura 4 representa, de forma simplificada, o impacto da postergação do descomissionamento do sistema submarino sobre o retorno econômico. Quanto maior o tempo de produção maior o retorno econômico (válido somente até o limite econômico de produção – momento em que o custo de produção é igual à receita obtida no empreendimento, exemplificado pela Figura 5).

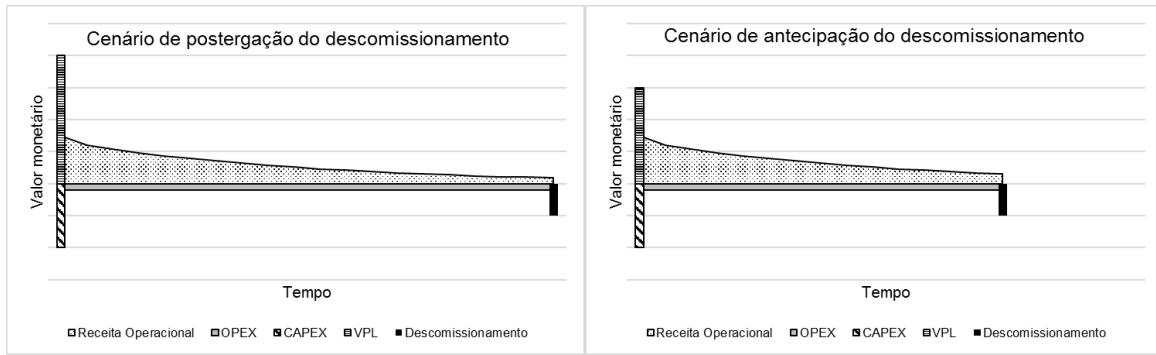


Figura 4: Representação dos cenários de postergação e antecipação do descomissionamento

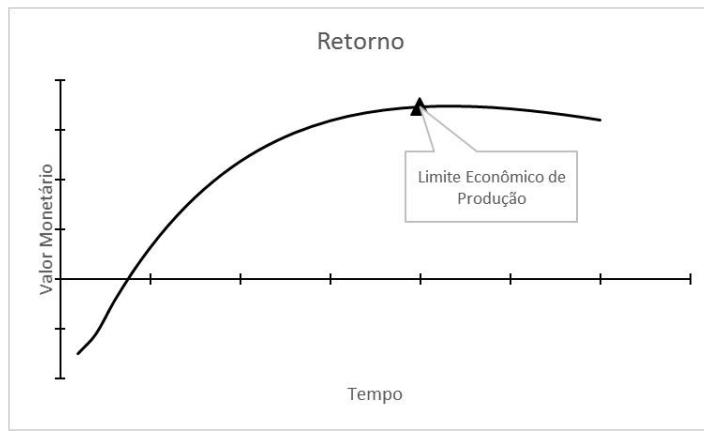


Figura 5: Exemplo de retorno de um empreendimento com limite econômico de produção

Além das conjunturas macroeconômicas é preciso estar preparado para mudanças nas condições ambientais. Dados disponibilizados pela NASA [6] demonstram como as mudanças nas condições ambientais têm se tornado cada vez mais frequentes e intensas.

Essas mudanças se apresentam não somente como um novo patamar médio (superior), mas também como um aumento das condições extremas. Relevantes exemplos dessas condições extremas são as tempestades Katrina (2005), Sandy (2012) e Harvey (2017) na América do Norte e Caribe, a tempestade Catarina (2004), as chuvas do réveillon em Angra dos Reis (2009) e as enchentes no Espírito Santo (2013), no Brasil.

Os gráficos da Figura 6 expõem informações sobre a elevação do nível dos oceanos (gráficos superiores), dados sobre anomalias na temperatura mundial (inferior esquerdo) e sobre o aumento do número de tornados (inferior direito).

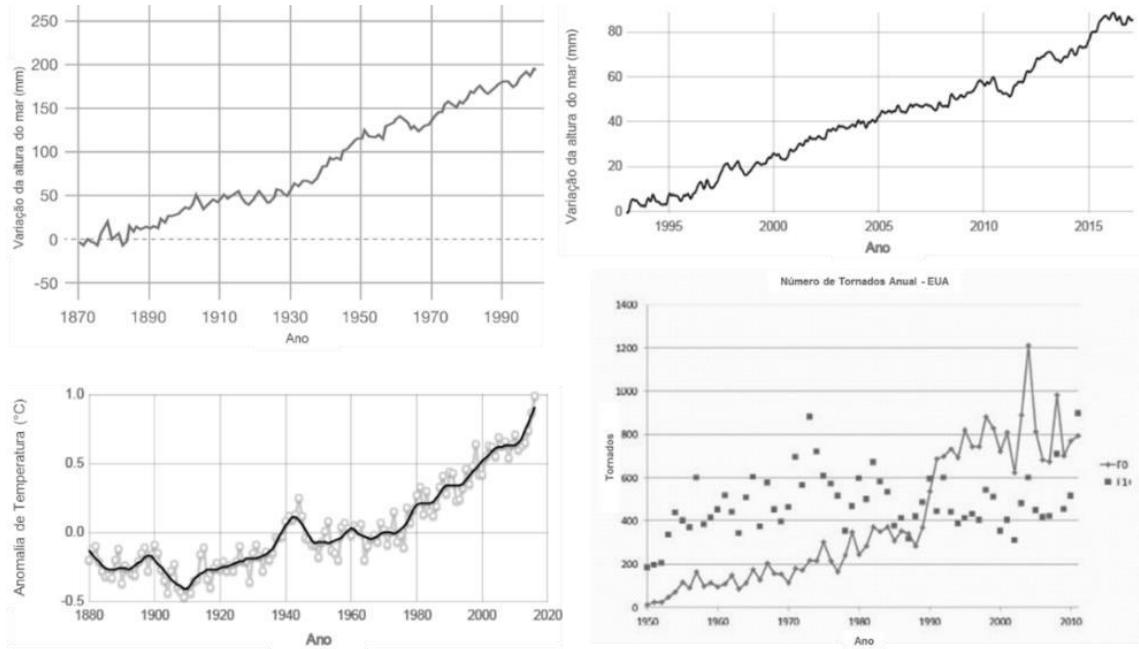


Figura 6: Evidências das mudanças climáticas
Fonte: NASA [6]

Adicionalmente, no dia 13 de outubro de 2015, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através da Resolução Nº41 de 09 de outubro de 2015 [7], tornou público a aprovação do Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional de Sistemas Submarinos (RT-SGSS) [8].

Essa resolução instituiu o Regime de Segurança Operacional de Sistemas Submarinos em que ficam estabelecidas as responsabilidades dos detentores de direitos de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural para atendimento ao SGSS. Regulamentando o procedimento para operação de Sistemas Submarinos em cenários de reutilização ou para além da vida útil de projeto. Sendo o Operador de Sistema Submarino responsável por comunicar à ANP, com no mínimo 01 (um) ano de antecedência do final do período da vida útil de projeto.

Impende destacar, ainda do RT-SGSS [8] nos Capítulos 24 e 25, Reutilização e Extensão de Vida Útil respectivamente, que citam a importância de considerar a vida útil remanescente em fadiga, em especial sob a ótica da análise de cargas, tensões, mecanismos e modos de falha, incluindo amplitudes e frequências para este cálculo.

Outro ponto importante a ser ressaltado se refere aos objetos para os quais o acesso à documentação de projeto é falho ou insuficiente, seja por motivos de obsolescência, divergências de premissas ou desenvolvimento de modelagens mais

avançadas, em que o RT-SGSS [8] indica que o Operador do Sistema Submarino deverá empregar medidas mitigadoras adicionais para obtenção de informações.

Por fim, os principais objetivos do regulamento publicado pela ANP são prezar pela prevenção ou mitigação das consequências de eventuais acidentes e definir os responsáveis pela segurança operacional do sistema submarino, cujo gerenciamento é fator essencial para a confiabilidade de toda a cadeia de suprimento nacional de petróleo, derivados e gás natural.

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo propor, descrever e analisar criticamente uma nova abordagem na avaliação de vida útil remanescente em fadiga de *risers* flexíveis, a fim de possibilitar operações mais seguras nos sistemas submarinos, seja durante o período operacional ou nos cenários de extensão da vida útil de projeto. Complementarmente, o trabalho propõe uma discussão sobre os impactos das divergências entre os dados disponíveis, como subsídio para a análise de fadiga de *risers* flexíveis, na fase de projeto e na fase de operação, que compreende as reais condições a que estes são submetidos.

É importante frisar que a nova abordagem na avaliação da vida útil em fadiga é proposta para *risers* flexíveis já instalados e não monitorados. Sem a necessidade de investimentos ou obras, baseando-se na comparação entre as reais condições operacionais e aquelas previstas em projeto, atendendo às melhores práticas da indústria e ao Regulamento Técnico emitido pela ANP [8].

Para tanto, serão avaliados dados relevantes ao cálculo da vida útil em fadiga, como pressão interna do fluido, dados meteoceanográficos (onda, vento e corrente) e calado da unidade, que podem ser obtidos através de sensores já instalados na Unidade Estacionária de Produção (UEP).

Assim sendo, este trabalho consiste na comparação da vida útil em fadiga, quando definida com os dados previstos em projeto e com as reais condições de operação.

1.3. Importância do trabalho

Diversas publicações – [9] a [16] – mostram que a fadiga é um importante mecanismo de falha a ser considerado no gerenciamento da integridade dos dutos flexíveis, de forma a garantir a segurança operacional das instalações.

É um desafio para o gerenciamento de integridade, especialmente no caso de dutos flexíveis, proporcionar a operação desses sistemas após sua vida útil de projeto ou após a ocorrência de um incidente, tanto para a maximização da produção da Unidade Estacionária de Produção (UEP) quanto para a reutilização em demais projetos de sistemas submarinos.

Trata-se, pois, de segurança operacional, assegurar a execução e a compreensão de todas as etapas do gerenciamento da integridade garantindo a operacionalidade desses sistemas. E, neste caso, a análise de fadiga tem um papel relevante conforme descrito nas normas NORSOK U-009 [17] e ISO 13628-2 [18].

À corroborar, o renomado código, API 17J [19], recomenda que a variação das cargas no tempo e no espaço e os seus efeitos nos *risers* e seus acessórios, além das condições ambientais e de solo, devem ser analisados, no que diz respeito a avaliação da vida útil em fadiga.

Mais especificamente, a API 17B [20] indica, como uma das técnicas de monitoramento a ser aplicado aos *risers* flexíveis, o acompanhamento dos movimentos e das deformações.

Em reforço, a PSA (*Petroleum Safety Authority Norway*, em artigo publicado sobre ocorrências em dutos flexíveis [10], confirma a importância do tempo nos mecanismos de degradação dos *risers*, alguns de forma linear, outros exponencialmente, sendo a fadiga um dos mais relevantes.

Outra relevante constatação é a alteração na média da altura significativa da onda (H_s) nos últimos anos. A Figura 7 expõe as observações realizadas desde 1950, no Mar do Norte, conforme relatório do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC) [21], instituição ligada à WMO (*Word Meteorological Organization*) e à UNEP (*United Nations Environment Programme*).

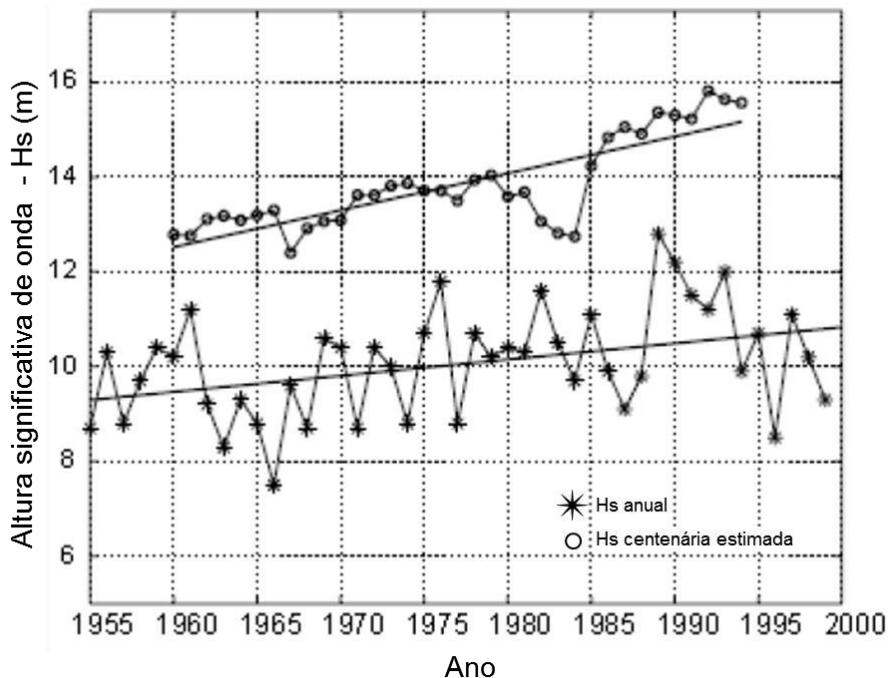


Figura 7: Máxima altura significativa de onda (Hs) anual e Hs centenária estimada
Fonte: Vikey et al., 1999 apud [10]

Sob outra abordagem, insta frisar que há claramente uma questão econômica a ser considerada, pois quanto maior o tempo de operação do sistema submarino maior será o tempo de exploração com as mesmas instalações, elevando o fator de recuperação, reduzindo os custos operacionais e de novos investimentos.

Tal relação se dá em causa da postergação dos custos de descomissionamento (através da extensão da vida útil do sistema submarino), de um maior aproveitamento dos investimentos realizados na implantação (CAPEX – *capital expenditure*) e da otimização do capital utilizado para manter a operação (OPEX - *operational expenditure*), resultando em um maior retorno no empreendimento (VPL – valor presente líquido).

1.4. Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 demonstrou a importância do trabalho e identificou como um projeto para o longo prazo deve ser conservador visto que há muitas incertezas que não podem ser previstas, além da existência de regulamentos legais que devem ser considerados pelas operadoras de petróleo e gás no Brasil.

Na sequência, o Capítulo 2 apresenta os principais conceitos referentes à Engenharia Submarina de forma a situar a importância de cada etapa da vida útil dos dutos flexíveis, desde o projeto até o descomissionamento, na garantia da segurança operacional.

A metodologia proposta e o estudo de caso, objetivos deste trabalho, são apresentados nos Capítulos 3 e 4 com o detalhamento sobre as principais variáveis analisadas como os dados dos fluidos produzidos, calado da unidade e dados ambientais (onda, vento e corrente). Ainda no Capítulo 3 são delineadas as correlações entre as condições de projeto e os dados reais coletados. Em seção específica são descritos os resultados das simulações e como as variáveis influenciaram na vida em fadiga do objeto analisado.

O Capítulo 5 contempla a conclusão deste estudo e propõe os próximos passos para um maior aprofundamento da análise realizadas, com o objetivo de prever de forma mais precisa o dano real em fadiga.

2. Conceitos gerais

2.1. Sistema submarino de produção

Um sistema submarino é o conjunto de instalações responsáveis por controlar, separar, bombear e conduzir os fluidos entre o poço e a UEP (Unidade Estacionária de Produção), entre UEPs, e entre a UEP e as instalações em terra, independente do sentido de fluxo (produção, injeção, exportação, importação ou transferência). Esse sistema é composto por vários elementos, dentre eles, ANM (Árvore de Natal Molhada), PLEM, PLET, *manifold*, módulos de bombeio, sistemas de separação, umbilicais de potência, controle e injeção química, dutos rígidos e dutos flexíveis. Os dutos flexíveis constituem os objetos a serem considerados no presente estudo.

2.2. Dutos submarinos

Tomando como referência o SGSS [8], o duto submarino é um conjunto composto por tubos, trechos ou tramos ligados entre si destinado à movimentação de fluidos, podendo ser rígido, flexível, polimérico, híbrido, dentre outros tipos. Também fazem parte seus Componentes e Complementos, que são definidos como elementos mecânicos pertencentes ao duto e, instalações necessárias à segurança, proteção e operação, respectivamente. Os dutos submarinos são utilizados para diversas aplicações como:

- Coleta de petróleo produzido por um poço ou coleta de *manifold* submarino interligado a uma Unidade Estacionária de Produção (UEP);
- Injeção de fluidos, seja em um poço diretamente ou através de um *manifold* submarino;
- Exportação ou importação de óleo ou gás tratado numa UEP.

Esses objetos destacam-se pelas condições típicas de carregamento a que estão submetidos:

- Pressões externas da ordem de milhares de metros de coluna d'água;
- Pressões internas da ordem de centenas de vezes a pressão atmosférica;
- Trações da ordem de centenas de toneladas-força.

2.2.1. Dutos flexíveis

Dentre as inúmeras configurações de dutos submarinos, a de maior relevância para o cenário brasileiro são os flexíveis, sendo a Petrobras a maior usuária mundial [22].

De acordo com a API 17B [20], um tramo de duto flexível pode ser definido como a montagem de um corpo tubular e acessórios de extremidade, sendo o corpo tubular composto de várias camadas, permitindo este elemento estrutural resistir a pressões internas e externas e apresentar flexibilidade.

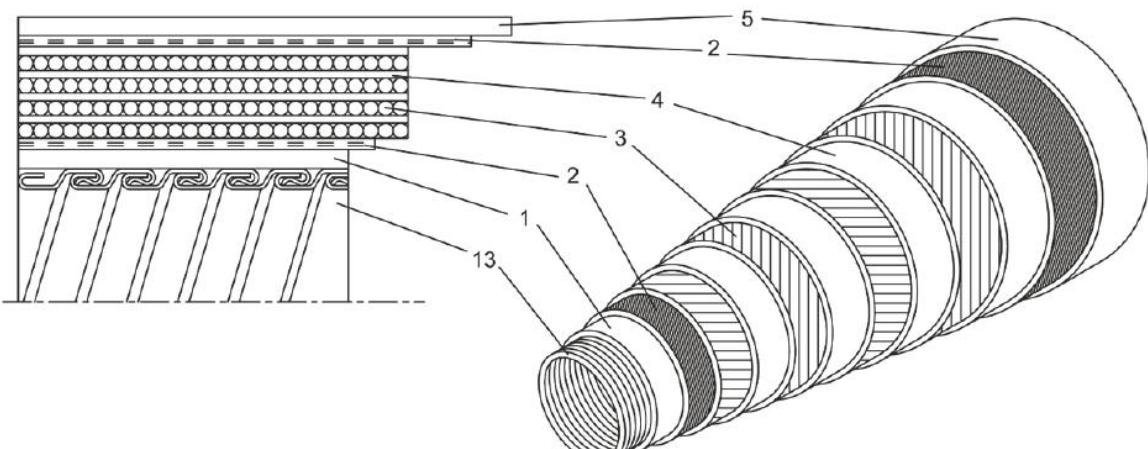
Entende-se, então, como duto flexível um conjunto de um ou mais tramos flexíveis conectados entre si cuja função principal é de escoar fluidos (interligando instalações), de modo seguro (contenção de pressão) e eficiente (por um longo tempo).

Um duto flexível geralmente combina baixa rigidez flexional com elevada rigidez à tração axial. Isso é possível devido ao processo construtivo que combina vários materiais em diversas camadas. Sendo possível classificá-los em duas principais categorias [20]:

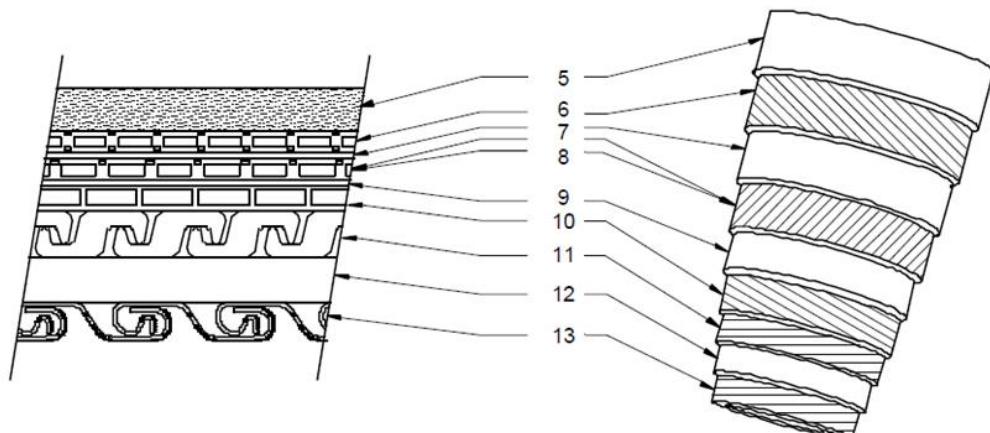
- a) *Bonded Flexible Pipe*
- b) *Unbonded Flexible Pipe* [19]

No caso *Bonded*, uma ou mais camadas das que compõem a estrutura tubular está aderida a outra, normalmente uma camada metálica e outra elastomérica. As camadas das estruturas do tipo *Unbonded* são aplicadas de forma independente umas das outras. A Figura 8 indica as principais estruturas para os dutos do tipo *Bonded* e *Unbonded*.

Mais detalhes sobre a descrição dos dutos flexíveis podem ser encontrados em diversas publicações ([13], [18], [22] a [25]). Assim, neste trabalho, é feito apenas um resumo da descrição das principais camadas e de suas funções.



a) *Bonded Flexible Pipe*



b) *Unbonded Flexible Pipe*

Key

1	Liner	8	Inner tensile armor
2	Breaker layer(s)	9	Antiwear layer
3	Reinforcement layers	10	Backup pressure armor (noninterlocked)
4	Cushion layer (filler)	11	Pressure armor (interlocked)
5	Outer sheath	12	Internal pressure sheath
6	Outer tensile armor	13	Carcass
7	Antiwear layer		

Figura 8: Esquemático de seções transversais típicas de *Bonded* (a) e *Unbonded* (b) *Flexible Pipe*

Fonte: API 17B, 2014 [20]

Os dutos do tipo *Unbonded*, cujas principais camadas são descritas na Figura 9 e principais características são listadas na Tabela 1, são os mais utilizados na indústria petrolífera brasileira. O presente trabalho aborda exclusivamente este tipo de estrutura.

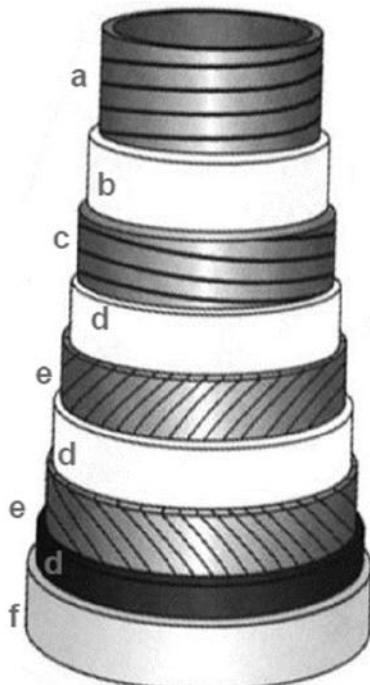


Figura 9: Duto Flexível – Principais camadas
Fonte: Acervo de imagem da Petrobras - Modificada.

Tabela 1: Descrição básica das principais camadas de um duto flexível

Código	Nome da camada	Descrição
a)	Carcaça intertravada	Perfis metálicos intertravados entre si e dispostos de forma helicoidal em passo reduzido que fornece suporte para a barreira de pressão com objetivo de resistir ao colapso.
b)	Barreira de pressão	Camada formada por extrusão a quente. Promove a estanqueidade para o fluido interno do duto.
c)	Armadura de pressão	Perfis metálicos (em forma de Z, C ou T) intertravados entre si e dispostos de forma helicoidal em passo reduzido de modo a suportar a pressão interna. Camada não estanque.
d)	Camada anti-arrasto	Camada formada por extrusão a quente ou por fitas. Reduz o atrito e a abrasão entre perfis metálicos. Camada não estanque.
e)	Armadura de tração	Perfis metálicos (redondos ou chatos) dispostos de forma helicoidal em passo longo. As armaduras de tração são aplicadas aos pares, em sentidos inversos, de modo a prover balanceamento ao tramo sob carga axial. Promove resistência à tração ao duto. Camada não estanque.
f)	Capa externa	Camada formada pela extrusão a quente. Fornece estanqueidade à estrutura e protege as armaduras de tração da abrasão do meio externo.

Das camadas que compõe o duto flexível, a Armadura de Tração é avaliada, nesse trabalho, nos quesitos da análise de fadiga, das técnicas de monitoramento disponíveis e no estudo de caso.

Vale destacar que as vedações e a estanqueidade da estrutura são garantidas pelas camadas poliméricas, no sentido interno-externo, correspondentes à barreira de vedação e à capa externa. A região entre essas duas camadas é comumente chamada de “anular do duto flexível”, região muito importante para a determinação do dano em fadiga de um duto flexível, visto que a concentração de contaminantes combinada com vapor de água gera um ambiente propício ao processo de corrosão-fadiga.

Além disso, a depender do tipo da camada mais interna, o duto flexível pode ser classificado como *Smooth-bore* – a camada-núcleo é polimérica, de superfície lisa – ou *Rough-bore* – a camada-núcleo é metálica com reentrâncias, de superfície irregular e rugosa. Em suma, neste caso, a diferença consiste na presença, ou não, da carcaça intertravada.

Nas estruturas *Smooth-bore*, muito utilizadas para a função de injeção de água, a inexistência da carcaça metálica é justificada em razão da premissa do “duto cheio” (sempre haverá líquido no interior do duto), quando no fundo do mar. Nessas condições, as pressões externas e internas são da mesma ordem, não se fazendo necessária a camada cuja função é resistir ao colapso.

Outra forma de classificação é a fundamentada na localização da aplicação. Dutos que, todo ou em parte, estejam apoiados ou enterrados no fundo do mar e sujeitos majoritariamente a cargas estáticas podem ser definidos como *flowline*. Já aqueles que conectam as unidades marítimas às estruturas no fundo do mar são classificados como *risers*, sendo estes, objetos de análise deste trabalho e, portanto, mais detalhados.

2.2.2. *Risers* flexíveis

O termo “*riser*” é originário do verbo, em inglês, “*to rise*”, ou seja, ascender, elevar-se. Assim, um *riser* é uma estrutura sob a ação de cargas estáticas ou dinâmicas conectando uma unidade marítima (plataforma, boia ou embarcação) a uma instalação (ou outro duto) no solo marinho, ou a outra unidade marítima [20]. Os *risers* podem estar livremente suspensos (em catenária livre), contidos em alguma extensão (boias ou peso morto) ou totalmente restritos, ou enclausurado em uma tubulação (*I-tube* ou *J-tube*).

Os *risers* flexíveis podem ser instalados em diferentes tipos de configurações, conforme apresentado na Figura 10, sendo a Catenária Livre (*Free-hanging Catenary*) a mais comum seja por razões econômicas, fabris ou relativas à instalação (menor número de acessórios e equipamentos). A catenária é a curva que representa um cabo suspenso e sujeito ao seu peso próprio.

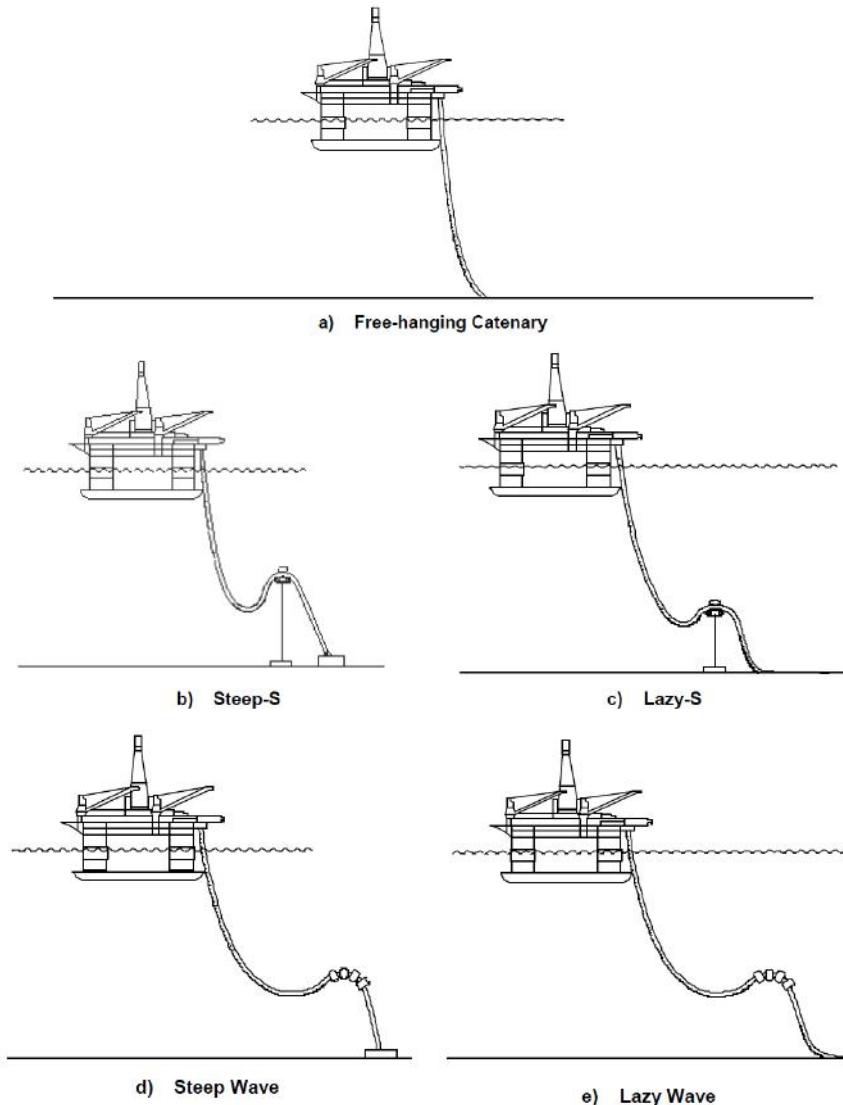


Figura 10: Exemplos de configurações dinâmica comuns de *risers* flexíveis
Fonte: API 17B, 2014 [20]

As demais configurações, também chamadas de amortecidas ou autossustentadas, são consideradas como alternativas para a redução dos esforços e/ou dos movimentos no topo, de forma a possibilitar a operação em maiores profundidades ou em áreas sujeitas a furacões ou fenômenos naturais similares.

2.3. Projeto de *risers* flexíveis

Na fase de projeto, o dimensionamento e seleção de materiais baseia-se nos mecanismos e modos de falha potenciais, sendo os principais os que envolvem processos nos quais os dutos flexíveis são submetidos a elevadas tensões e deformações, corrosão e erosão, fadiga, fragilização por hidrogênio, envelhecimento de polímeros, entre outros.

A Norma ISO 14224 [26] define “Mecanismo de Falha” como um processo que resulta em uma falha, e “Falha” como o término da habilidade de um item executar a função requerida.

Em relação ao mecanismo de falha por fadiga, sob a ótica do gerenciamento da integridade de *risers* flexíveis, é possível apontar duas camadas como as mais críticas:

- Armadura de Pressão (*Pressure armor – interlocked*);
- Armadura de Tração (*Tensile armor*);

Desta feita, o projeto destas camadas deve considerar critérios específicos a serem obedecidos durante toda a vida útil. Critérios estes que, quando não atendidos, podem reduzir a vida útil do *riser* ou até mesmo comprometer a integridade estrutural do mesmo, alterando a condição de segurança operacional da UEP.

O projeto de um duto flexível, especificamente para a seção *riser*, pode ser dividido em seis fases (para mais detalhes, a API 17B [20] deve ser consultada):

1. Seleção de materiais;
2. Projeto da seção transversal;
3. Projeto da configuração do sistema;
4. Análises dinâmicas;
5. Detalhamento e determinação da vida de projeto, e
6. Projeto de instalação.

Na etapa de projeto são assumidas muitas informações (previsão) referentes aos dados operacionais (pressão, temperatura, densidade e teor de contaminantes do fluido a ser transportado), condições ambientais (dados estatísticos) e propriedades hidrodinâmicas (configuração do *riser*) para serem utilizadas nas simulações (Análise Global e Análise Local). A Figura 11 indica esta relação entre as informações.

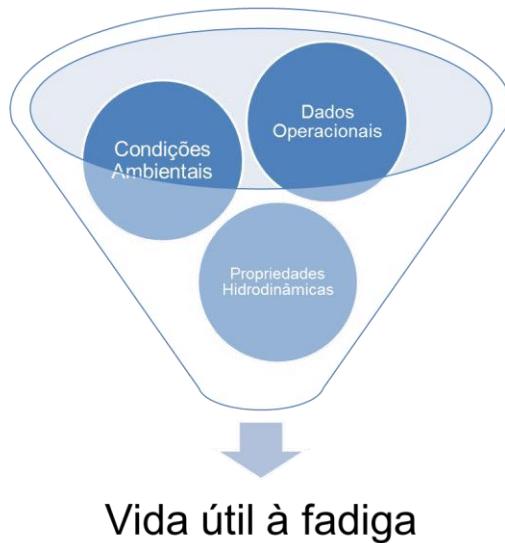


Figura 11: Relação de dados para análise de vida útil em fadiga

Essas previsões, utilizadas na fase de projeto, podem divergir das reais condições operacionais ou não serem definidas com precisão, como uma longa parada de produção, mudança nos parâmetros operacionais (RGO, pressão, temperatura, teor de contaminantes) e eventos climáticos extremos.

A variação de tensão nas camadas dos *risers* flexíveis tem sua fonte nas condições ambientais a que estes *risers* estão submetidos, assim os dados oceanográficos (onda, vento e corrente) devem ser específicos para o local de operação.

A coleta de dados prévia, mesmo que por um curto período de tempo, para a determinação dos parâmetros ambientais pode apresentar uma boa representatividade estatística das combinações de carregamento. A questão principal a ser considerada é que, com a maximização dos efeitos das mudanças climáticas, cenários adversos (calmarias ou condições extremas) podem ocorrer diferentemente do esperado.

De tal modo, o comportamento das ondas do mar previsto em projeto, considerado um processo aleatório, estacionário e Gaussiano descrito por um espectro de onda (JONSWAP ou *Pierson Moskowitz*), equivalente à Figura 12, pode não ser tão representativo quanto os dados reais.

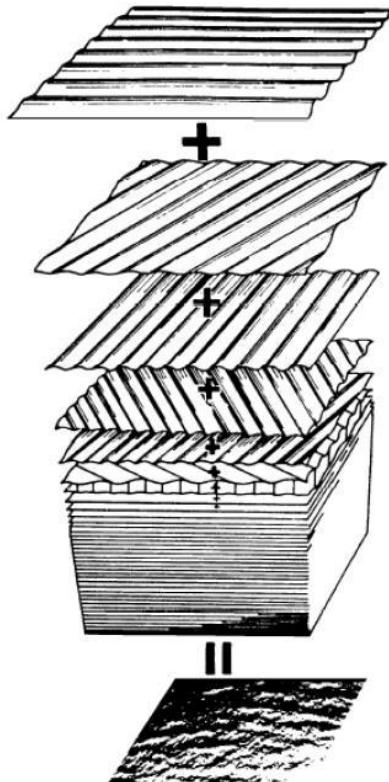


Figura 12: Interação de várias ondas regulares formando um mar irregular
Fonte: JOURNÉE, J.M.J.; MASSIE, W.W., 2001. *apud* [12]

A discrepância entre os dados ambientais previstos na fase de projeto e a real condição de operação é um dos pilares de discussão deste trabalho, que tem como principais causas os efeitos das mudanças climáticas ou o pequeno intervalo de coleta de dados usados em projeto. Essas divergências podem resultar em uma redução ou aumento do acúmulo do dano por fadiga nas estruturas, influenciando diretamente na vida útil remanescente.

2.4. Fadiga

O cálculo da vida útil em fadiga em *risers* flexíveis, em geral, é uma etapa desafiadora do projeto. Assim como citado por Nielsen *et al.* [11], as condições ambientais podem causar elevadas variações nas cargas e na curvatura do *riser* como resultado de movimentos da unidade.

A aplicação de cargas de modo repetitivo (ciclos) pode iniciar o mecanismo de fadiga no material, levando à nucleação de uma pequena trinca, seguida de seu crescimento até a falha completa que, na maioria das vezes, é do tipo catastrófica,

ocorrendo de modo repentino e sem indícios prévios [27]. Assim, pode-se dizer que é uma falha estrutural localizada e progressiva que ocorre principalmente em materiais quando submetidos simultaneamente a:

- Tensão trativa elevada (abaixo do limite para falha sob carregamento estático);
- Variação elevada da tensão, e
- Elevado número de ciclos de carregamento.

A curva S-N, também conhecida como Curva de *Wöhler*, permite estimar a vida em fadiga esperada. A curva é obtida a partir de testes de laboratório e pode ser ajustada de forma a admitir uma menor probabilidade de falha. Ademais, a ASTM E739 [28] deve ser considerada para fim de definição do número de amostras.

O regime de vida finita na curva S-N pode ser representado pela equação de Basquin [27]:

$$S_a^k N = C \quad (1)$$

Sendo:

S_a – Variação de tensão

N – Número de Ciclos

k - Coeficiente da curva S-N (inverso negativo)

C - Constante referente à vida teórica para uma variação de tensão

É normalmente usada a escala logarítmica para apresentação dos dados, resultando numa aproximação linear entre $\log S_a$ e $\log N$, dentro do regime de vida finita, e a equação (1) pode ser reescrita como

$$\log N = \log C - k \cdot \log S_a \quad (2)$$

Para alguns materiais (metais ferrosos), outra consideração importante é a definição do ponto de inflexão (limite de fadiga), normalmente definido em 10^6 ciclos, que leva à determinação de coeficientes $\log C$ e k diferentes para cada parte da curva, como observado na Figura 13. Esse ponto de inflexão é previsto em normas, tais como a DNV GL-RP-0005 [29], de forma a tentar capturar incertezas nos ensaios, pois de fato esses materiais se caracterizam por apresentar um patamar após o limite de fadiga (vida infinita).

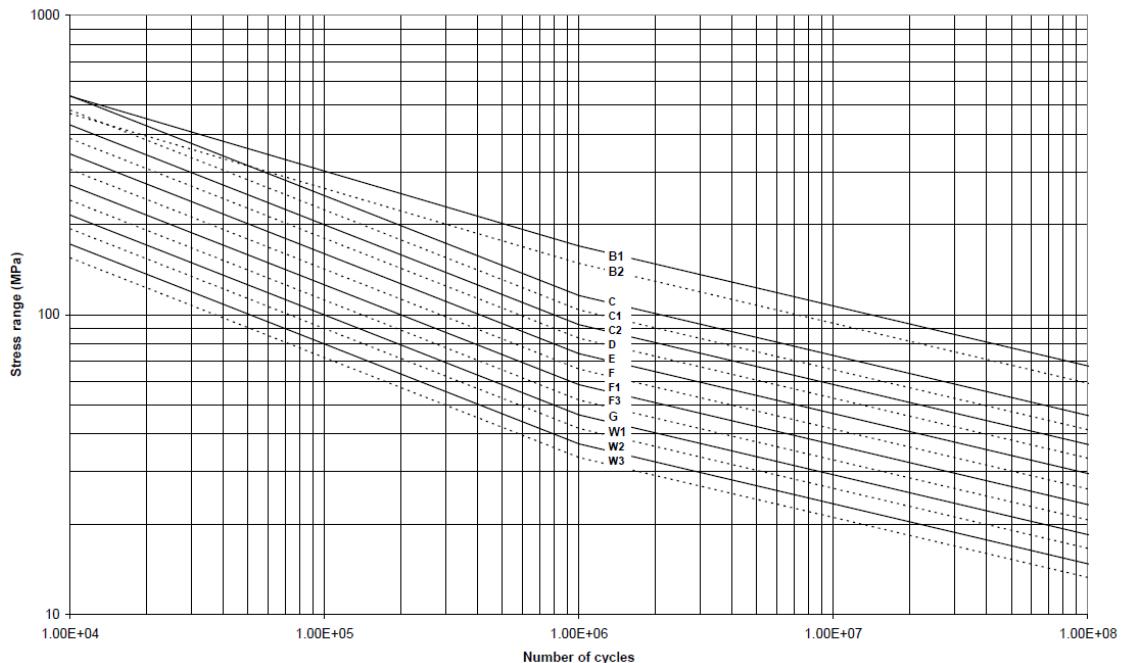


Figura 13: Curvas S-N para aço ASTM A490 em água do mar com proteção catódica
Fonte: DNV GL-RP-0005, 2014, [29]

O mecanismo de falha por fadiga pode se apresentar em dois cenários, o de fadiga de baixo ciclo – em que são produzidas deformações plásticas –, e o de fadiga de alto ciclo (em que predomina a relação tensão-deformação no regime elástico).

As equações (1) e (2) são capazes de representar com suficiente precisão o domínio de vida em fadiga de alto ciclo. No caso do domínio de vida em fadiga de baixo ciclo, essas equações apresentam menor precisão no tratamento dos dados de fadiga e outra abordagem é recomendada (curva e-N, representada pela equação de Coffin-Manson).

Pautado nos conceitos dispostos na API 17J [19], os dados referentes às curvas S-N devem ser documentados, justificados ou gerados abrangendo as seguintes condições:

- a) Exposição ao ar, à pressão e à temperatura atmosférica;
- b) Exposição à água do mar (mínimo de 3% de NaCl) desaerada, incluindo níveis de H₂S e CO₂ compatíveis com os fluidos transportados, à pressão e à temperatura atmosférica;
- c) Exposição ao ambiente previsto de anular intacto, incluindo níveis de H₂S e CO₂ compatíveis com os fluidos transportados, à pressão e à temperatura atmosférica;
- d) Devem ser considerados os efeitos dos sistemas de proteção catódica na determinação das curvas S-N.

A API 17J [19] ainda indica que para os cenários de anular intacto e anular alagado desaerado deve ser considerado um fator de segurança (FSF) de no mínimo 10. Para condições operacionais específicas podem ser utilizados FSF menores para o caso de anular alagado desaerado. Outra opção é a elaboração de projeto baseado em técnicas de confiabilidade.

2.4.1. Permeação de gases

Uma das características das camadas poliméricas dos dutos flexíveis é a permeabilidade a gases (principalmente os compostos menores como CH₄, H₂S, CO₂ e H₂O), que ocorre devido à diferença de pressão parcial entre o interior do tramo e o espaço anular. Essa força motriz permite que os gases, presentes no fluido produzido, permeiem e fiquem retidos no espaço anular, compreendido entre as camadas poliméricas interna e externa, conforme exemplificado na Figura 14. A permeação dos gases resulta na pressurização do espaço anular.

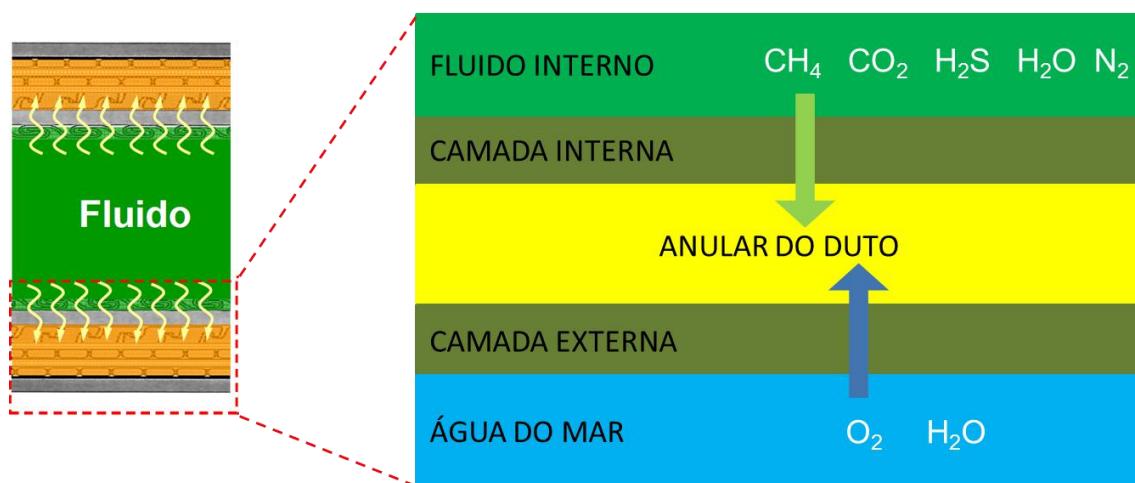


Figura 14: Esquemático de permeação de gases para o anular do duto
Fonte: Acervo de imagem da Petrobras - Modificada

O comportamento da pressão do gás permeado através das camadas poliméricas de um dado duto flexível é dependente de vários fatores da estrutura (dimensão, tipo de polímero, propriedades construtivas), dos fluidos transportados (óleo, gás, água), das condições de escoamento (pressão, temperatura) e das condições do ambiente externo (pressão, temperatura).

Durante a produção do petróleo, as frações gasosas de CH₄, H₂O, H₂S e CO₂ podem permear através da camada plástica de vedação atingindo as armaduras de pressão e tração. Os aços carbono de alta resistência (tensão de escoamento acima de 600 MPa) são susceptíveis ao fenômeno de corrosão sob tensão por sulfetos [30]. Dessa forma, com a presença desses gases, é de extrema importância que o estado do anular seja definido como:

- Seco,
- Alagado desaerado ou,
- Alagado aerado.

Ou de acordo com a API 17B [20]:

- Ao ar;
- Condições normais de operação (definidas por um modelo de permeação);
- Alagamento accidental;

Esses estados definem a agressividade do meio e influenciam a curva S-N a ser aplicada na determinação da vida útil em fadiga do *riser*. Essa influência pode ser observada na Figura 15 que exemplifica um esquemático com três curvas S-N, uma para cada condição do anular do duto flexível. É possível observar que quanto mais severo o ambiente, mais à esquerda está a curva (indicando a redução do número de ciclos até a falha).

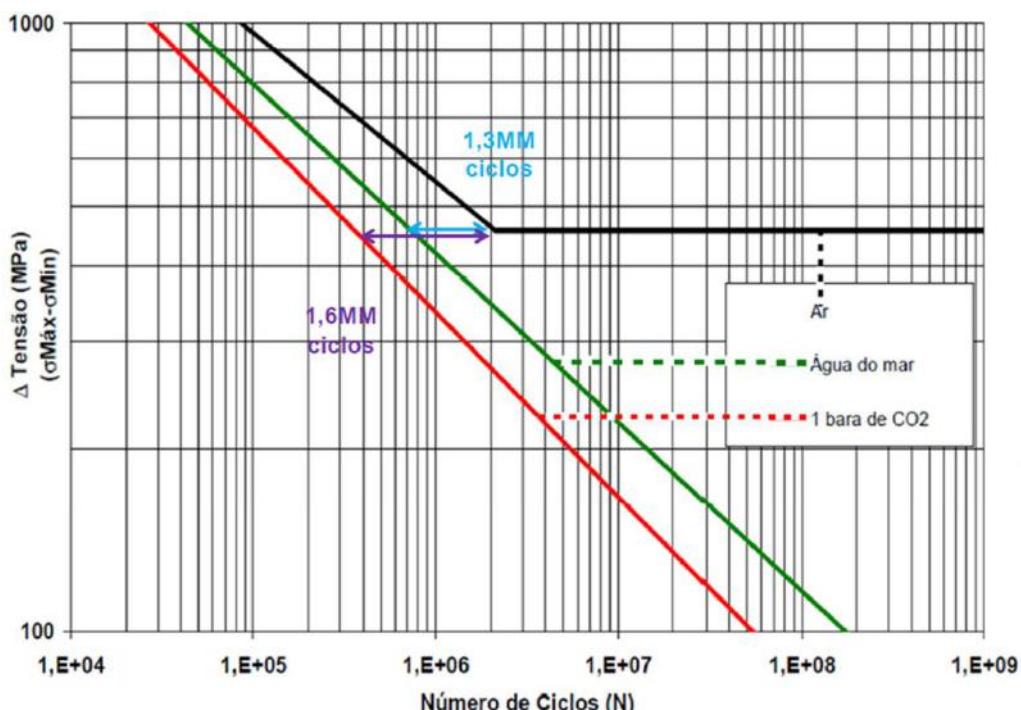


Figura 15: Influência da condição do anular na vida útil em fadiga
Fonte: Acervo de imagem da Petrobras - Modificada.

2.4.2. Cálculo de vida útil em fadiga

A forma de se obter a análise de fadiga para *risers* flexíveis é constituída pela Análise Global e pela Análise Local, descritas a seguir:

- Análise Global

Exemplificada na Figura 16, consiste de uma simulação do comportamento do *riser* representando todo o seu comprimento, desde a conexão na plataforma até a região do solo marinho. Nesta abordagem, usualmente, não são representados muitos detalhes pois se busca a resposta do *riser* como um todo. Essa avaliação pode ser feita de forma acoplada (a UEP e o dutos são analisados de forma conjunta) ou desacoplada (são analisados separadamente em duas etapas).

A análise é realizada combinando os carregamentos ambientais (onda, vento e corrente) com o RAO (*Response Amplitude Operator*) associado à embarcação e as informações dos dutos conectados à UEP.

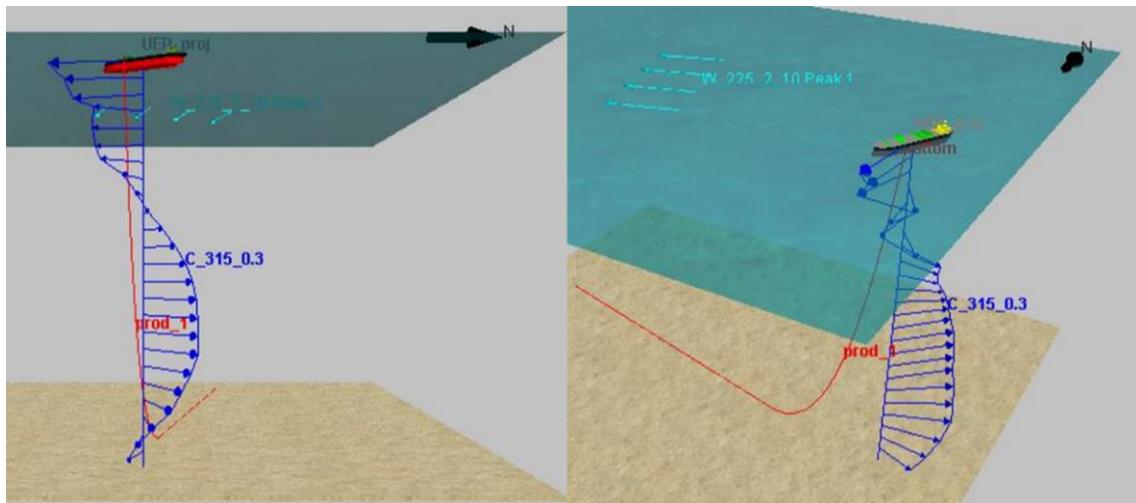


Figura 16: Exemplo de Análise Global
Fonte: Acervo de imagem da Petrobras - Modificada

- Análise Local

A Análise Local converte os dados de esforços disponibilizados pela Análise Global, principalmente nas regiões de interesse identificadas na Figura 17, nos carregamento em cada uma das camadas e/ou componentes. A análise requer um modelo numérico da seção do duto flexível e uma interface que seja compatível com a transposição global para procedimentos locais.

Das regiões identificadas na Figura 17, é de comum entendimento que as seções do conector de topo (1), enrijecedor de curvatura (2), conectores intermediários (3) e TDP (4) são as que devem ser analisadas de forma mais criteriosa, visto que nessas regiões encontram-se os principais fatores relacionados à fadiga, como:

- a. Maior esforço de tração;
- b. Elevado momento de flexão, e
- c. Elevado número de ciclos.

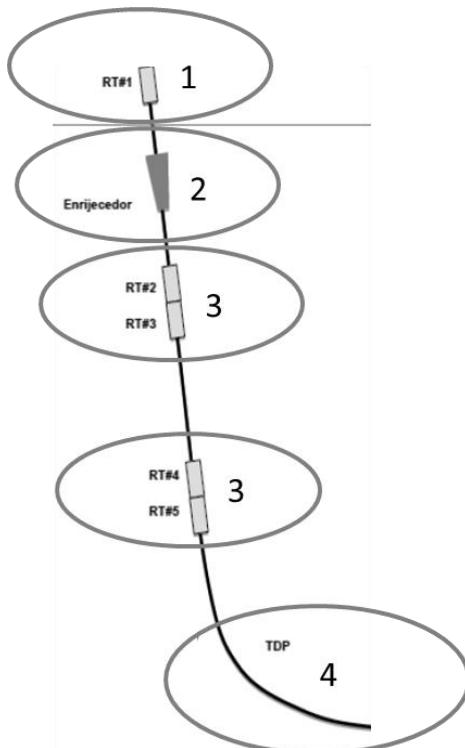


Figura 17: Principais regiões a serem consideradas na Análise Local
Fonte: Acervo de imagem da Petrobras - Modificada

Esse trabalho concentra-se, por razões de simplificação, na análise de fadiga da região do conector de topo, para o caso de enrijecedor de curvatura desacoplado, ou seja, a seção transversal do duto flexível somente está submetida à esforços de tração sem a influência do momento fletor.

Com base nas recomendações do Anexo G da API 17B [20] (“*Fatigue Analysis Methodology for Unbonded Dynamic Risers*”), o cálculo da vida útil em fadiga pode ser realizado através dos seguintes parâmetros:

- Curva S-N

A Equação de Basquin (1) define o comportamento da Curva S-N (vida finita) particularmente o domínio de alto ciclo.

- Regra de Palmgren-Miner [27]

Esta regra é utilizada para determinar a vida em fadiga quando o histórico de carregamento é composto por vários níveis de variação de tensão, baseada no acúmulo linear do dano.

$$d_i = \frac{1}{N_i}; D_{tot} = \sum_n n_i d_i \quad (3)$$

Onde

d_i – Dano causado por 1 (um) ciclo para a variação de tensão i

D_{tot} – Dano total acumulado para os n casos i analisados

N_i – Número de ciclos até a falha, calculado pela curva S-N para a variação de tensão i

n_i – Número de ocorrências da variação de tensão i

- Fator de Segurança

Definido como FSF (*Fatigue Safety Factor*) é aplicado para garantir que as incertezas provenientes do processo de cálculo de vida útil em fadiga, das consequências da falha e das dificuldades de inspeção sejam minimizadas. No item 5.3.1 da API 17J [19] estão descritas as condições de uso desse fator, normalmente utilizado como 10.

- Condição do Anular

Para cada uma das possíveis condições em que o anular pode se encontrar é necessário definir uma curva S-N apropriada. Para o caso de múltiplos ambientes ao longo da vida do *riser* (alagamento acidental ou permeação) a vida útil em fadiga deve obedecer ao seguinte critério:

$$\sum_y T_y \times d_y \leq \frac{1}{FSF} \quad (4)$$

Onde

T_y – Período na condição y do anular (*i.e.* em anos);

d_y – Taxa de dano (*i.e.* dano/ano) associada à condição y do anular.

A Figura 18 apresenta um fluxograma contendo as principais etapas acerca da análise de fadiga que são detalhadas na sequência.

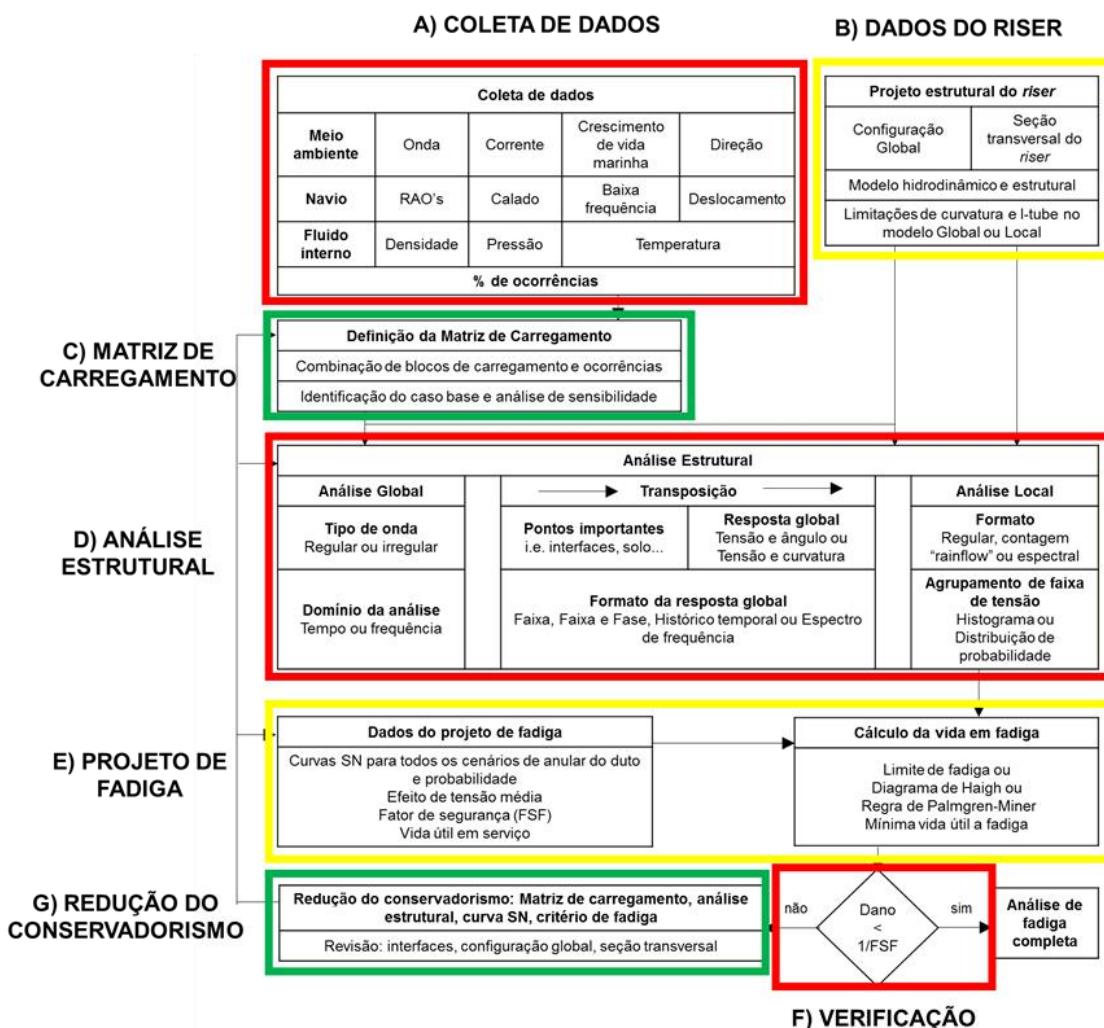


Figura 18: Etapas para Análise de Fadiga
Fonte: API 17B, 2014 [20] - Modificado

A) Coleta de dados:

Consiste na definição e coleta dos dados referentes ao ambiente, fluidos internos e característica da embarcação. Na etapa de projeto, essas informações são baseadas em previsões (características dos fluidos a serem produzidos) ou em coletas estatísticas

(comportamento ambiental). Não é possível assumir outra abordagem que não a conservadora, visto que é preciso prever um período produtivo, em média, de 25 anos.

B) Dados do *riser*:

São definidas as configurações globais do *riser* (catenária livre, *lazy-wave...*), a seção transversal (tipo de estrutura a ser utilizada) e o modelo hidrodinâmico e estrutural. Na etapa de projeto, essas configurações podem ser alteradas, caso a vida útil em fadiga não atenda aos requisitos propostos. E é fato que, para uma reavaliação da vida útil (extensão), a condição já instalada dificilmente será alterada.

C) Matriz de carregamento:

A matriz de carregamento consiste na definição de todos os potenciais cenários de esforços a que os dutos serão submetidos, desde a fabricação até o descomissionamento. Todos os componentes do *riser* flexível devem ser analisados. A Seção 5 da API 17J [19] confere diretrizes sobre esses cenários.

D) Análise estrutural:

Esta etapa se baseia nos dados levantados nas fases anteriores e, através de análises computacionais comprehende a Análise Global, a Transposição e a Análise Local. As principais formas de promover um aumento na precisão dos resultados referem-se à otimização da malha de elementos finitos, considerações a respeito da tensão nos arames, entre outros.

E) Projeto de fadiga:

Após a definição dos níveis de tensão a que os *risers* serão submetidos, é realizada a análise de fadiga, considerando as curvas S-N para cada cenário provável do anular, efeitos da tensão média (critérios de Goodman, Gerber, Soderberg), fator de segurança e método para o cálculo da vida em fadiga (limite de fadiga, regra de Palmgren-Miner, etc.).

F) Verificação:

Dado o resultado do projeto de fadiga, deve ser verificado se o critério de dano total atende aos requisitos normativos, ou seja, o dano acumulado para todo o tempo de operação previsto deve ser menor do que 1 (falha por fadiga) dividido pelo fator de segurança (definido para cada função).

G) Redução do conservadorismo:

Se o critério do fator de segurança for atendido, a análise está completa. Caso contrário, deverão ser reduzidos alguns conservadorismos (matriz de carregamento, análise estrutural, curvas S-N experimentais, critérios de fadiga) de modo a possibilitar um resultado satisfatório ou, se ainda na fase de projeto, poderão ser revistos critérios construtivos (configuração global, interface, seção transversal), e uma nova análise deverá ser executada (processo iterativo) até que seja concluído o projeto de fadiga.

2.5. Gerenciamento da integridade e segurança operacional

O Programa de Gerenciamento da Integridade (PGI) deve ser capaz de fornecer informações referentes à situação dos objetos do sistema submarino, de forma a garantir a segurança operacional das instalações. A gestão desses dados, ao longo da vida útil das unidades, é importante para subsidiar a tomada de decisão em ocorrências que estejam fora dos requisitos de projeto.

Em geral, a melhor prática da indústria [25] indica para uma estratégia baseada em risco na gestão da integridade dos dutos flexíveis, que foca nas etapas de monitoramento e controle durante toda a vida útil das instalações, tendo como motivação a segurança e a redução dos custos operacionais.

Os critérios de integridade são definidos na fase de projeto e devem levar em consideração os acessos para inspeções, estruturas de testes e técnicas de monitoramento que possam ser aplicadas e cuja performance traga resultados úteis para a definição da real situação de integridade do duto.

A DNV RP-F206 [31] recomenda que o PGI considere etapas para aprendizagem e melhoria contínua para possibilitar a revisão das sistemáticas utilizadas através da avaliação da efetividade e das melhores práticas da indústria. Outro ponto importante a ser avaliado na elaboração do PGI são os requisitos legais impostos por agentes reguladores, que variam global e regionalmente.

O monitoramento de determinadas variáveis faz parte do processo de gestão da integridade dos *risers* flexíveis que, através do acompanhamento de suas respostas estruturais em relação aos possíveis modos de falha, visa aumentar a segurança operacional destes equipamentos.

O objetivo primordial das técnicas de monitoramento e inspeção é detectar, o quanto antes, os mecanismos que levam às falhas, antevendo o avanço dos mesmos e gerando mais segurança operacional e economia nas operações petrolíferas. A descoberta e mapeamento desses mecanismos de falhas são vitais para compreender e projetar *risers* mais resistentes e adequados aos esforços em operações submarinas [22]. O monitoramento de *risers* tem, portanto, os seguintes objetivos:

- a) Detectar antecipadamente a degradação estrutural de forma tal que se possa tomar ações de correção antecipadas e precisas, sem prejuízos de produção, evitando acidentes e/ou perdas de vida, danos ambientais, prejuízos econômicos e paradas operacionais não previstas;
- b) Coletar dados sobre os mecanismos de falha e a forma com que evoluem nas mais diversas condições, o que permite desenvolver novos materiais e novos processos de fabricação;
- c) Previsibilidade de técnicas de inspeção e manutenção do equipamento mais acuradas e focadas no dano gerado.

As principais técnicas de monitoramento, relacionadas ao modo de falha por fadiga, disponíveis no mercado, apresentam em comum objetivo a determinação das condições dos arames da armadura de tração (íntegros ou rompidos) e/ou do anular. Pode-se citar as seguintes técnicas:

- a) Monitoramento por Televisionamento (Emerso/Submerso) [22];
- b) Monitoramento por Colar de Fibra Óptica (Emerso/Submerso) [32];
- c) Monitoramento Óptico Direto no Arame – MODA [9];
- d) Monitoramento por Emissão Acústica [33];

- e) Monitoramento por MAPS (Medição de Tensões Mecânicas por Eletromagnetismo) [34];
- f) Monitoramento por DTS (*Distributed Temperature Sensing*) [35];
- g) Monitoramento de Vibrações (*Monitoring System Based on Vibration*) [36];

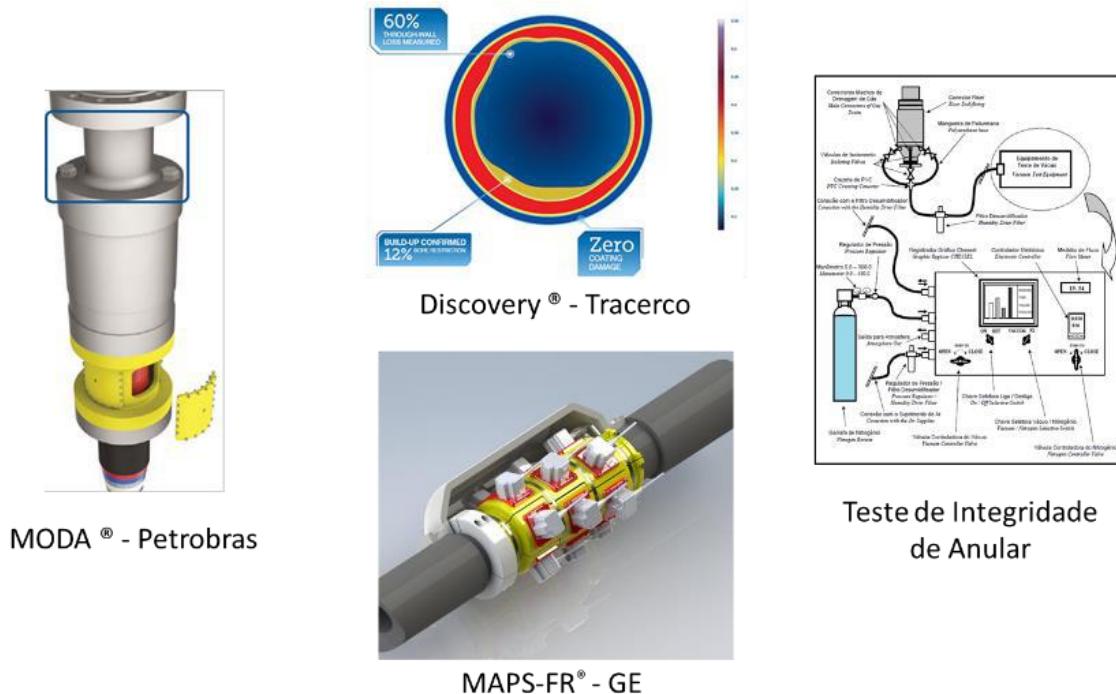


Figura 19: Exemplos de técnicas de monitoramento para dutos flexíveis
Fonte: Acervo de imagem da Petrobras - Modificada.

A tecnologia conhecida como MODA [9] é uma das mais reconhecidas, e premiadas na indústria *offshore* [37] para o monitoramento das consequências geradas pela fadiga em *risers* flexíveis: o rompimento de arames da armadura de tração.

Essa ferramenta baseia-se em uma rede de sensores do tipo *Rede de Bragg* (*fiber Bragg grating sensors - FBS*) afixados em todos os arames da armadura externa de tração, sensores de temperatura, unidade de interrogação e cabos óticos para interligar os instrumentos. A Figura 20 apresenta o esquemático dessa interligação.

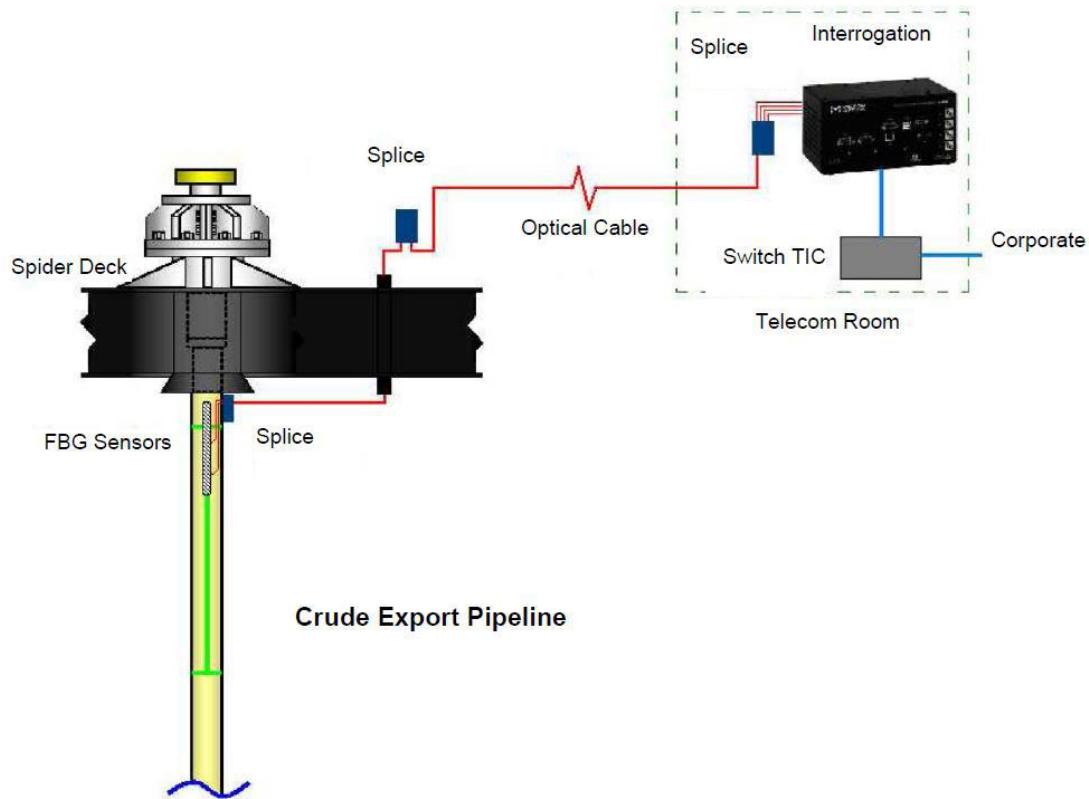


Figura 20: Esquemático da instalação do sistema MODA
Fonte: Morikawa, S., 2010 [9]

Das técnicas citadas, grande parte necessita da instalação de componentes em Área Classificada [38] e/ou intervenção no *riser* flexível, o que leva à exposição do espaço anular a condições mais agressivas, impactando significativamente na vida útil em fadiga. Outra dificuldade para instrumentação de sistemas já instalados, apresentada por Seaman *et al.* [32], é de garantir o acoplamento adequado entre os sensores e o *riser*, que ao longo dos anos podem necessitar de manutenção, onerando ainda mais o projeto.

Por estes motivos, objetiva-se buscar um monitoramento através da menor intervenção nas estruturas já instaladas e que se seja possível obter o histórico de movimentações desde o início da operação.

3. Metodologia

Com o objetivo de possibilitar operações mais seguras nos sistemas submarinos este trabalho propõe que a avaliação da vida útil remanescente em fadiga para *risers* flexíveis, tanto para o período operacional quanto nos cenários de extensão da vida útil de projeto, seja realizada com uma nova abordagem sobre as informações necessárias para a elaboração da Matriz de Carregamento, principalmente para *risers* flexíveis já instalados e sem monitoramento.

A nova abordagem para avaliação da vida útil remanescente em fadiga para *risers* flexíveis proposta nesse trabalho consiste em revisar os dados de entrada dos modelos, revisar os dados de relevantes para a elaboração da Matriz de Carregamento (como pressão interna do fluido, dados meteoceanográficos (onda, vento e corrente) e calado da unidade), ou seja, propõe a aproximação da simulação com as condições reais a que os dutos estiveram expostos.

A título de comparação, a abordagem padrão, no quesito de revisão da vida útil em fadiga, considerando a divisão sugerida na Figura 18, consiste na Redução de Conservadorismo (F) através da revisão do Projeto de Fadiga (E) – uso de Curvas S-N experimentais, alternância entre os métodos de efeitos da tensão média (critérios de *Goodman, Gerber ou Soderberg*) – da redução do fator de segurança e da Análise Estrutural (D) – uso de novos métodos computacionais, refinamento da malha de elementos finitos, métodos de Transposição Global-Local diferenciados. Em resumo, a abordagem padrão está focada no método de cálculo da vida em fadiga.

Em virtude das muitas ocorrências que não podem ser previstas em projeto, tais como longas paradas de produção, alterações no perfil de produção, fenômenos meteorológicos fora do padrão (secas prolongadas ou chuvas intensas, por exemplo), o cerne deste trabalho configura uma nova abordagem nos dados utilizados para o cálculo da vida em fadiga, comparando a Coleta de Dados (A) utilizada na etapa de projeto com os dados reais de operação.

Como principais referências para a presente discussão, pode-se citar Lyons *et al.* [39], que descrevem um monitoramento “semidireto” dos ciclos de carregamento imposto ao *riser* e Nielsen *et al.* [11], que propõem uma abordagem diferenciada para inferência dos esforços nos *risers*.

Em reforço, Nielsen *et al.* [11] afirmam que os movimentos da embarcação e os carregamentos impostos pelas ondas representam as principais informações a serem relacionadas para definição da vida útil em fadiga e, consequentemente, devem ser modeladas com precisão.

Assim sendo, a metodologia proposta por este trabalho consiste na comparação da vida útil em fadiga, quando definida com os dados previstos em projeto e com as reais condições de operação. Para essa comparação é utilizada a base de dados adotada para definir a Matriz de Carregamento (*Load Case Matrix*), conforme indicado na Figura 21, para o cálculo da vida útil em fadiga da fase de projeto (dados previstos) e das condições reais impostas aos *risers*.



Figura 21: Formação da Matriz de Carregamento
Fonte: API 17B, 2014 [20] - Modificado

Através de sensores e processos já instalados na UEP é possível coletar as informações referentes ao fluido interno (pressão), às condições ambientais (onda, vento e corrente), e ao nível de calado da UEP. Estas informações serão comparadas com as previsões de projeto.

Assim, na seção seguinte, serão realizadas duas análises de fadiga, sendo uma com os dados definidos na fase de projeto e outra com os dados reais coletados durante a operação. Essas análises serão realizadas com as variáveis que apresentarem divergências significativas de modo a possibilitar a comparação entre as abordagens e os efeitos das simplificações realizadas.

3.1. Modelo numérico

Visto que a intenção é a comparação da influência de determinadas variáveis, este trabalho optou por manter a configuração do riser flexível, tanto para condição de projeto quanto para a condição real de operação, não realizando as alterações que ocorreram durante a instalação (como por exemplo mudança no TDP ou no ponto de ancoragem da conexão *riser-flow*).

A Figura 22 exibe um esquemático do *riser* em configuração de catenária livre com informações do modelo. E a Figura 23 consiste do modelo com o FPSO, o *riser* e um exemplo dos carregamentos utilizado no ANFLEX [40].

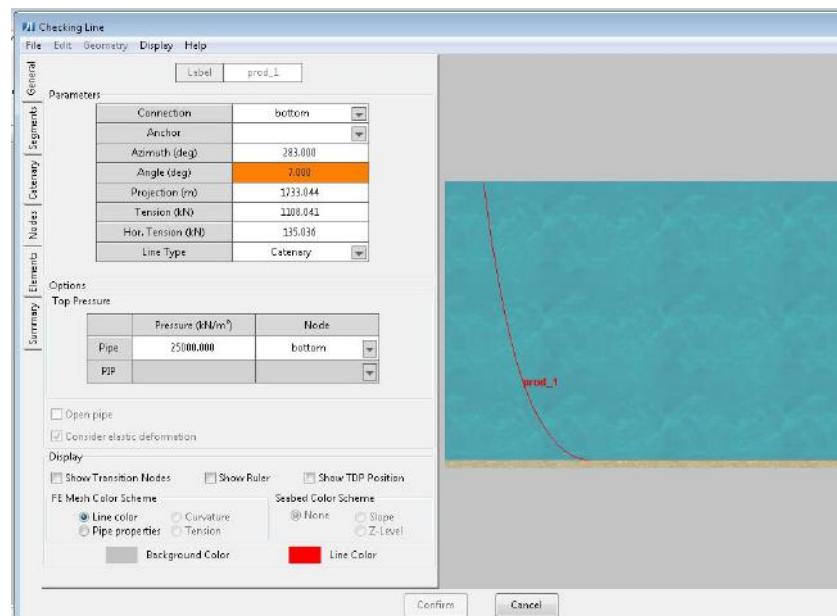


Figura 22: Esquemático do riser em configuração de catenária livre com dados do modelo no ANFLEX

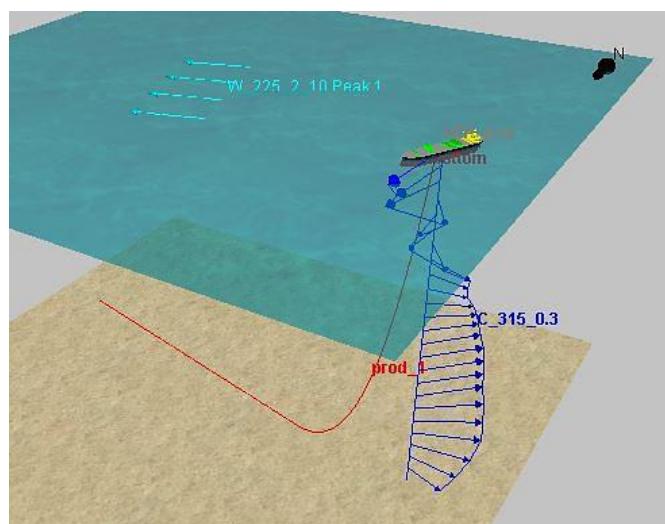


Figura 23: Esquemático do modelo utilizado no ANFLEX (FPSO, *riser* e carregamentos)

O modelo utilizado para a análise de fadiga foi elaborado através do programa ANFLEX [40] e consiste de um FPSO e um *riser* flexível, em catenária livre, conector de topo emerso com enrijecedor desacoplado e contou com as configurações detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2: Dados utilizados na simulação

VARIÁVEL	VALOR	
Lâmina d'água / Profundidade (m)	1256	
Geometria do solo	Horizontal Plano	
Limite de deflexão axial elástica do solo (m)	0,03	
Limite de deflexão lateral elástica do solo (m)	0,001	
Coeficiente de fricção axial do solo	0,4	
Coeficiente de fricção lateral do solo	1,07	
Coeficiente de mola vertical do solo (kN/m)	1e+2	
Comprimento da UEP (m)	310	
Boca da UEP (m)	56	
Altura da UEP (m)	29,5	
Calado (m)	De acordo com o cenário	
Azimute de aproamento da UEP (°)	208	
Azimute de saída do <i>riser</i> (°)	283	
Centro de gravidade (coordenadas locais a partir do centro geométrico da UEP)	X (m)	12,5
	Y (m)	0
	Z (m)	12,9
Ponto de conexão do <i>riser</i> (coordenadas locais a partir do centro geométrico da UEP)	X (m)	56,57
	Y (m)	30
	Z (m)	2,6
Diâmetro externo do <i>riser</i> (m)	0,2775	
Diâmetro interno do <i>riser</i> (m)	0,1524	
Peso vazio emerso do <i>riser</i> (kN/m)	1,232	
Peso vazio submerso do <i>riser</i> (kN/m)	0,6088	
Módulo de elasticidade axial do <i>riser</i> (kN)	5,46e+5	
Módulo de elasticidade à flexão do <i>riser</i> (kN.m ²)	7,14e+1	
Módulo de elasticidade torcional do <i>riser</i> (kN.m ²)	4,1e+1	
Diâmetro externo do <i>flowline</i> (m)	0,2775	
Diâmetro interno do <i>flowline</i> (m)	0,1524	
Peso vazio emerso do <i>flowline</i> (kN/m)	0,12	
Peso vazio submerso do <i>flowline</i> (kN/m)	0,055	
Módulo de elasticidade axial do <i>flowline</i> (kN)	5,41e+5	
Módulo de elasticidade à flexão do <i>flowline</i> (kN.m ²)	6,98e+1	
Módulo de elasticidade torcional do <i>flowline</i> (kN.m ²)	3,79e+1	
Ângulo de topo do <i>riser</i>	7°	
Peso específico do fluido interno (kN/m ²)	9,46	

A malha de elementos finitos utilizada foi discretizada de acordo com a região de importância, sendo mais refinada no topo do *riser* e mais grosseira quando aproximada da região do *flowline*, conforme Tabela 3. Esta simplificação ocorreu em razão do tempo computacional necessário para a realização das simulações.

Tabela 3: Malha de elementos finitos utilizada nas simulações no programa ANFLEX

Seguimento tipo	Extensão do segmento (m)	Número de elementos da malha	Comprimento do elemento de topo da malha (m)	Comprimento do elemento de fundo da malha (m)
1 <i>flowline</i>	755	302	2	3
2 <i>riser de fundo</i>	1004	669	1	2
3 <i>riser de topo</i>	898	1436	0,25	1

3.2. Dados

Nesta seção são apresentadas, comparadas e avaliadas as variáveis necessárias para compor a Matriz de Carregamento (Figuras 21 e 24).

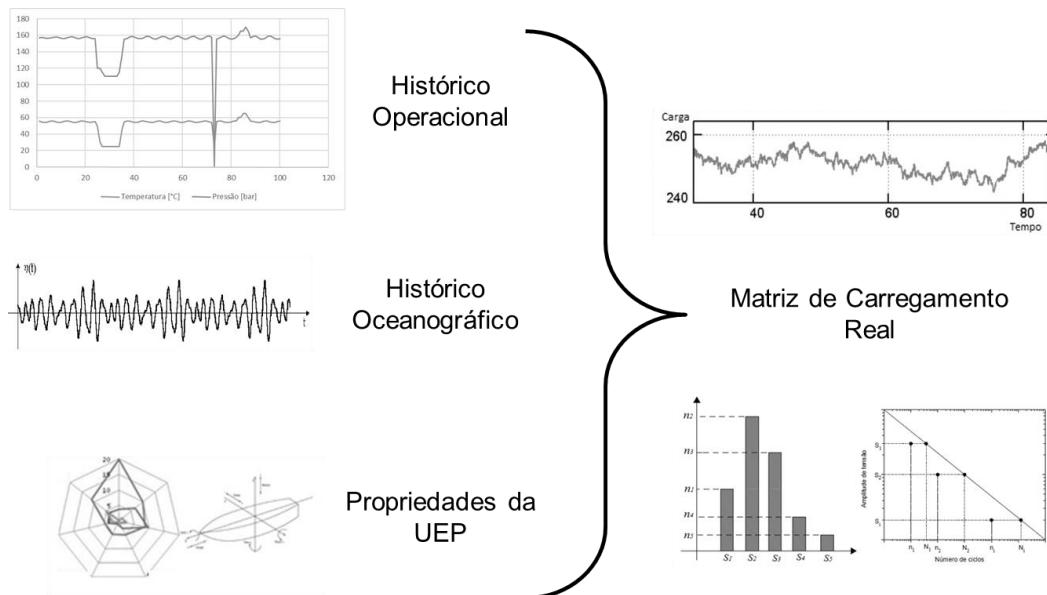


Figura 24: Esquemático da metodologia: uso de dados reais

Foram consideradas as seguintes variáveis:

- I. Fluido interno
 - a. Pressão
- II. Movimentação da unidade
 - a. Calado
- III. Meio ambiente (Histórico Oceanográfico):
 - a. VENTO: Velocidade e Direção
 - b. ONDA: Altura Significativa e Período de Pico Primário
 - c. ONDA: Altura Significativa e Direção Preferencial
 - d. CORRENTE: Intensidade de Corrente Superficial e Direção

Adotou-se as convenções do Sistema Internacional de Unidades (S.I.), UNESCO-IOC (*Intergovernmental Oceanographic Commission*) e WMO (*World Meteorological Organization*), onde:

- Para VENTO e ONDA a direção indica de onde vem (no sentido horário com origem no Norte Verdadeiro 0°);
- Para CORRENTE a direção indica para onde vai (no sentido horário com origem no Norte Verdadeiro 0°).

3.2.1. Fluido interno

As medições de pressão, apresentados na Tabela 4 e na Figura 25, foram obtidas no período de abril de 2013 a outubro de 2017, com intervalos regulares de 1 (uma) hora, totalizando 39.500 pontos de interesse. As medições foram obtidas por transmissores localizados a jusante do duto de produção (na chegada da produção à UEP), podendo ser consideradas como valores representativos da pressão interna no topo do *riser* flexível.

Tabela 4: Distribuição das medições de pressão de operação

Pressão de operação (bar)	Número de eventos	Percentual de ocorrência (%)	Distribuição acumulada (%)
[0,5)	2453	6,2%	6%
[5,10)	1019	2,6%	9%
[10,15)	15262	38,8%	48%
[15,20)	6076	15,4%	63%
[20,25)	3845	9,8%	73%
[25,30)	3923	10,0%	83%
[30,35)	2670	6,8%	90%
[35,40)	1991	5,1%	95%
[40,45)	713	1,8%	96%
[45,50)	525	1,3%	98%
[50,55)	96	0,2%	98%
[55,240)	777	2,0%	100%

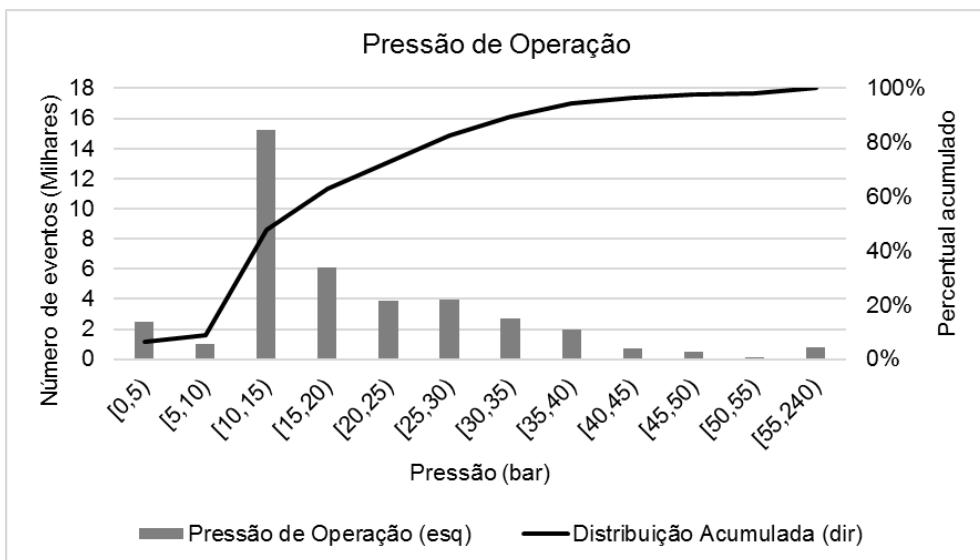


Figura 25: Distribuição do histórico de pressão operacional

Dada a concentração dos eventos (95%) no intervalo de 0 a 40 bar, a Figura 26 traz uma discretização (classes com amplitude de 0,25 bar) dessas ocorrências de modo a proporcionar uma melhor análise das pressões mais recorrentes. E, baseado na distribuição dos eventos é possível concluir que 4 (quatro) grupos de dados representam os principais pontos de ocorrência, sendo definidos pelos intervalos: i) 0-3,75 bar; ii) 10-11,25 bar; iii) 11,25-16,25 bar; iv) 16,25-40 bar.

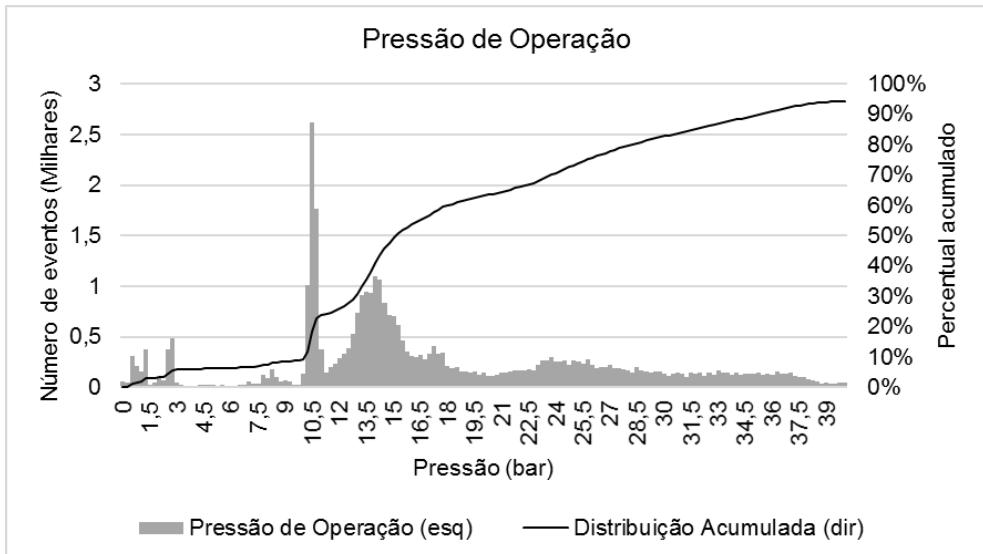


Figura 26: Distribuição discretizada do histórico de pressão operacional

Para cada classe de 0,25 bar foi calculada a Moda pelo método King [41] conforme a Equação (5).

$$Mo_{King_i} = l_i + \left[c \times \left(\frac{f_{post}}{f_{post} + f_{ant}} \right) \right] \quad (5)$$

onde:

Mo_{King_i} – Moda King para a classe i ;

l_i – Limite inferior da classe modal;

c – Amplitude das classes;

f_{post} – Frequência da classe imediatamente posterior à classe modal;

f_{ant} - Frequência da classe imediatamente anterior à classe modal;

Para cada um dos 4 (quatro) grupos significativos é definido o valor da pressão representativa multiplicando o valor da Moda pela frequência de ocorrência de cada classe, conforme a Equação (6).

$$P_{repres_grupo_k} = \frac{\sum_i Mo_{King_i} \times f_i}{\sum_k f_i} \quad (6)$$

onde:

$P_{repres_grupo_k}$ – Pressão representativa do Grupo Significativo;

Mo_{King_i} – Moda King para a classe i ;

f_i – Frequência da classe modal i ;

A pressão representativa para cada grupo, assim como sua frequência de ocorrência, é indicada na Tabela 5. Estes dados, quatro níveis de pressão com as respectivas frequências de ocorrências, foram utilizados nas simulações para a condição real de operação.

Tabela 5: Grupos significativos de pressão de operação utilizada nas simulações para a condição real

Grupo significativo	Intervalo (bar)	Pressão representativa (bar)	Ocorrência
i	0 - 3,75	1,81	6,6%
ii	10 - 11,25	10,68	16,5%
iii	11,25 - 16,25	14,01	33,1%
iv	16,25 - 40	26,15	43,8%

Para a análise referente à condição de projeto, este trabalho utilizou 1 (um) nível de pressão operacional para todos os cenários, conforme definido na fase de projeto do riser flexível.

Tabela 6: Pressão de operação utilizada nas simulações para a condição de projeto

Pressão de operação (bar)	Ocorrência
20	100%

3.2.2. Calado da unidade

As medições do calado, apresentadas na Figura 27, foram obtidas no período de abril de 2013 a outubro de 2017, com intervalos regulares de 1 (um) dia, totalizando 1.650 pontos de interesse. As medições foram obtidas da estação localizada a meia-nau e foram tratadas conforme a distribuição de níveis (Vazio, Intermediário 1, Intermediário 2 e Cheio) e disposição RAO (Vazio, Intermediário e Cheio).

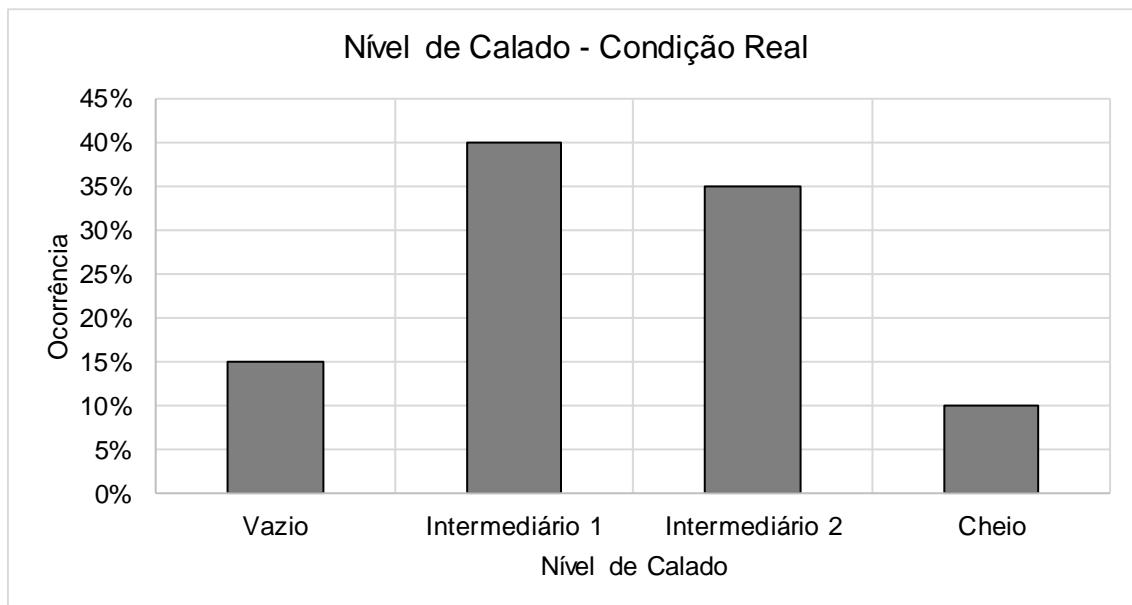


Figura 27: Distribuição das medições do calado nas condições operacionais

Como existem 3 (três) RAO para esta UEP, a distribuição da Figura 27 foi reequilibrada, sendo o resultado apresentado na Tabela 7 e utilizada no cálculo da probabilidade de ocorrência de cada Estado de Mar. De forma equivalente à pressão interna do fluido, este trabalho replicou a escolha distribuição do calado utilizada para condição de projeto, apresentada na Tabela 8.

Tabela 7: Distribuição do calado nas condições operacionais utilizada nas simulações

Nível	Ocorrência
Vazio	20%
Intermediário	60%
Cheio	20%

Tabela 8: Distribuição do calado para a condição de projeto

Nível	Ocorrência
Intermediário	100%

3.2.3. Dados ambientais (histórico oceanográfico)

Os dados ambientais reais foram coletados na UEP no período de maio de 2011 a outubro de 2016, com intervalos regulares de 1 (uma) hora, totalizando mais de 35.000 amostras de vento, onda e corrente.

Por convenção, foram adotados os seguintes critérios de classificação (direção e escala) para os dados ambientais (tanto para os dados de projeto quanto para os dados coletado).

Direção: identificada considerando a origem no Norte Verdadeiro (0° de azimute cartográfico), os 4 (quatro) pontos cardinais e 4 (quatro) colaterais (N, NE, E, SE, S, SW, W e NW). Cada subdivisão corresponde a 45° de azimute. A Figura 28 ilustra uma representação esquemática da rosa dos ventos, com as 8 subdivisões, e a Tabela 9 indica os intervalos que foram utilizados no tratamento dos dados coletados.

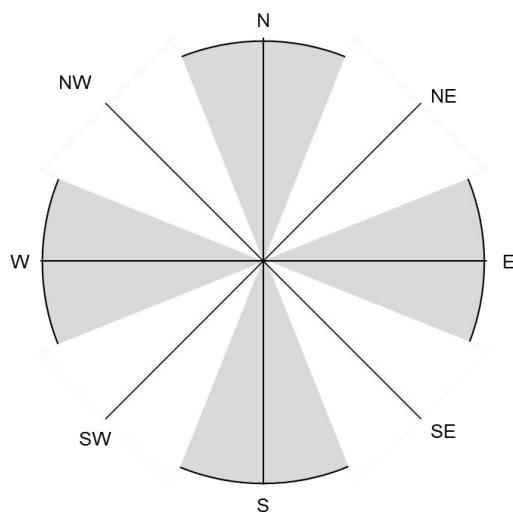


Figura 28: Esquemático da Rosa dos Ventos

Tabela 9: Intervalos utilizados nas subdivisões das direções

Direção	Início	Centro	Fim
N	$337,5^\circ$	0°	$22,5^\circ$
NE	$22,5^\circ$	45°	$67,5^\circ$
E	$67,5^\circ$	90°	$112,5^\circ$
SE	$112,5^\circ$	135°	$157,5^\circ$
S	$157,5^\circ$	180°	$202,5^\circ$
SW	$202,5^\circ$	225°	$247,5^\circ$
W	$247,5^\circ$	270°	$292,5^\circ$
NW	$292,5^\circ$	315°	$337,5^\circ$

Escalas: Para cada variável ambiental foi utilizada uma escala de subdivisão mais apropriada aos dados coletados.

Tabela 10: Escalas de medição para as variáveis ambientais

Variável Ambiental		Unidade	Mínimo	Máximo	Subdivisão
Vento	Velocidade	m/s	0	24	1
Onda	Período de Pico (Tp)	s	0	24	2
	Altura Significativa (Hs)	m	0	12	0,5
Corrente	Velocidade	m/s	0	1,2	0,1

No Anexo são apresentados os dados para as condições ambientais utilizados na fase de projeto e os reais coletados na UEP. Uma análise comparativa é realizada após cada seção de gráficos.

Além da comparação dos eventos ocorridos com as condições previstas na fase de projeto, é importante avaliar a ocorrência dos eventos extremos que são responsáveis por elevados níveis de tensão.

As Figuras de 29 a 35 apresentam as médias dos dados coletados e os valores extremos para cada par de altura significativa (Hs) e período de pico primário (Tp).

As curvas “Anual” (pontilhada) e “Centenária” (contínua) representam os valores das ondas extremas com tempo de recorrência de 1 (um) e 100 (cem) anos, respectivamente.

De acordo com Brooke [42], a onda centenária é uma combinação cuja probabilidade de ser alcançada ou excedida é de 63% no intervalo de um século.

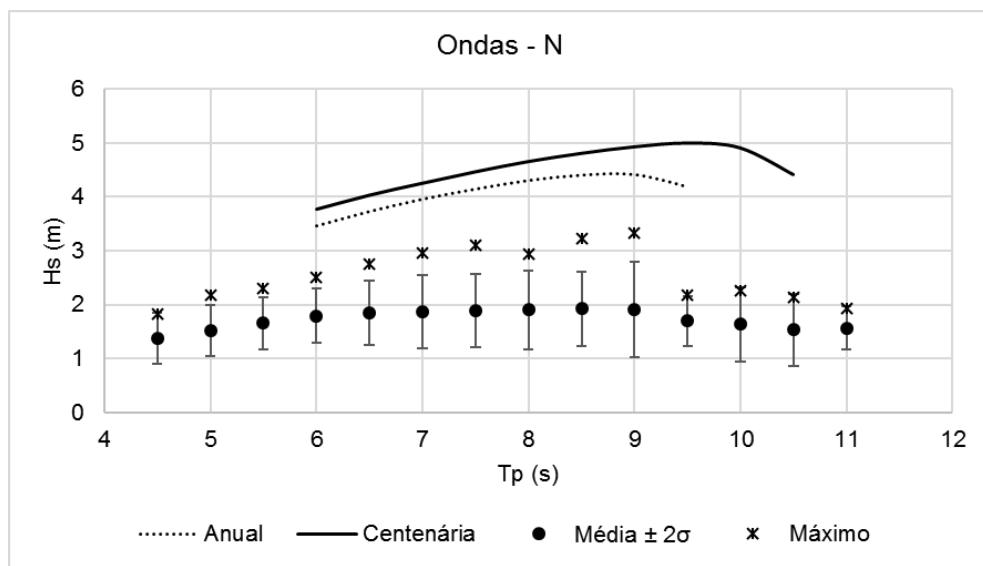


Figura 29: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de norte

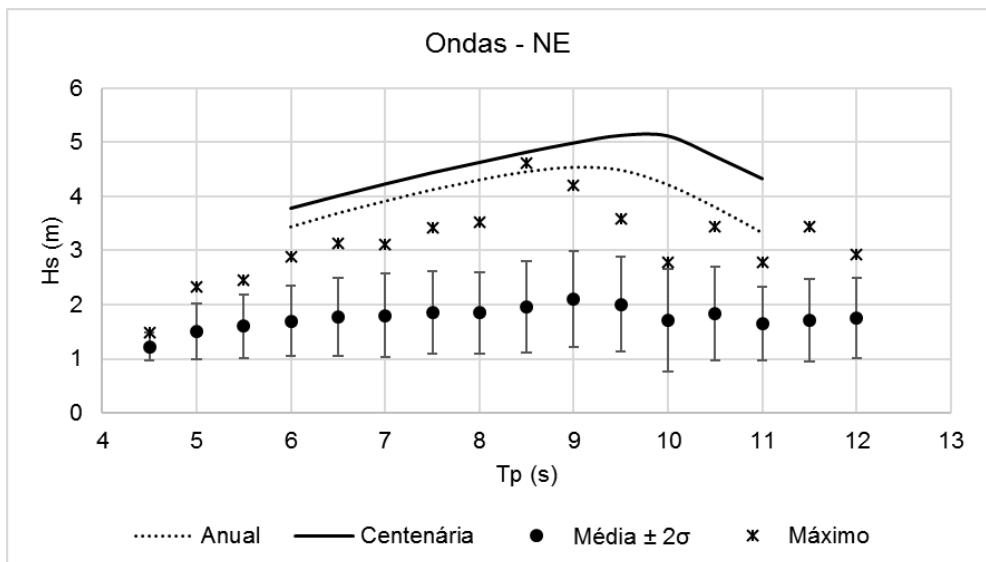


Figura 30: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de nordeste

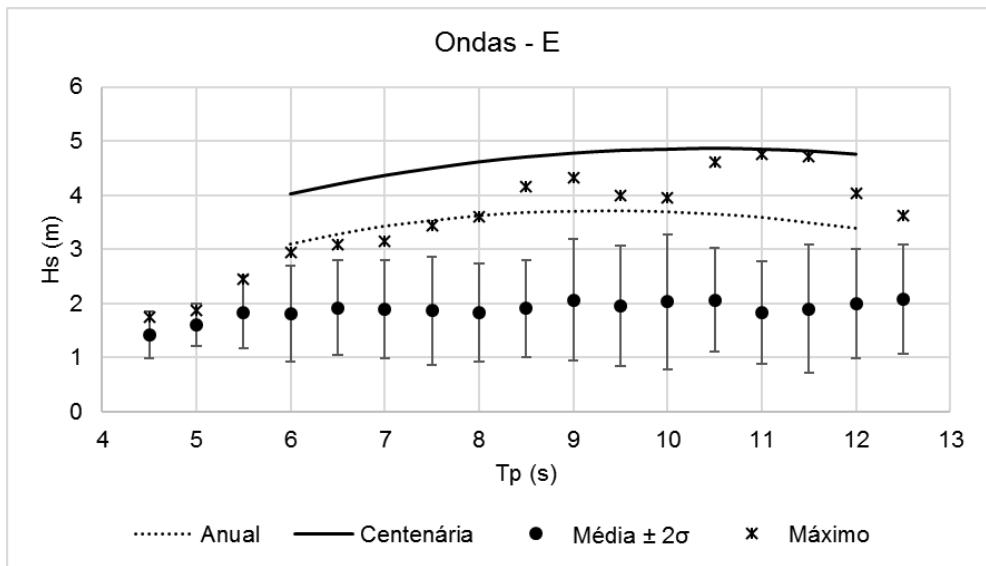


Figura 31: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de leste

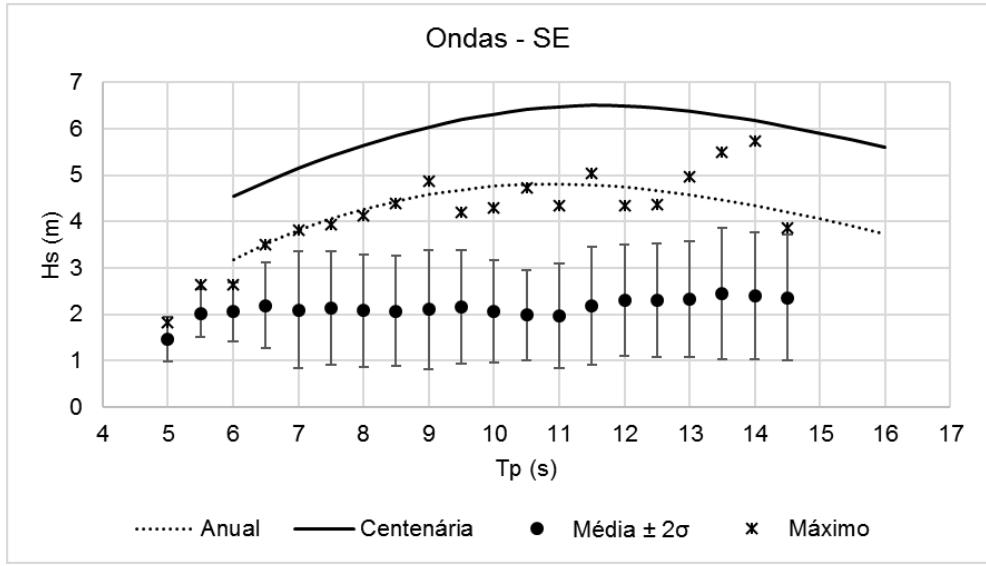


Figura 32: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de sudeste

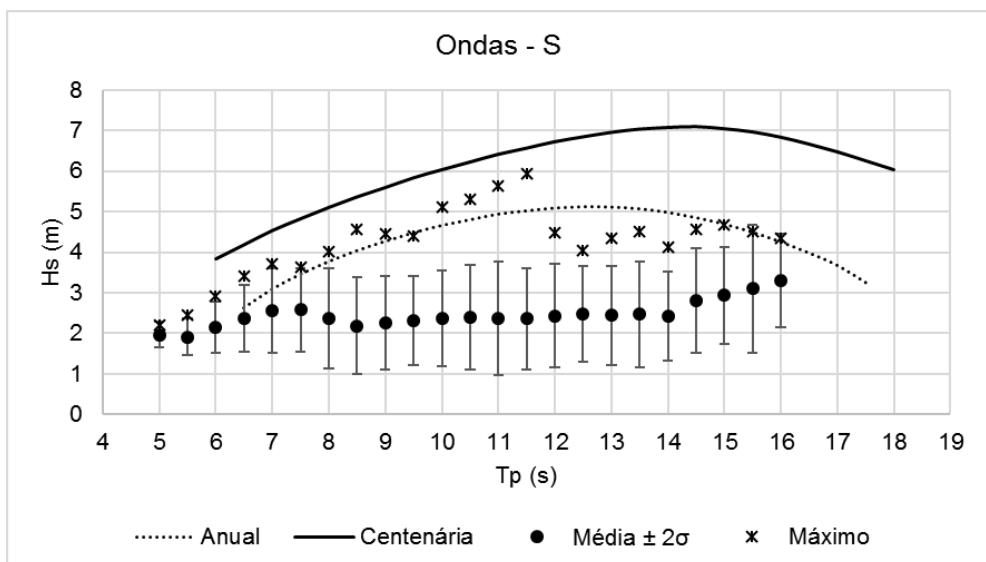


Figura 33: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de sul

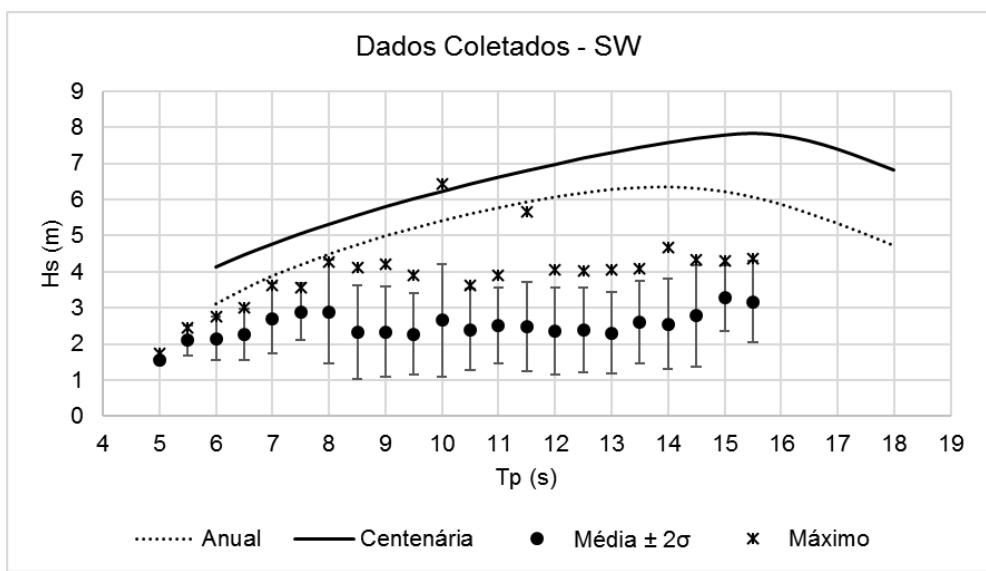


Figura 34: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de sudoeste

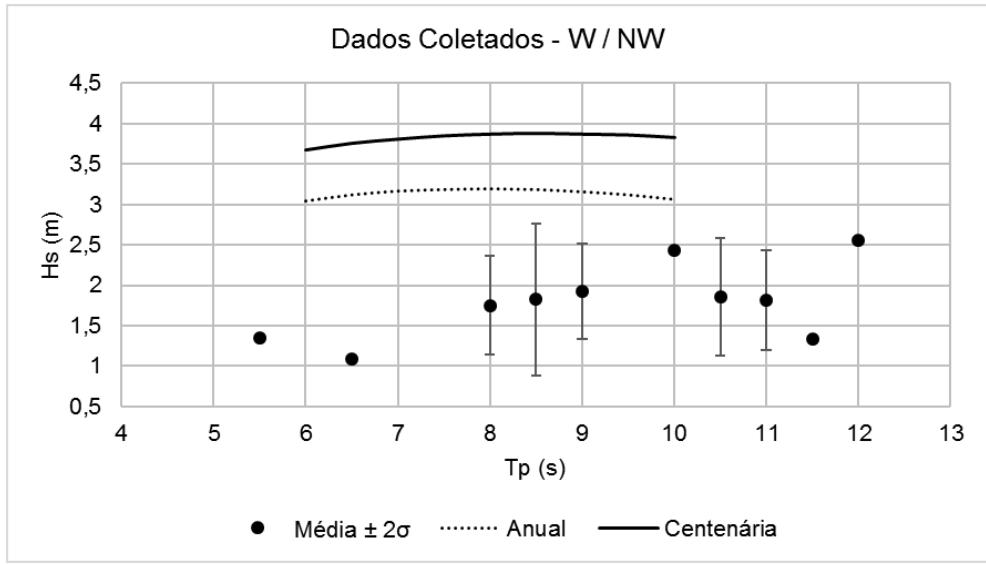


Figura 35: Curva de Extremos e dados coletados – Ondas vindo de oeste e noroeste

Observar-se, nas Figuras de 29 a 35, a presença de eventos extremos acima da curva de retorno anual para vários dos pares Hs e Tp, havendo em alguns casos, como o caso da direção leste (Figura 31), a presença de ondas equivalentes à onda centenária. Adicionalmente, pode ser verificado na Figura 85 do Anexo, as ondas vindas de nordeste, leste, sudeste e sul que apresentam, nesta sequência, os maiores índices de ocorrências.

Esses acontecimentos reforçam a necessidade da realização de uma abordagem mais proativa quanto ao acúmulo do dano por fadiga nos *risers* flexíveis, já que tais eventos impõem uma elevada variação no nível de tensão a que estes objetos estão expostos.

Mas, em linhas gerais, é possível observar que, mesmo considerando um intervalo de confiança de dois desvios padrão – correspondendo a 92,8% dos dados coletados –, os pares de Hs e Tp encontram-se bem abaixo das curvas anuais, o que pode significar um menor acúmulo de dano por fadiga.

Os impactos desta divergência serão avaliados em simulação específica e discutidos na Seção 4.1, bem como comparados às condições previstas em projeto.

3.2.4. Eventos de simultaneidade

Como, para o vento, há um comportamento equivalente das medições reais com as condições de projeto, somente foram consideradas as variáveis de onda e corrente nas análises de simultaneidade.

Após a análise isolada das variáveis ambientais (onda e corrente) é importante determinar como estas variáveis se relacionam. Assim as variáveis foram correlacionadas de acordo com o momento do acontecimento. A Tabela 11 apresenta um exemplo dessa correlação.

Tabela 11: Exemplo de correlação das variáveis ambientais com o tempo

Data	Hora	Hs (m)	Tp (s)	Direção de onda (°)	Velocidade corrente (m/s)	Direção corrente (°)
03/05/2011	13:00:00	1,62	8,69	32,78	0,3	123,94
03/05/2011	14:00:00	1,56	9,06	82,04	0,18	112,02
03/05/2011	15:00:00	1,74	8,65	75,1	0,19	72,93
03/05/2011	16:00:00	1,88	8,58	81,91	0,18	71,16
03/05/2011	17:00:00	1,92	9,1	118,57	0,27	72,73
03/05/2011	18:00:00	2,15	8,5	nan	0,28	51,42
03/05/2011	19:00:00	2,06	8,7	nan	0,19	32,01
03/05/2011	20:00:00	2,24	8,53	108,67	0,13	50,86
03/05/2011	21:00:00	2,21	8,59	130,34	0,16	30,46
03/05/2011	22:00:00	2,55	8,57	103,34	0,16	26,04
03/05/2011	23:00:00	2,42	8,66	nan	0,04	302,53
04/05/2011	00:00:00	2,46	8,57	109,07	0,04	269,64
04/05/2011	01:00:00	2,33	8,52	nan	0,07	211,06
04/05/2011	02:00:00	2,28	8,39	83,99	0,08	227,34
04/05/2011	03:00:00	2,27	8,58	103,63	0,12	167,12
04/05/2011	04:00:00	2,21	12,9	78,28	0,19	141,48
04/05/2011	05:00:00	2,3	13,97	88,53	0,41	128,08
04/05/2011	06:00:00	2,09	13	96,31	0,35	127,13
04/05/2011	07:00:00	2,23	12,99	129,99	0,43	132,52
04/05/2011	08:00:00	2,14	13,09	151,45	0,14	141,43
04/05/2011	09:00:00	2,26	12,97	131,7	0,21	135,27

Ainda da Tabela 11 é possível observar a presença de pontos com falhas na coleta de alguma variável, apresentados por “nan” (*not a number*). Esses casos foram tratados como erros de coleta de dados e desconsiderados das análises.

De forma a facilitar a compreensão destas ocorrências, as medições foram transformadas em faixas de classificação conforme subdivisões apresentadas na Tabela 10. Essa correlação, sem a presença de falhas na coleta, forma um evento. Foram estabelecidos 30.146 eventos, equivalentes a 1.256 dias. A Tabela 12 apresenta um exemplo das medições classificadas e da formação dos eventos.

Tabela 12: Exemplo de classificação das variáveis e definição dos eventos

Data	Hora	Hs_class	Tp_class	Dir_onda class	Veloc. corrente class	Dir corrente class	Evento
03/05/2011	13:00:00	4	5	NE	3	SE	4.5.NE.3.SE
03/05/2011	14:00:00	4	5	E	2	E	4.5.E.2.E
03/05/2011	15:00:00	4	5	E	2	E	4.5.E.2.E
03/05/2011	16:00:00	4	5	E	2	E	4.5.E.2.E
03/05/2011	17:00:00	4	5	SE	3	E	4.5.SE.3.E
03/05/2011	18:00:00	5	5	nan	3	NE	nan
03/05/2011	19:00:00	5	5	nan	2	NE	nan
03/05/2011	20:00:00	5	5	E	2	NE	5.5.E.2.NE
03/05/2011	21:00:00	5	5	SE	2	NE	5.5.SE.2.NE
03/05/2011	22:00:00	6	5	E	2	NE	6.5.E.2.NE
03/05/2011	23:00:00	5	5	nan	1	NW	nan
04/05/2011	00:00:00	5	5	E	1	W	5.5.E.1.W
04/05/2011	01:00:00	5	5	nan	1	SW	nan
04/05/2011	02:00:00	5	5	E	1	SW	5.5.E.1.SW
04/05/2011	03:00:00	5	5	E	2	S	5.5.E.2.S
04/05/2011	04:00:00	5	7	E	2	SE	5.7.E.2.SE
04/05/2011	05:00:00	5	7	E	5	SE	5.7.E.5.SE
04/05/2011	06:00:00	5	7	E	4	SE	5.7.E.4.SE
04/05/2011	07:00:00	5	7	SE	5	SE	5.7.SE.5.SE
04/05/2011	08:00:00	5	7	SE	2	SE	5.7.SE.2.SE
04/05/2011	09:00:00	5	7	SE	3	SE	5.7.SE.3.SE

Após a formação dos eventos, estes foram contabilizados em virtude de suas repetibilidades e ordenados de forma decrescente. Foram encontrados 4.072 eventos exclusivos. A Tabela 13 apresenta os 15 eventos exclusivos com mais repetibilidade, totalizando 2.098 ocorrências, o que representa 6,96% de todas as ocorrências.

Tabela 13: Exemplo de contagem dos eventos formados

Evento	Quant.	Acumulado	Ocorrência do evento (%)	Acumulado (%)	Dias equivalente
4.5.E.3.S	221	221	0,73%	0,73%	9,21
4.5.NE.3.S	186	407	0,62%	1,35%	7,75
4.4.NE.4.S	169	576	0,56%	1,91%	7,04
4.5.NE.4.S	167	743	0,55%	2,46%	6,96
4.4.NE.5.S	146	889	0,48%	2,95%	6,08
5.5.NE.4.S	141	1030	0,47%	3,42%	5,88
4.5.E.4.S	139	1169	0,46%	3,88%	5,79
5.5.NE.5.S	137	1306	0,45%	4,33%	5,71
4.5.NE.5.S	136	1442	0,45%	4,78%	5,67
4.4.NE.3.S	133	1575	0,44%	5,22%	5,54
4.5.NE.2.S	130	1705	0,43%	5,66%	5,42
3.4.NE.4.S	112	1817	0,37%	6,03%	4,67
4.5.E.2.S	99	1916	0,33%	6,36%	4,13
4.5.E.3.SW	91	2007	0,30%	6,66%	3,79
5.5.NE.3.S	91	2098	0,30%	6,96%	3,79

De forma a facilitar a compreensão da Tabela 13, as colunas “Ocorrência do evento (%)” e “Acumulado (%)” são apresentados na Figura 36, com detalhamento nas Figuras 37, 38 e 39, dos 500, 200 e 100 eventos mais recorrentes, respectivamente.

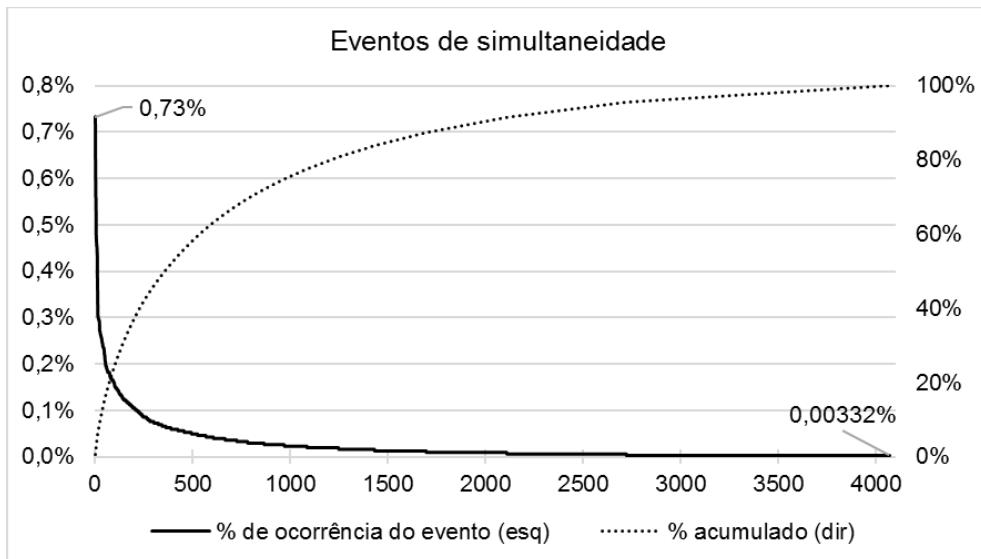


Figura 36: Ocorrência dos eventos de simultaneidade

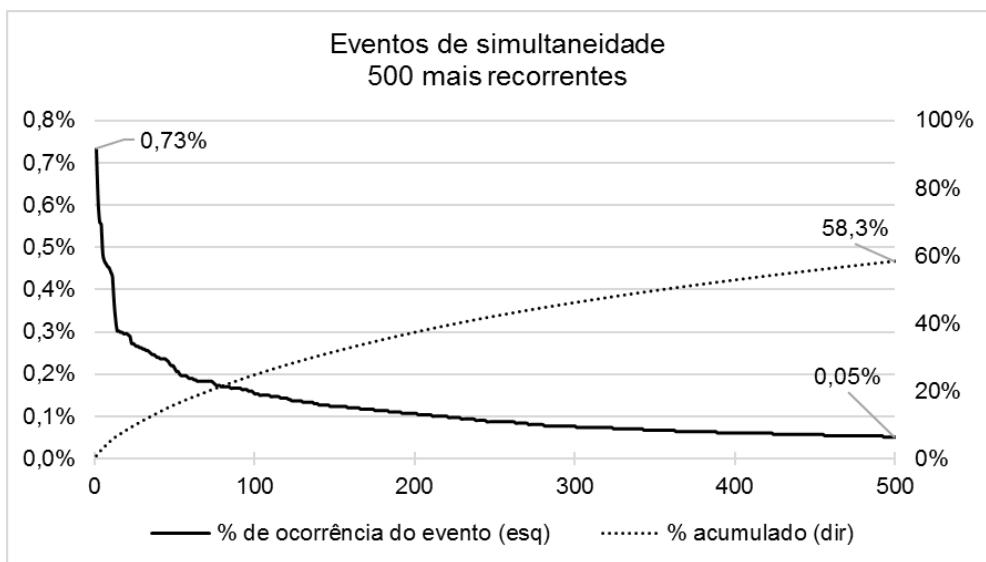


Figura 37: Ocorrência dos eventos de simultaneidade – 500 mais recorrentes

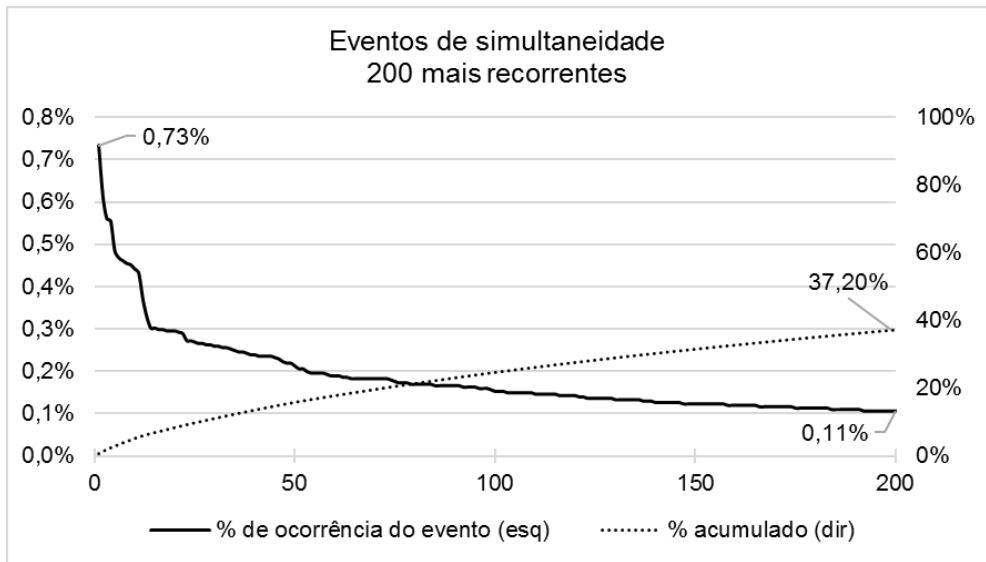


Figura 38: Ocorrência dos eventos de simultaneidade – 200 mais recorrentes

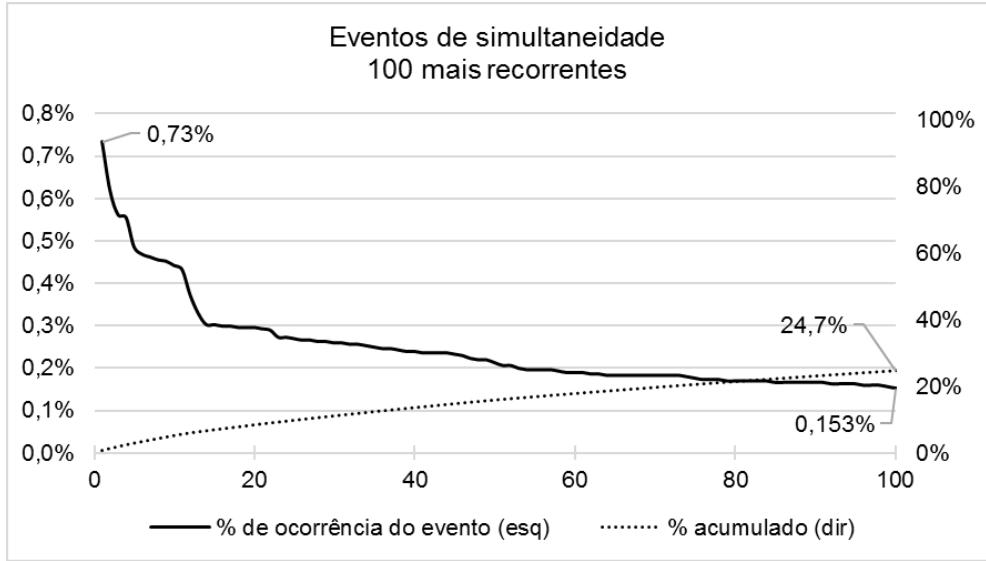


Figura 39: Ocorrência dos eventos de simultaneidade – 100 mais recorrentes

Após esse detalhamento, os 200 eventos mais recorrentes foram comparados com todos os dados coletados, de forma a verificar se estes seriam representativos de todo o período amostral. Essas comparações podem ser observadas nas Figuras de 40 a 44.

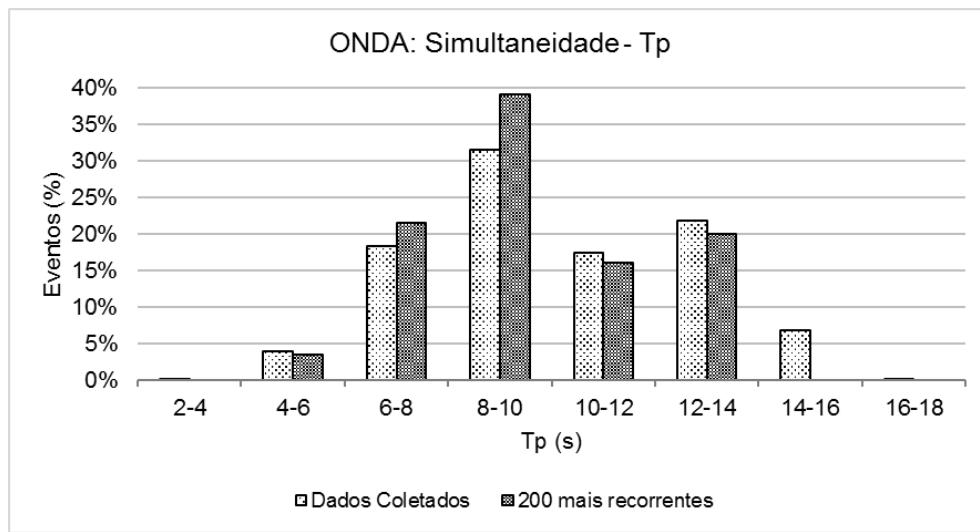


Figura 40: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Onda – Tp

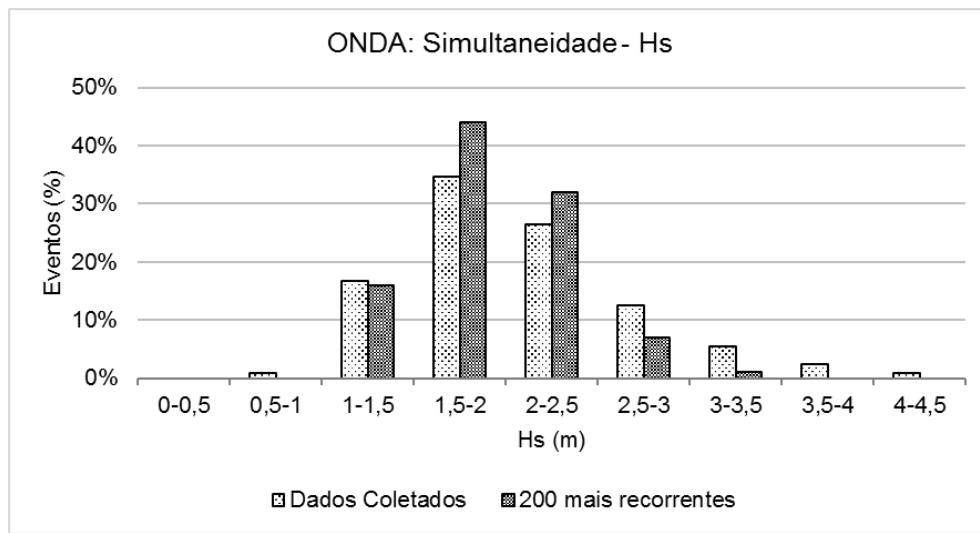


Figura 41: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Onda – Hs

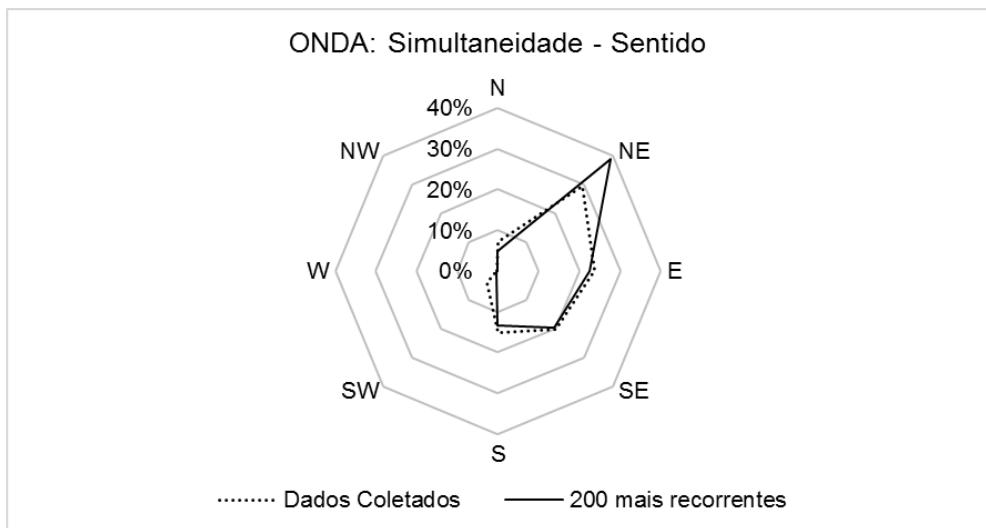


Figura 42: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Onda – Sentido

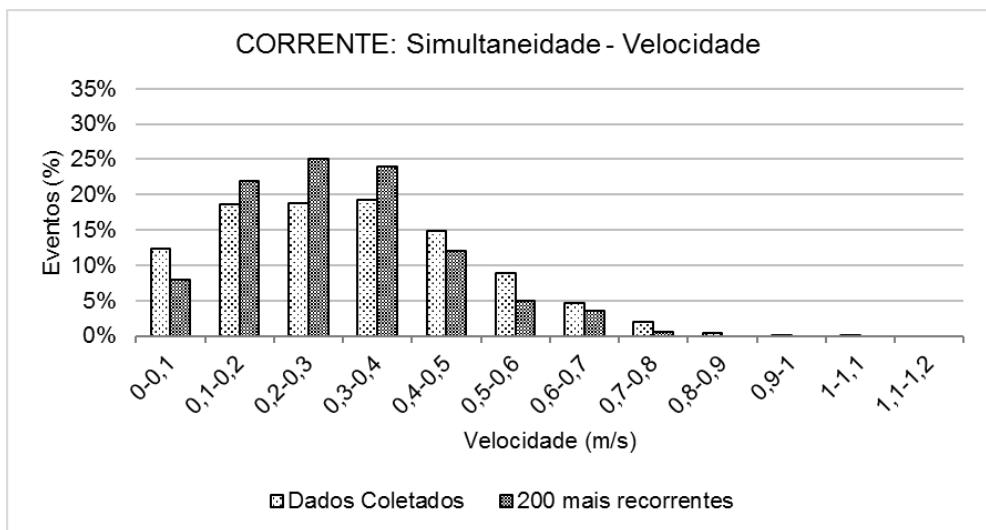


Figura 43: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Corrente – Velocidade

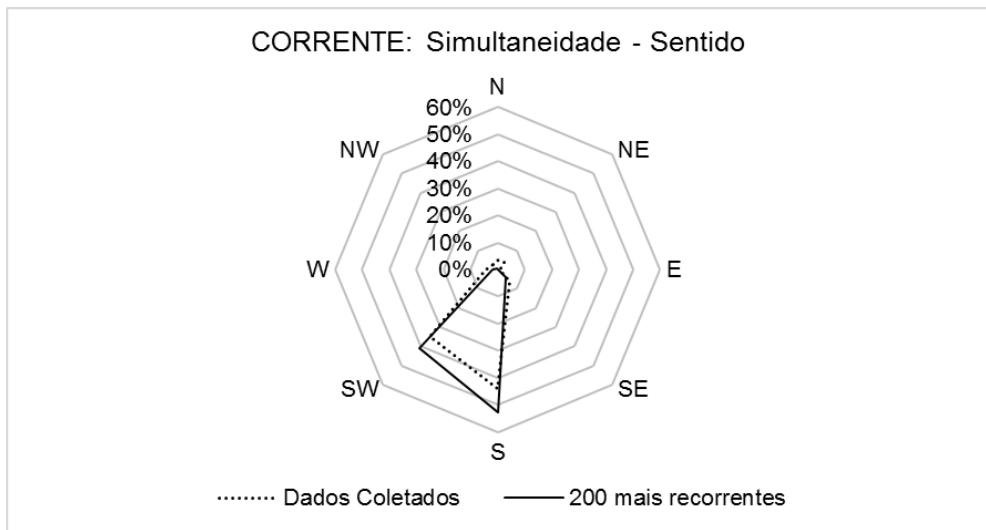


Figura 44: Comparação dos 200 eventos mais recorrentes com todos os dados coletados – Corrente – Sentido

Essa análise corrobora que os 200 eventos mais recorrentes podem ser considerados como representativos de todas amostras coletadas, visto que apresentam distribuição e ocorrências similares. Essa consideração reduz significativamente, de 44.068 para 200, a quantidade de cenários a serem simulados.

3.3. Condições de projeto e eventos de simultaneidade

Para a realização das simulações é necessário definir as combinações de onda, vento, corrente e probabilidade de ocorrência de cada cenário. Estes cenários são definidos como Estados de Mar.

Na fase de projeto, com o objetivo de reduzir tempo e custos computacionais, as simulações utilizam combinações das variáveis ambientais de forma a reproduzir cenários representativos e de cargas extremas. Assim, os Estados de Mar definidos podem divergir, em parte, até das configurações ambientais indicadas para o projeto. Essas decisões são suportadas pela utilização dos fatores de segurança, conforme demonstrado na Figura 18.

A Figura 45 define os sentidos (ângulos) e direções (letras) de incidência das variáveis ambientais. Essa avaliação faz-se necessária para evitar conclusões equivocadas. Isso ocorre devido ao eixo de simetria (popa-proa) que existe na unidade, ou seja, uma onda que incide a 90° (de boreste para bombordo) é equivalente a uma que incide a 270° (de bombordo para boreste).

As Figuras de 46 a 52 compararam as divergências entre a amostra com os 200 eventos de simultaneidade mais recorrentes e as configurações utilizadas nas análises de projeto.

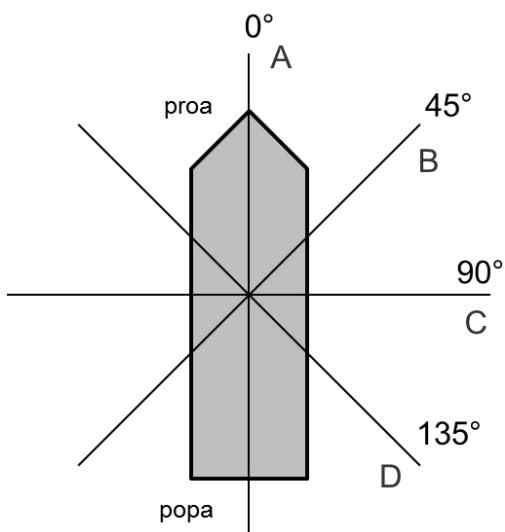


Figura 45: Definição dos Sentidos e Direções de incidência das condições ambientais na UEP

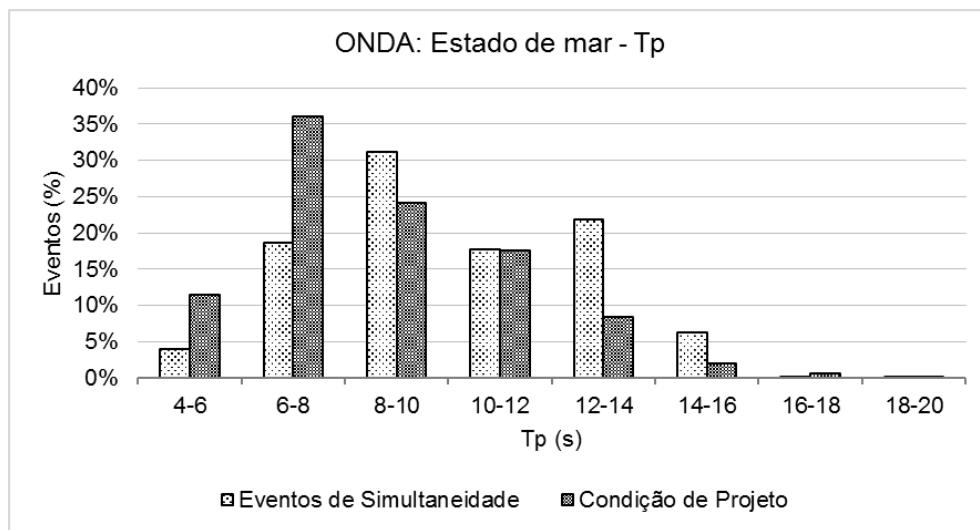


Figura 46: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda – Tp

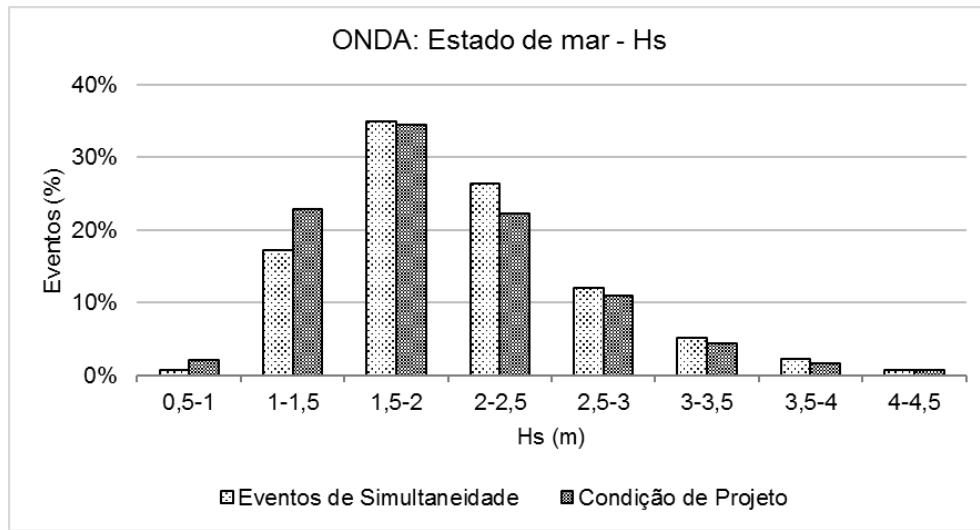


Figura 47: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda - Hs

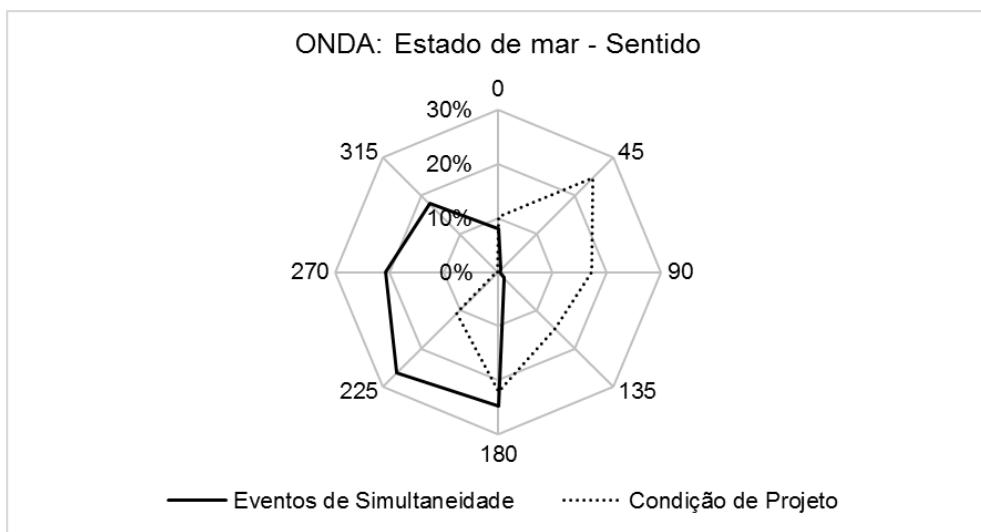


Figura 48: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda – Sentido

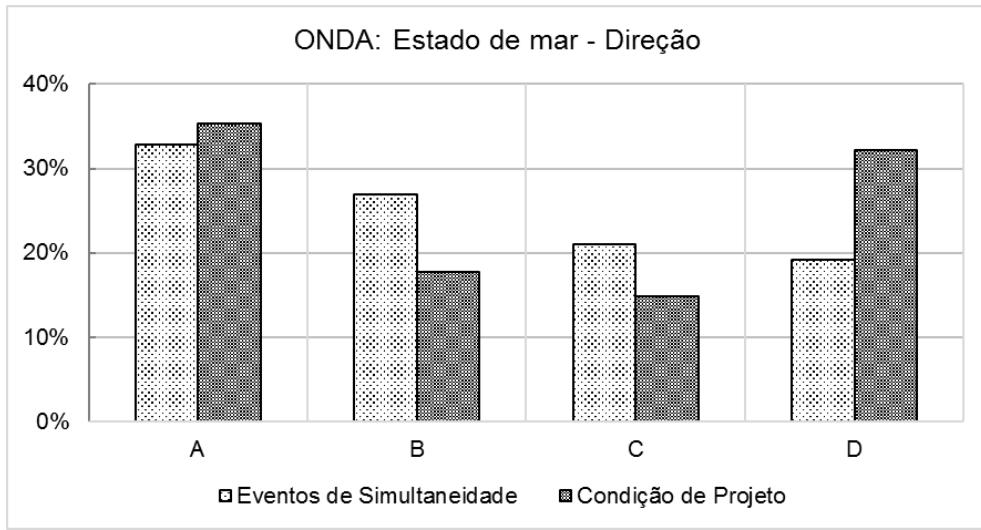


Figura 49: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Onda – Direção

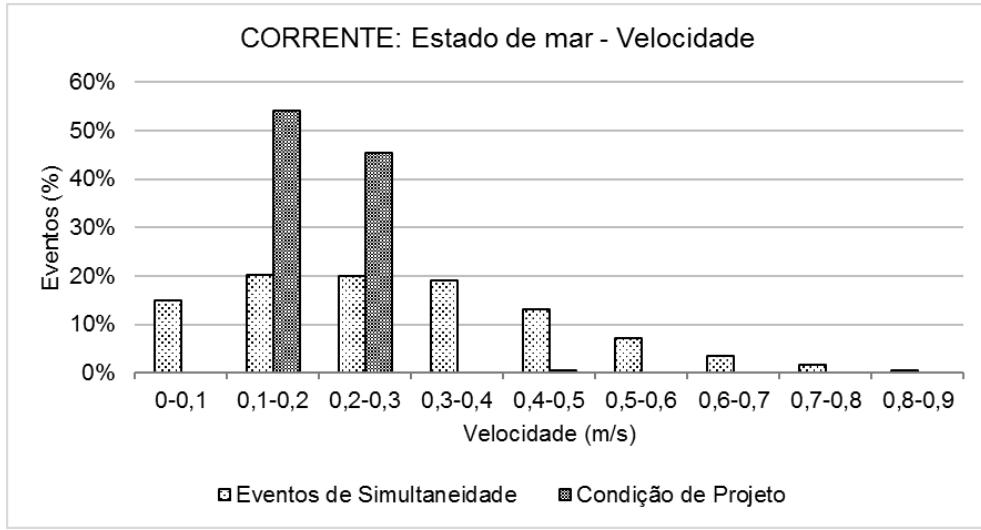


Figura 50: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Corrente - Velocidade

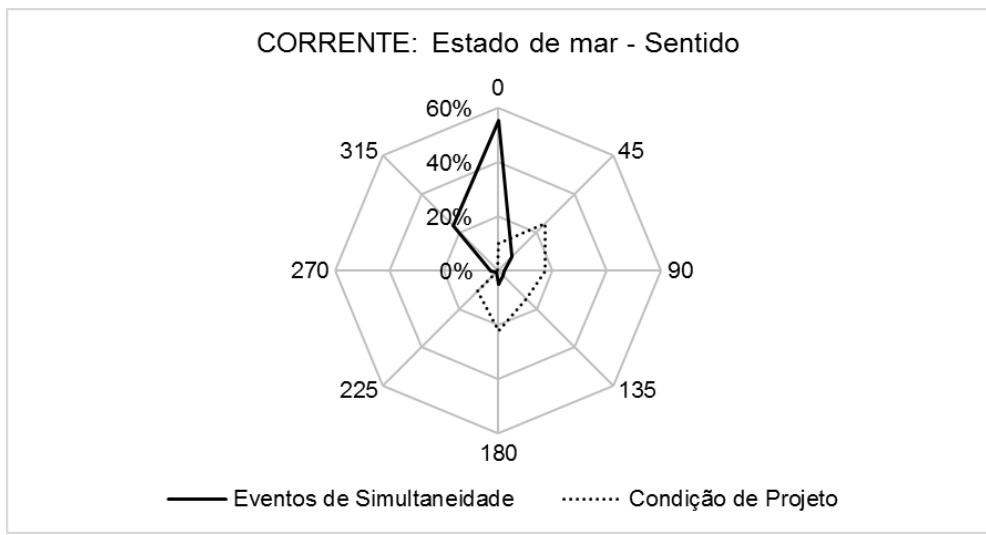


Figura 51: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto –Corrente – Sentido

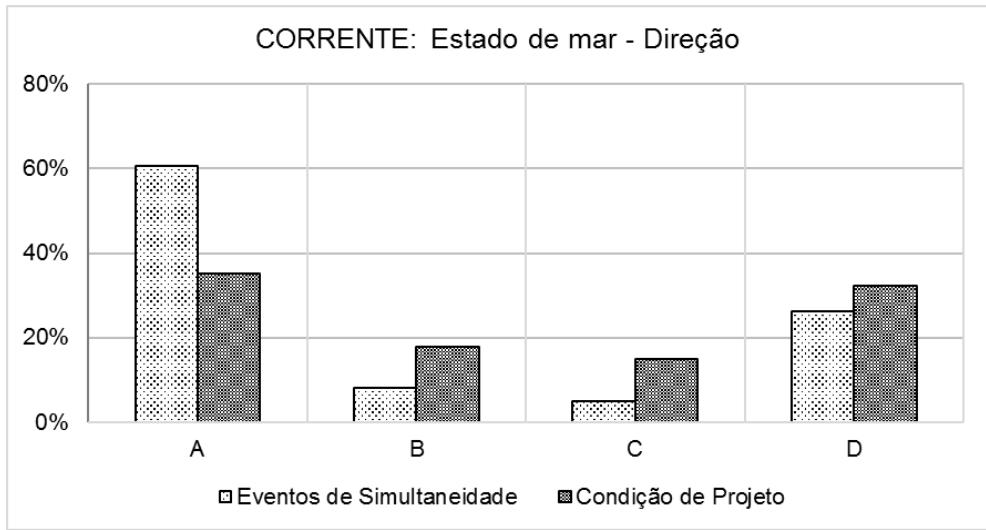


Figura 52: Comparação: Eventos de Simultaneidade – Condições de Projeto – Corrente – Direção

4. Resultados

Com o objetivo de avaliar a metodologia de análise de fadiga para dutos flexíveis utilizada na fase de projeto (abordagem padrão) e a nova abordagem proposta por esse trabalho, essa seção descreve os resultados do estudo comparativo.

O estudo de caso em questão consiste na realização da análise de fadiga da armadura de tração, na região do conector de topo com enrijecedor desacoplado (presença de *I-tube* e boca de sino), de um *riser* flexível instalado em uma Unidade Estacionária de Produção do tipo FPSO, com ancoragem *Spread Mooring* em lâmina d'água de 1260m e aproamento de 208° (SW).

A análise global realizada corresponde a um modelo desacoplado, em que os carregamentos ambientais (onda, vento e corrente) são combinados com o RAO (*Response Amplitude Operator*) associado à embarcação e às informações dos dutos conectados à UEP. A região avaliada refere-se ao conector de topo, para o caso de enrijecedor de curvatura desacoplado, ou seja, a seção transversal do duto flexível somente está submetida à esforços de tração sem a influência do momento fletor.

No decorrer do estudo de caso, por razões de simplificação, visto que o objetivo é a comparação dos efeitos das divergências dos dados nos resultados das análises de fadiga com a abordagem padrão e com a nova metodologia proposta, algumas variáveis são suprimidas dos modelos avaliados.

4.1. Simulação – análise global

Com base em todas as informações citadas na Seção 3.1 é possível determinar que as variáveis ambientais de onda e corrente apresentam mais divergências entre as condições reais e de projeto, do que o vento. Assim, para definir os Estados de Mar, a variável “vento” foi desconsiderada. A maior influência do “vento” corresponde aos deslocamentos estáticos, que por consequências foram suprimidos das análises. Assim, todos os cenários foram avaliados com a unidade na posição “neutra” (sem deslocamento).

Como na Seção 3.2.4, fica claro que os 200 eventos de simultaneidade mais recorrentes apresentam distribuições muito próximas da totalidade dos casos. Sendo

assim, optou-se pela a definição dos Estados de Mar a partir destes eventos para o cenário de Condição Real

A Tabela 14 resume os casos que foram analisados, levando em consideração os Estados de Mar, níveis de pressão e níveis de calado.

Tabela 14: Total de casos simulados

	PROJETO	CONDICÃO REAL
Estados de Mar	772	200
Níveis de Pressão	1	4
Níveis de Calado	1	3
Total de Casos	772	2400

As Figuras 53 e 54 demonstram a probabilidade de ocorrência de cada um dos casos analisados. É possível observar que, dado o menor número de casos para a análise com os dados de projeto, em alguns casos há uma diferença significativa da probabilidade de ocorrência quando comparados aos cenários da condição real.

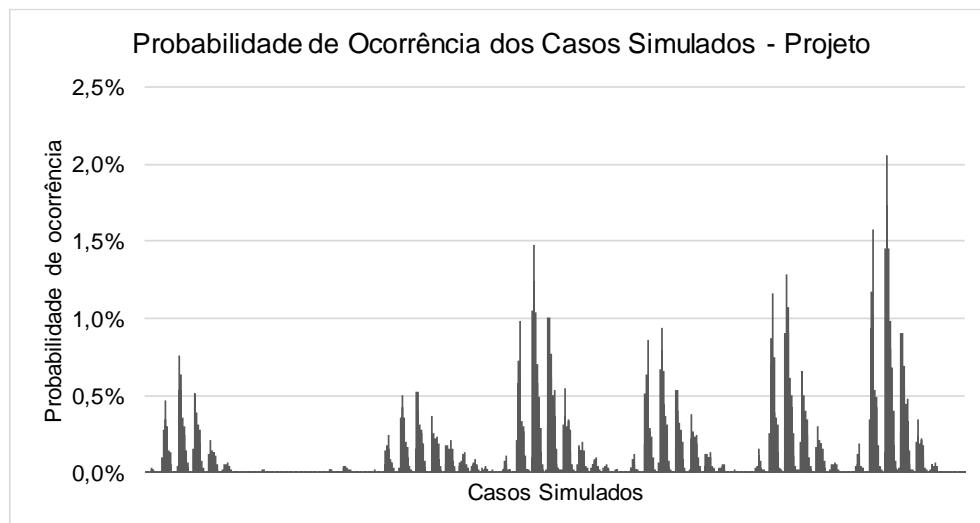


Figura 53: Probabilidade de ocorrência dos casos simulados para as condições de projeto

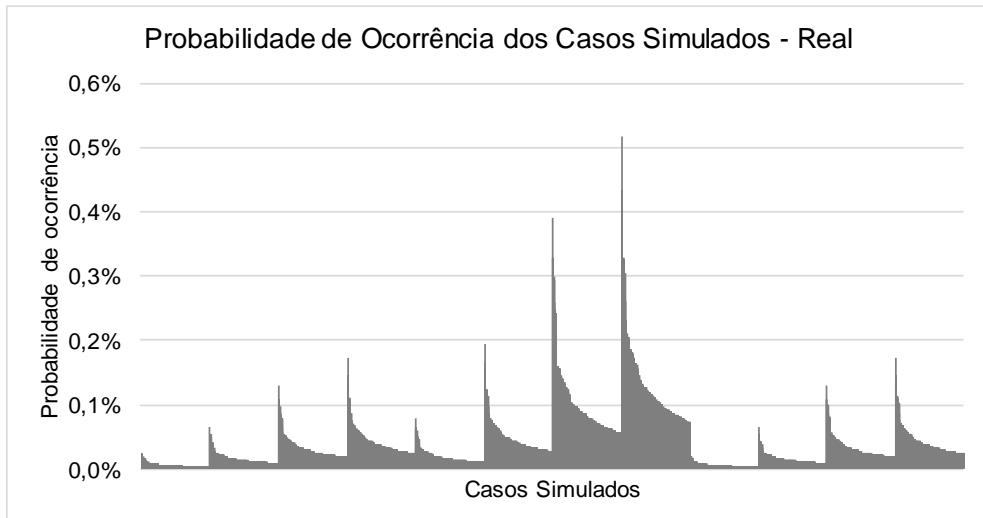


Figura 54: Probabilidade de ocorrência dos casos simulados para as condições reais

As análises globais foram executadas através do programa ANFLEX [40] e divididas em dois cenários, Projeto – com as condições previstas na fase de projeto do duto flexível –, e Real – utilizando os eventos de simultaneidade e a combinação dos níveis de calado e pressão.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa e qualitativa da vida útil em fadiga para o *riser* flexível, algumas variáveis foram desconsideradas, seja em virtude da pouca influência nos cálculos, ou pelo fato de serem consideradas idênticas, tanto para a condição de projeto quanto para as condições reais.

A Figura 55 apresenta uma sobreposição da tração para vários casos simulados – é possível observar a diferença entre os níveis de carregamento para cada caso simulado, e a Figura 56 exemplifica como a tração no topo do *riser* varia ao longo do tempo para um caso simulado.

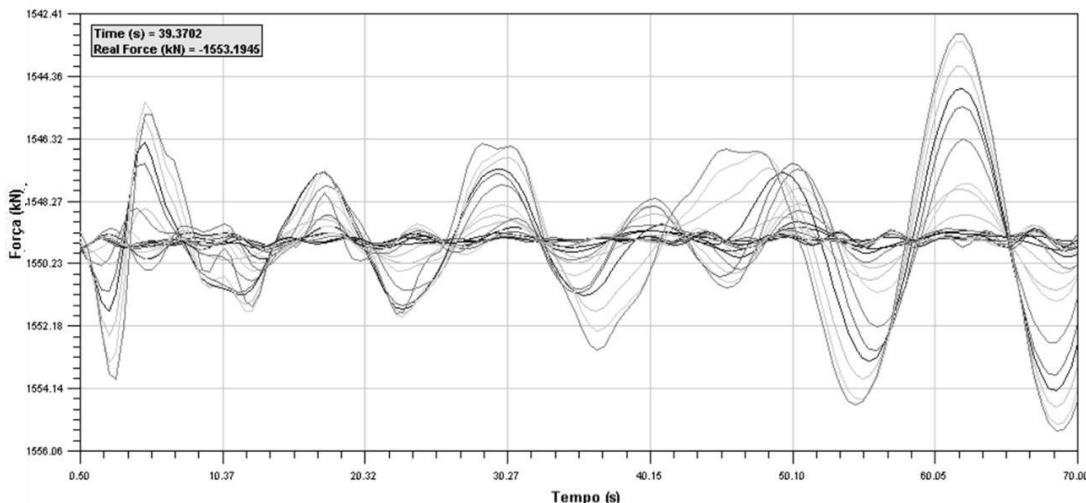


Figura 55: Força de Tração no elemento de topo do *riser* - Vários casos simulados

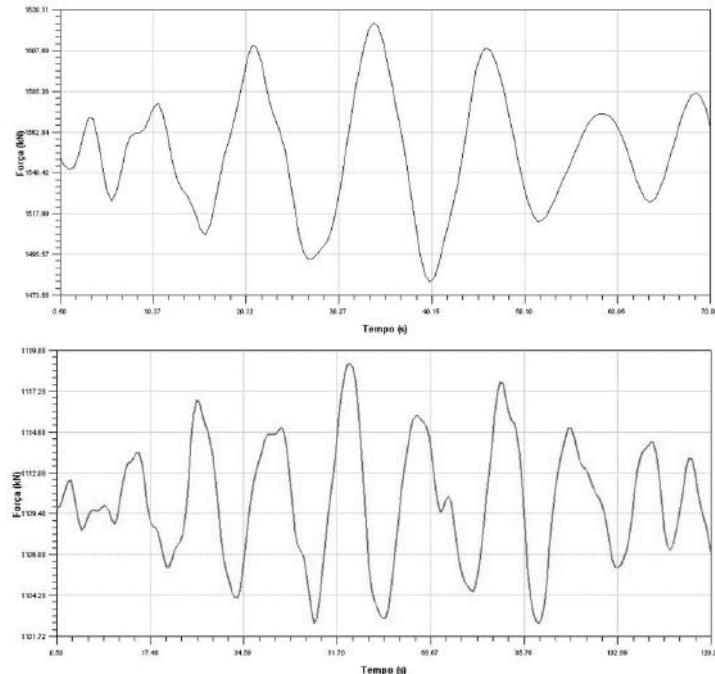


Figura 56: Exemplos da simulação – Força de Tração no elemento de topo do *riser*

Como forma de demonstrar a distribuição da tração axial ao longo do duto, a Figura 57 foi elaborada a partir do resultado de um caso simulado, em que a linha contínua corresponde à máxima tração encontrada no elemento e a linha pontilhada a mínima tração. O que corrobora que os maiores níveis de força axial se encontram na região do topo do *riser*.

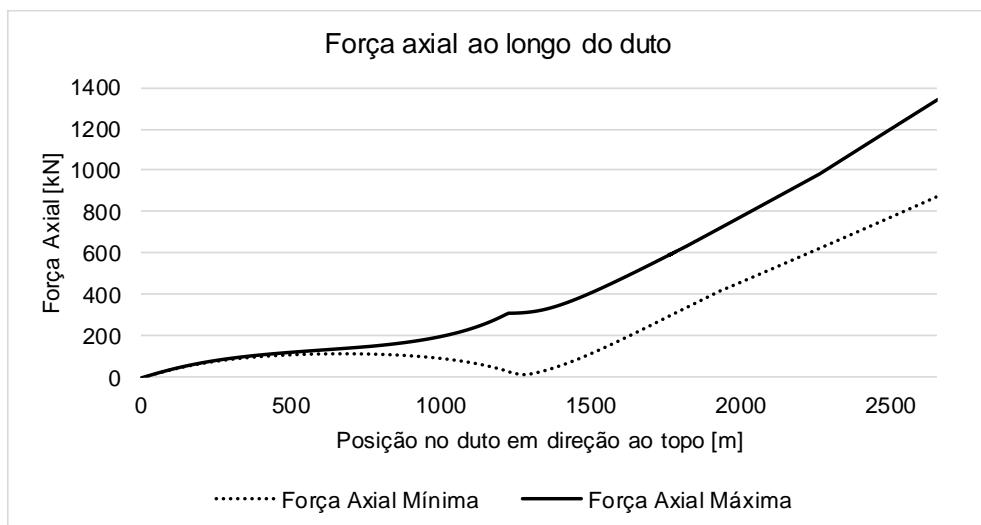


Figura 57: Força axial ao longo do duto para um caso simulado

Outra informação relevante proveniente das simulações, refere-se ao momento gerado pela curvatura ao longo do duto (Figura 58). É possível observar que a região

do TDP, para esse caso, apresenta um elevado momento de flexão que eleva os níveis de tensão na armadura e influencia diretamente no acúmulo de dano à fadiga.

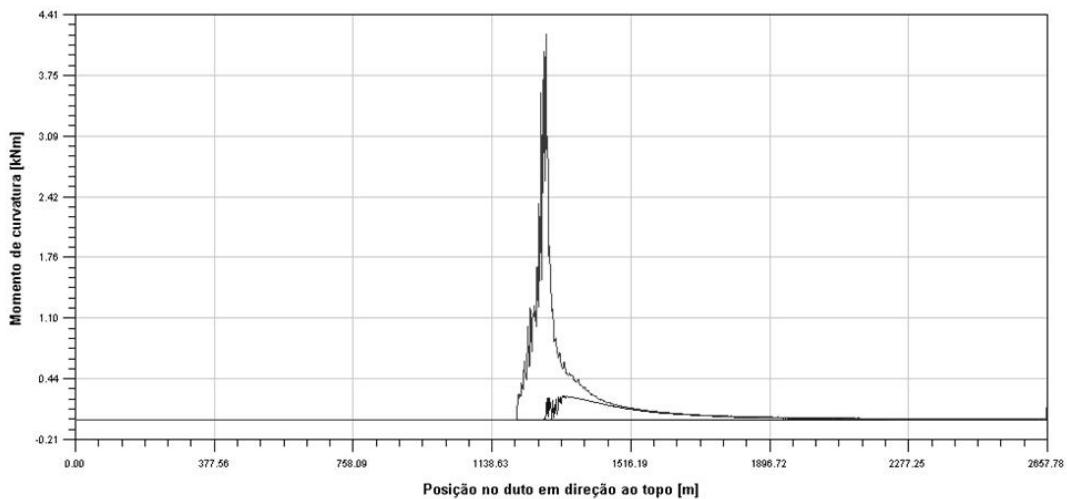


Figura 58: Momento gerado pela curvatura do duto

Pela razão deste trabalho ter como enfoque a comparação dos efeitos na vida em fadiga causado pela diferença entre as condições reais e as de projeto, optou-se, por simplificação, pela avaliação de um elemento submetido somente aos efeitos de tração pura.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos de análises globais de um riserflexível em catenária livre com as condições previstas no projeto e condições reais. Foram desconsideradas divergências entre a instalação e as condições previstas no projeto – como por exemplo azimute de saída do riser, posição do TDP e aproamento do FPSO – para assim, tornar possível uma avaliação das influências das condições ambientais e dos parâmetros operacionais.

4.1.1. Condição de projeto

A seguir são apresentados os resultados da simulação no cenário de “Projeto”. A Figura 59 representa a tensão na armadura de tração (tensão média e amplitude) gerada pela força de tração a que o elemento analisado está submetido para cada um dos 772 casos simulados. E na Figura 60 são indicadas as máximas tensões obtidas para cada um dos cenários.

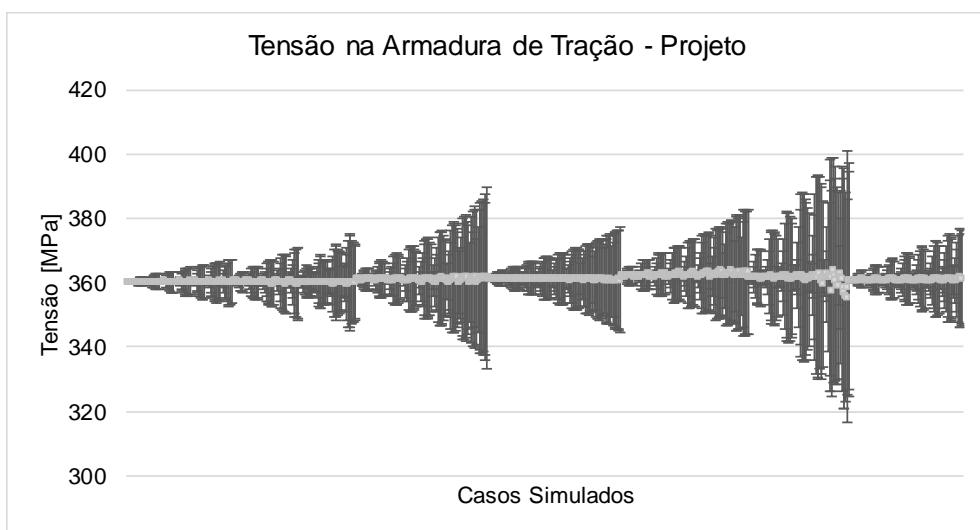


Figura 59: Tensão média e amplitude de tensão na armadura de tração no topo do *riser* para cada caso simulado - Projeto

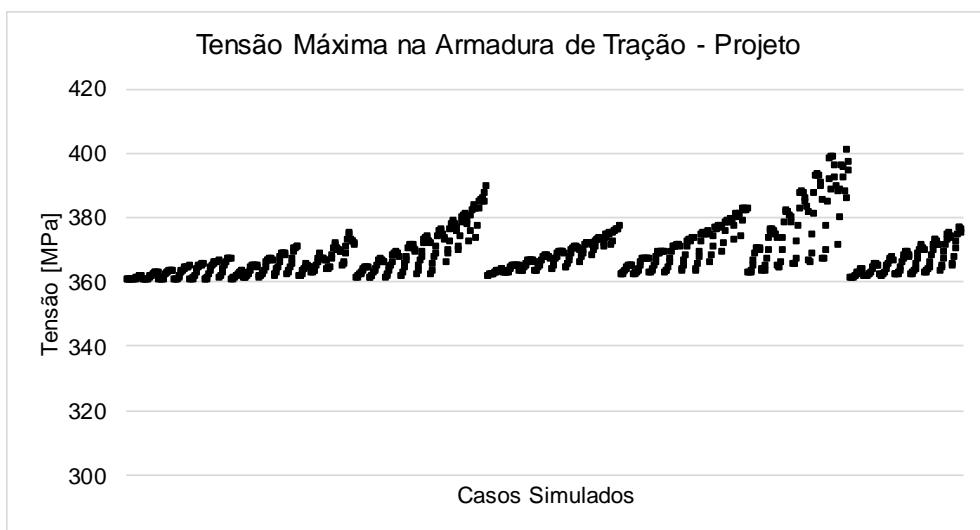


Figura 60: Máxima tensão na armadura de tração para cada caso simulado - Projeto

Da Figura 60 é possível avaliar o nível de tensão aplicado às armaduras de tração comparativamente ao limite de escoamento do material, o que nos remete à Figura 61 onde o Fator de Utilização (FU) consiste na relação entre a tensão aplicada, nesse caso a máxima tensão obtida no caso simulado, e a tensão de escoamento do material.

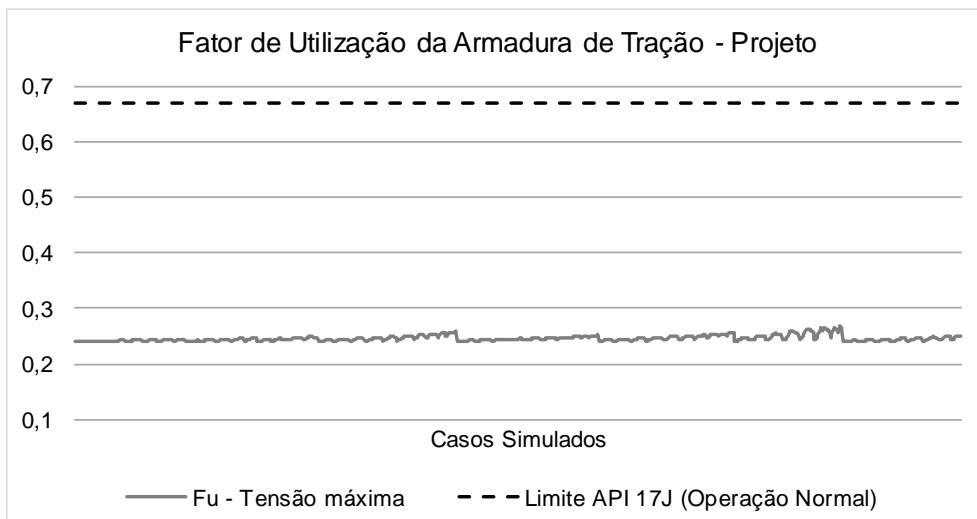


Figura 61: Fator de Utilização de tensão da armadura de tração – Condição de projeto

Com as informações de tensão média e amplitude de tensão (Figura 59) é possível avaliar o Fator de Variação de Tensão (R) para cada um dos casos e verificar a sua distribuição entre os diferentes casos simulados. Na Figura 62 pode-se observar a elevada concentração obtida para casos com fatores R acima de 0,9.

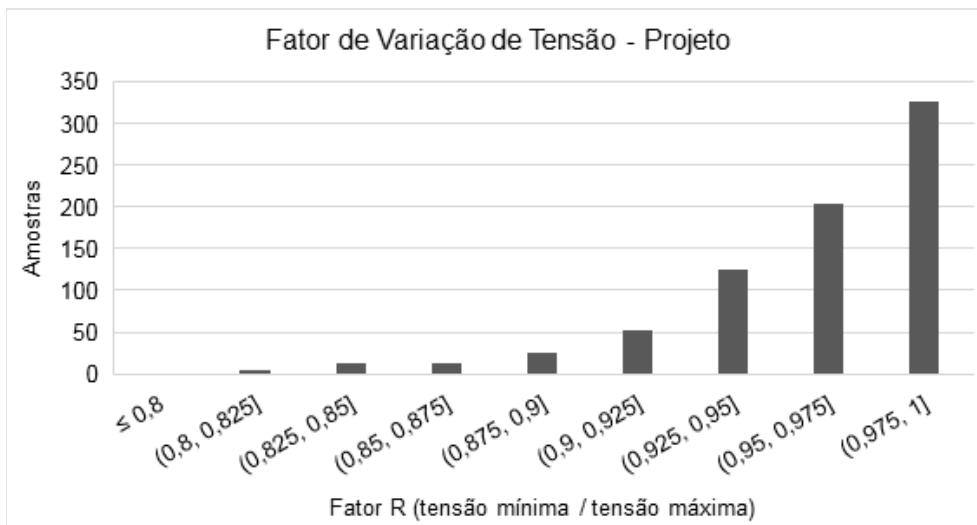


Figura 62: Histograma do fator de variação de tensão (R) - Projeto

Assim, das informações disponibilizadas é possível afirmar que os casos analisados representam o regime de fadiga de alto ciclo (tensão abaixo do limite de escoamento e elevado número de ciclos).

Correlacionando os dados de tensão (Figura 59) e a probabilidade de ocorrência de cada um dos cenários simulados (Figura 53) obtém-se a Figura 63.

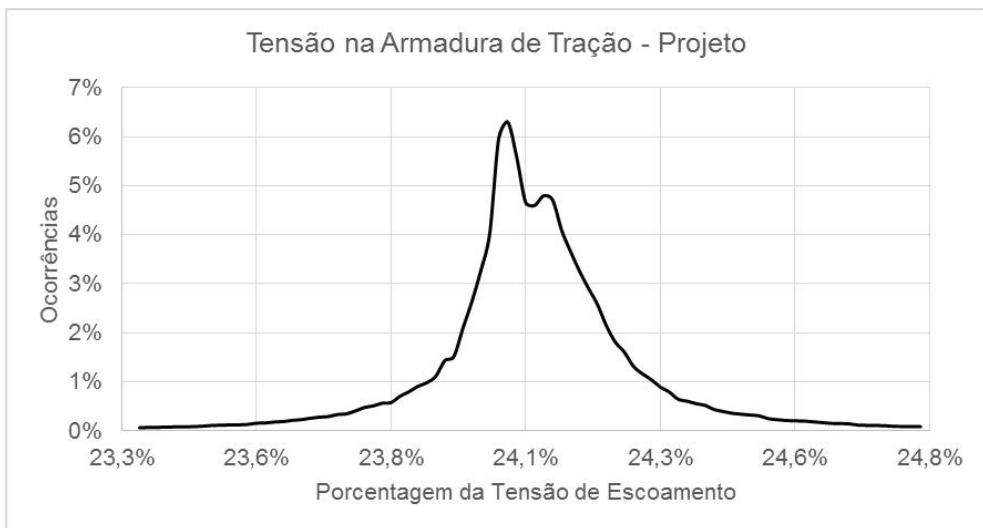


Figura 63: Ocorrência dos níveis de tensão para o cenário de projeto

Outro dado importante refere-se à probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão (Figura 64) que, combinada com a distribuição apresentada na Figura 63, permite determinar o dano à fadiga a que o elemento simulado está submetido.

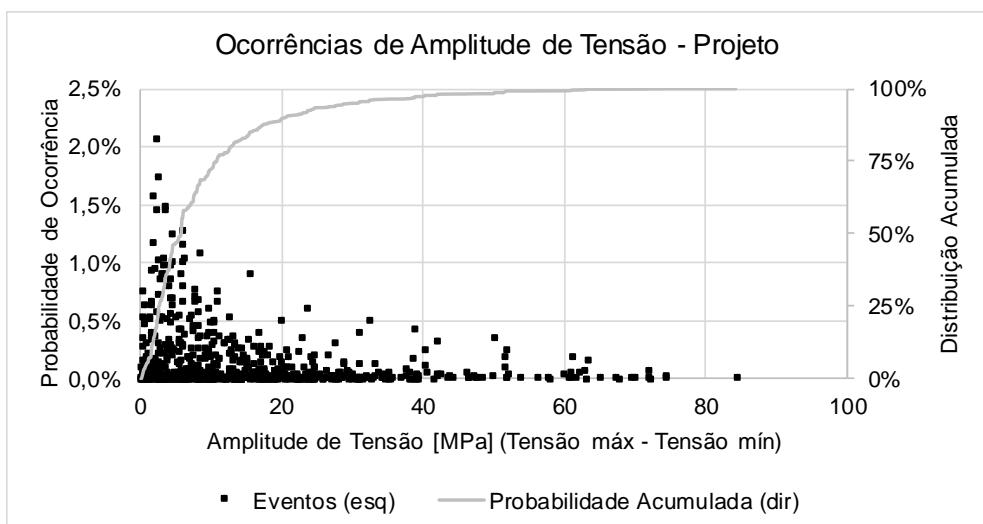


Figura 64: Probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão – condição de projeto

4.1.2. Dados reais

Nas Figuras de 65 a 70 são apresentados os resultados da simulação para as condições reais (na mesma sequência em que os resultados para as condições de projeto foram apresentados). Pode-se chegar às as mesmas conclusões que aquelas obtidas para as condições de projeto.

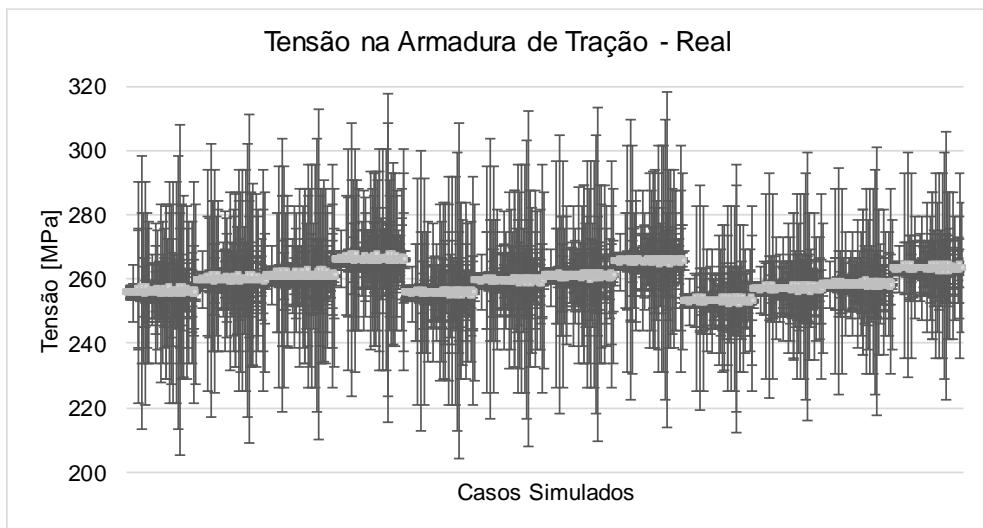


Figura 65: Tensão média e amplitude de tensão na armadura de tração no topo do *riser* para cada caso simulado - Real

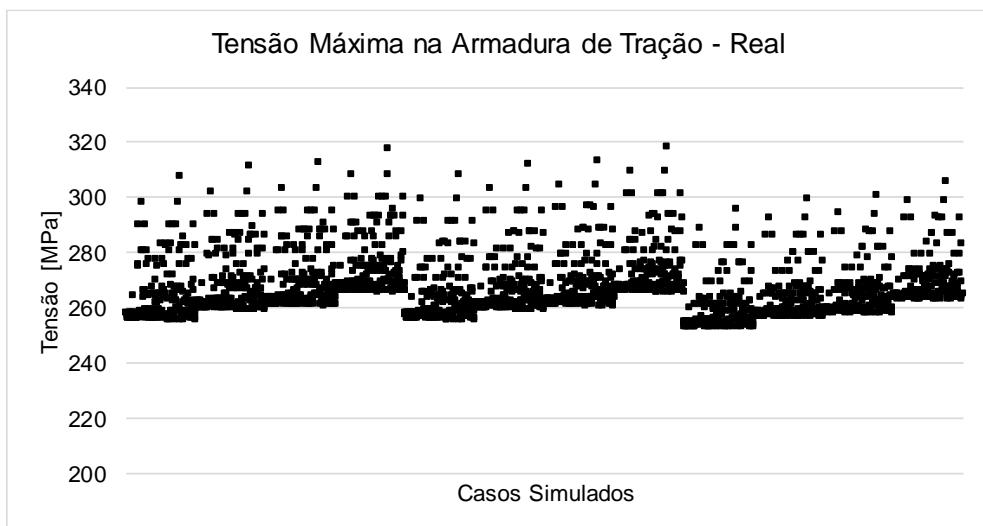


Figura 66: Máxima tensão na armadura de tração para cada caso simulado - Real

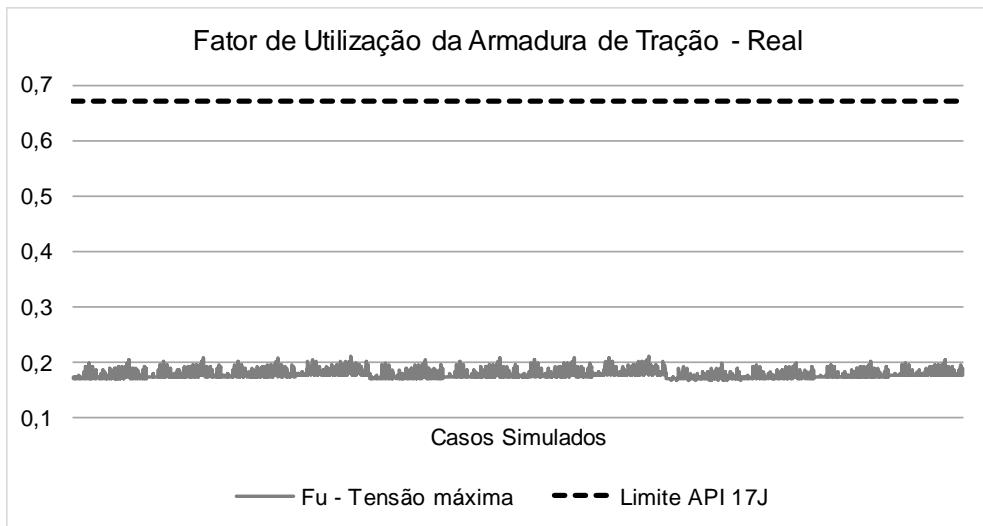


Figura 67: Fator de Utilização de tensão da armadura de tração – Condição real

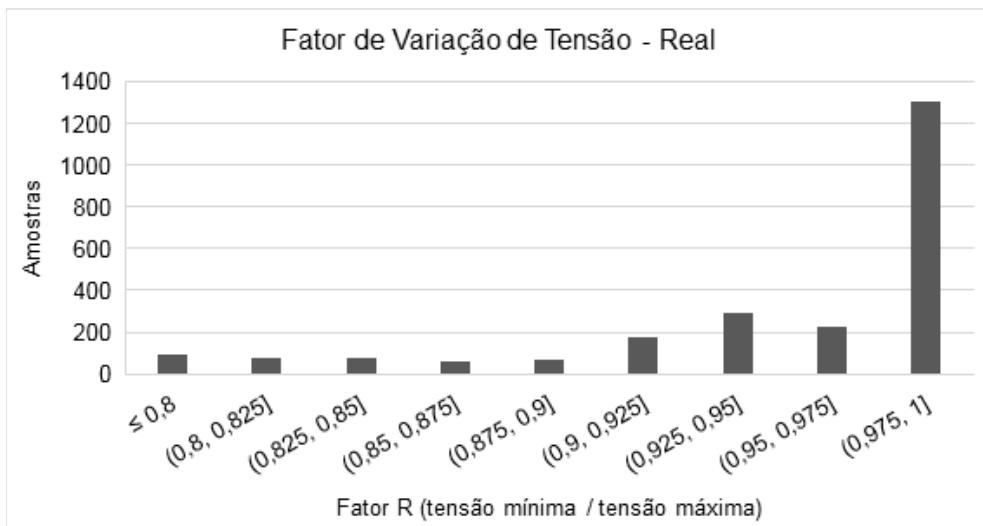


Figura 68: Histograma do fator de variação de tensão (R) - Real

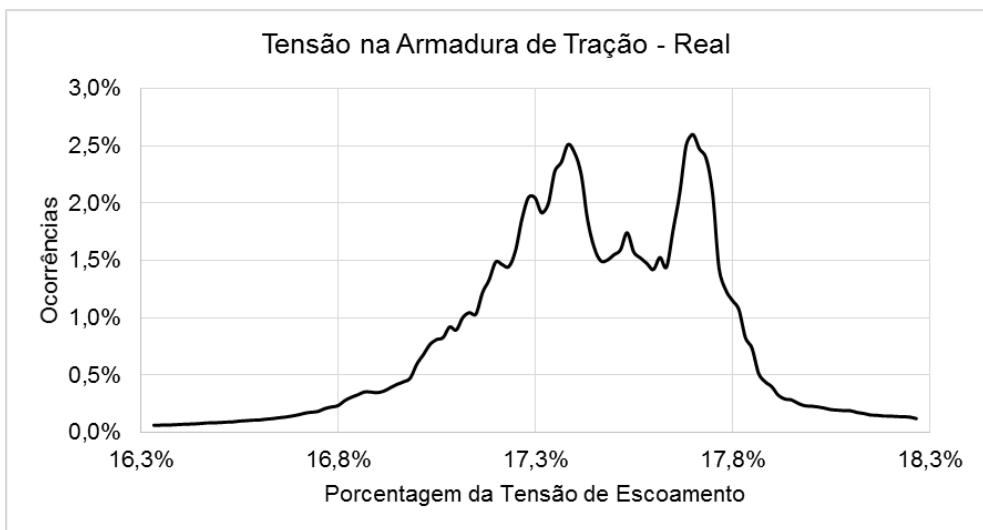


Figura 69: Ocorrência dos níveis de tensão para a condição real

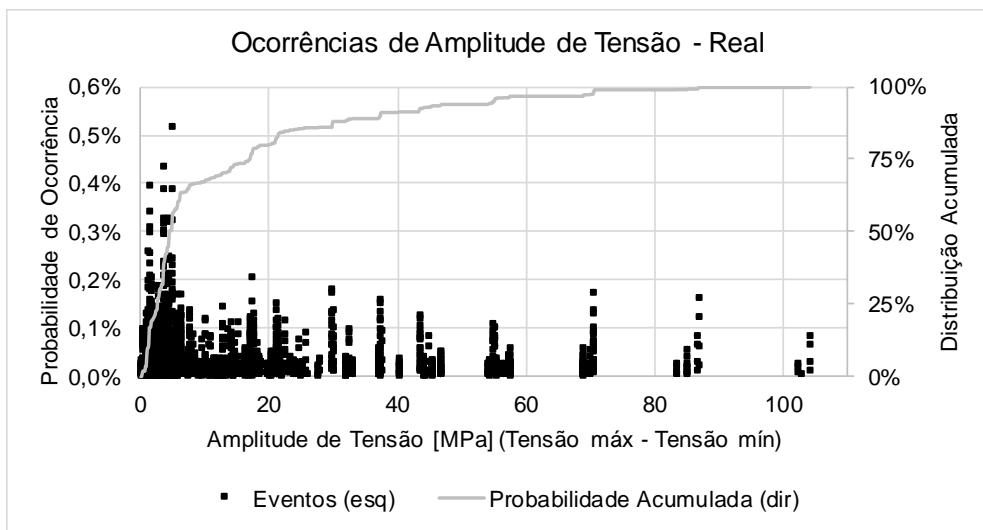


Figura 70: Probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão – condição real

A informação mais relevante que pode ser obtida da análise dos casos de “Dados Reais” é de que, fica claro, na Figura 71, as divisões dos níveis de pressão – equivalente aos quatro níveis de médias das tensões –, e dos três níveis de calado – correspondente aos três blocos repetidos.

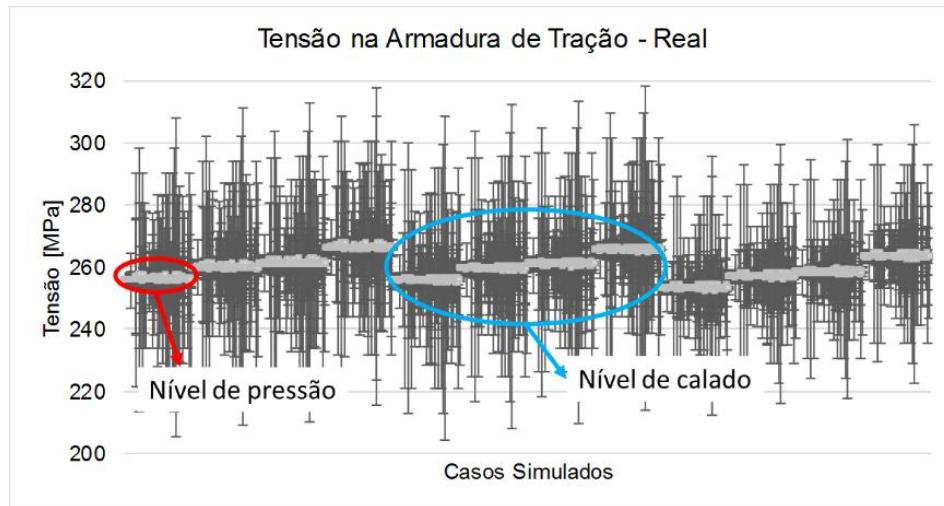


Figura 71: Resultado da influência dos níveis de pressão e níveis de calado para os casos reais

4.1.3. Análise dos resultados

Atendendo o objetivo da comparação dos dois cenários (Projeto e Real) uma análise comparativa dos resultados foi realizada. Na Figura 72 fica claro como o nível da tensão é reduzido na condição real quando comparado àquele da condição de projeto (algo próximo de 7p.p.). Entretanto, observa-se uma elevação da amplitude de tensão para a condição real, conforme observada pelos perfis na Figura 73.

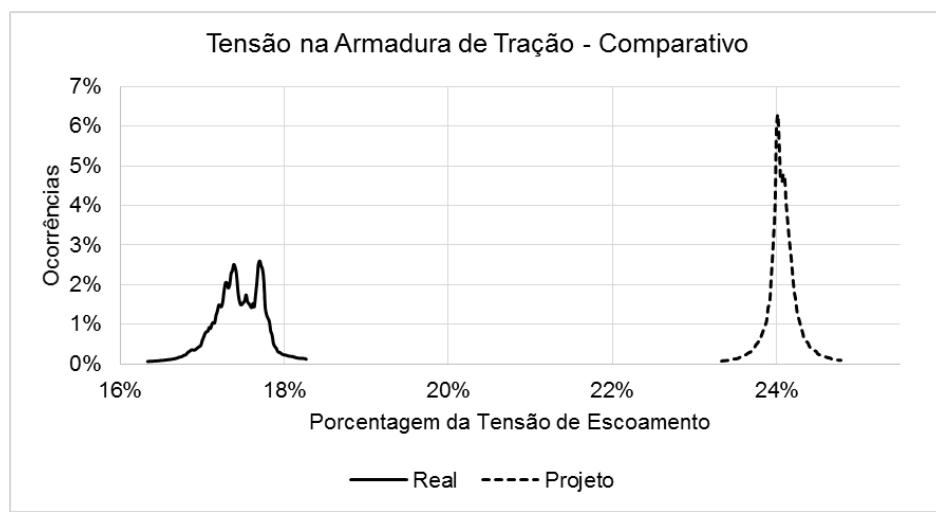


Figura 72: Comparativo da tensão na armadura de tração para a condição de projeto e real

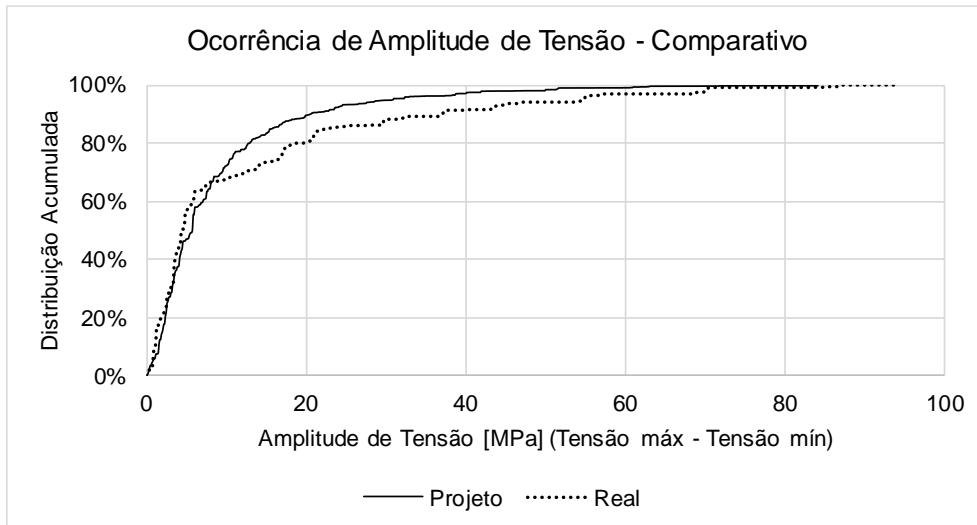


Figura 73: Comparativo da probabilidade de ocorrência da amplitude de tensão para a condição de projeto e real

Dessa forma, com os resultados obtidos das simulações que indicaram baixos níveis de Fator de Utilização (tensões baixas em relação à tensão de escoamento) e elevados números de ciclos, é válida a aplicação das teorias do regime elástico e de fadiga de alto ciclo.

Os dados dos fatores de variação de tensão (R), disponibilizados nas Figuras 62 e 68, evidenciam que o elemento analisado nas simulações está submetido somente à tração (sem compressão), visto que R é sempre positivo para todos os casos.

Assim, como forma de demonstrar as respostas de tensão em forma de dano à fadiga, define-se, a partir da Equação de Basquin (1), do exemplo de curva S-N de “1 barra de CO₂”, Figura 15, e com o uso da equação (2) os fatores $\log C$ e k como:

$$\log N = 14,26 - 3,26 \cdot \log S_a \quad (7)$$

Nessa análise foram desconsiderados quaisquer fatores de concentração de tensão, pois o objetivo é realizar uma comparação entre os resultados obtidos através das divergências entre os dados da fase de projeto e das condições operacionais.

Os efeitos da tensão média foram avaliados de acordo com o critério de Goodman que é frequentemente utilizado em razão do conservadorismo. A Figura 74 exemplifica a influência da tensão média no diagrama de fadiga.

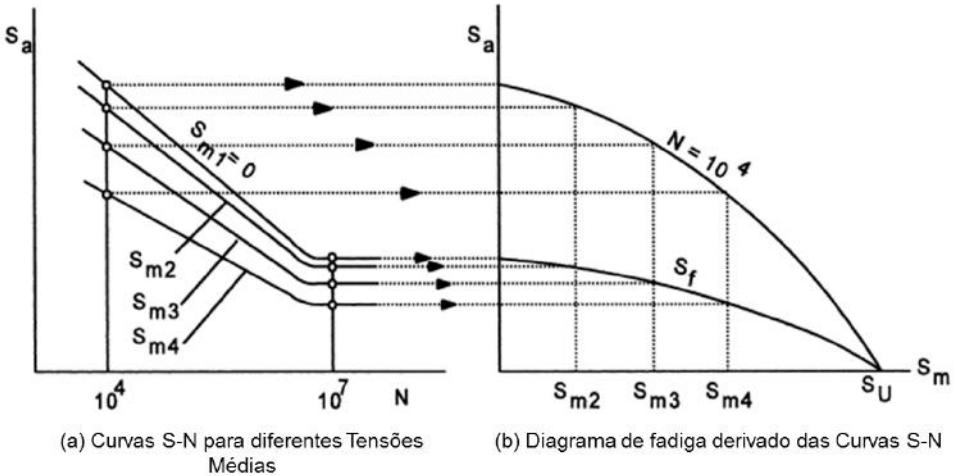


Figura 74: Diagrama de fadiga obtido através de curvas S-N
Fonte: Schijve, J [27] - Modificada

Dessa forma, através das equações (3), (4), (5) e (7) e do critério de Goodman é possível determinar o dano anual à fadiga para as simulações realizadas – dados de projeto e condições operacionais. A Tabela 15 resume os resultados da simulação. Foi observada uma diferença significativa no resultado final do acúmulo de dano à fadiga na avaliação considerando os casos reais de operação (condições ambientais e operacionais), em comparação àquele obtido com as condições de projeto.

Finalmente, a Tabela 15 consolida os resultados obtidos neste trabalho, que por razão das simplificações apresentadas no texto refere-se a uma análise comparativa. O resultado não se refere a vida útil em fadiga desta estrutura analisada e sim evidencia que há diferença significativa no acúmulo de dano em fadiga considerando os casos reais de operação (condições ambientais e operacionais), quando comparados àquele obtido com as condições previstas em projeto.

Tabela 15: Resultados das simulações

Cenário	Dano anual à fadiga	Dano acumulado no período da análise (**)	Dano acumulado à fadiga para 25 anos (*)	Vida útil para FSF = 10 (anos) (*)
Projeto	$7,63 \cdot 10^{-4}$	0,3435%	1,91%	131
Real	$2,64 \cdot 10^{-3}$	1,1891%	6,60%	38

(*) Considerando que haverá repetibilidade nas condições ambientais e de produção

(**) Considerando operação no período de abril de 2013 a outubro de 2017 (4,5 anos)

A extrapolação dos resultados analisados para um período futuro deve ser considerada como uma limitação dessa metodologia já que a proposta consiste em avaliar o histórico operacional que não pode ser previsto com exatidão.

5. Conclusões

Prezar pela garantia da segurança operacional e manter a competência do retorno financeiro dos projetos já instalados deve ser a base para estabelecer o Programa de Gerenciamento da Integridade das instalações submarinas, em especial dos *risers* submarinos, visto que, estão instalados em regiões cujas consequências, em caso de falhas, às pessoas são elevadas.

Nessa toada, torna-se relevante a reavaliação das premissas utilizadas no projeto e compará-las se ainda são válidas e quais os impactos causados por essas alterações. Assim, esse trabalho analisou a divergência, e seus efeitos, dos principais fatores que determinam a vida útil em fadiga de *risers* flexíveis instalados em uma UEP (Unidade Estacionária de Produção) quando comparados os dados previstos em projeto e os dados reais coletados.

Das informações avaliadas, é possível constatar que as maiores influências no resultado do dano à fadiga foram provenientes das diferenças, para onda e corrente, nos critérios de orientação e de intensidade na comparação realizada nesse trabalho.

Evidencia-se, por esses resultados, a necessidade de, nas reavaliações de vida útil, incorporar os eventos que ocorreram ao longo da vida produtiva para dispor de um resultado mais genuíno possível e manter os níveis de confiabilidade definidos na fase de projeto. Nesse contexto, não há dúvidas de que os fatores de segurança (FSF) sugeridos por normas internacionais, e largamente aplicado nos projetos, é de suma importância para absorver as ocorrências imprevisíveis.

Nesse contexto, mesmo com o aumento do dano acumulado em fadiga na ordem de 3 (três) vezes, o projeto mostrou-se tão robusto que ainda haveria vida útil em fadiga remanescente para a seção avaliada. Cria-se, desse modo, o cenário de que a robustez dos projetos se faz necessária diante de tamanhas incertezas e do longo período operacional.

A extrapolação dos resultados obtidos através da análise das condições operacionais históricas para um período futuro deve ser considerada como uma limitação dessa metodologia já que a proposta consiste na avaliação do histórico operacional como forma de redução dos níveis de incertezas, e esta extrapolação não pode ser prevista com exatidão.

A título de comparação, caso fosse considerada somente a análise de projeto, ao final dos 131 anos, o Fator de Segurança real seria de 2,9 ao invés dos 10 preconizados. Isso implica em elevação do risco a que as instalações estão expostas nas condições reais de operação.

A principal razão para essa alteração do limite de vida em fadiga consiste no fato de que as condições reais apresentam uma amplitude de tensão é elevada quando comparada às condições de projeto. Mesmo a média das tensões ser inferior às condições de projeto, a amplitude de tensão é mais relevante para o acúmulo de dano a fadiga.

5.1. Próximos passos

Os diferentes níveis de pressão foram relevantes para diferenciar a tensão média, porém para dutos instalados em LDA elevadas essa influência é relativamente pequena. Pode ser mais interessante o uso de um único valor de pressão para ampliar os estados de mar e manter a quantidade de casos analisados, de 200 para 800, atingindo quase 70% dos eventos de simultaneidade.

A análise dos diferentes níveis de calado não influenciou significativamente o resultado. Pode ser mais interessante ampliar os estados de mar, obtidos através dos eventos de simultaneidade, visando uma análise mais realista. É possível alterar de 200 para 600 estados de mar, mantendo a quantidade de casos analisados e atingindo mais de 60% dos eventos de simultaneidade.

Pode-se ainda, ampliar os estados de mar com a redução dos níveis de calado e de pressão, mantendo a quantidade de casos simulados. Alterando os níveis de calado (de 3 para 1) e os níveis de pressão (de 4 para 1) é possível alterar os estados de mar de 200 para 2.400, atingindo quase 80% dos eventos de simultaneidade e mantendo a quantidade de casos simulados.

Outrossim, a avaliação dos impactos na vida útil em fadiga nos outros pontos do *riser*, como TDP, conectores intermediários e enrijecedores de curvatura, faz-se de suma importância visto que o trecho analisado apresentou aumento no dano acumulado.

6. Referências

- [1] Taleb, Nassim Nicholas, 2007, *A lógica do Cisne Negro*. 1 ed. New York, Best Seller.
- [2] U.S. Energy Information Administration, Markets & Finance. *Crude Oil Prices 2014*, disponível em: <https://www.eia.gov/finance/review/annual/>, Acesso em 20 de março de 2017.
- [3] Agência Brasil. *Petrobras está alerta a projeções de queda na demanda por petróleo*, disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-08/petrobras-esta-alerta-projcoes-de-queda-na-demanda-por-petroleo-diz>, consultado em 05 de outubro de 2017
- [4] *Plano de Negócios e Gestão 2018-2022*, Petrobras, Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/>, consultado em 28 de abril de 2018.
- [5] *Annual Energy Outlook 2018*, U.S. Energy Information Administration, disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>, consultado em 28 de abril de 2018.
- [6] *Global Climate Change, Vital Signs of the Planet*. Disponível em: climate.nasa.gov, consultado em 02 de março de 2018.
- [7] Resolução ANP Nº 41 de 09/10/2015 – DOU 13/10/2015.
- [8] Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional de Sistemas Submarinos – SGSS, ANP, Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=78299>, consultado em 12 de novembro de 2015.
- [9] Morikawa, S., Camerini, C. S., Braga, A. M. B., & Llerena, R. A. (2010, January 1). *Real time continuous structural integrity monitoring of flexible risers with optical fiber sensors*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/20863-MS
- [10] PSA Norway, *Un-bonded Flexible Risers – Recent Field Experience and Actions for Increased Robustness* (2013), 4Subsea, Revisão 5.
- [11] Nielsen, N.-J. R., Weppenaaar, N., de la Cour, D., & Kristensen, C. (2008, January 1). *Managing Fatigue In Deepwater Flexible Risers*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/19443-MS
- [12] Alves, Monique de Carvalho, 2012, “*Análise de fadiga em risers rígidos tipo catenária submetidos a carregamentos de onde e corrente*”. Projeto de Graduação, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [13] CAMPELLO, G. C, 2014, “*Metodologia de Projeto para o Sistema de Ancoragem de Conectores de Dutos Flexíveis e Proposição de Nova Tecnologia*”. Tese de Doutorado, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [14] Dos Santos Loureiro Filho, F., De Lima, E.C.P., Sagrilo, L.V.S., De Sousa, F.J.M., De Lemos, C.A.D. *Safety factors for fatigue analysis of flexible pipes based on structural reliability* (2012) Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE, 2, pp. 337-342.
- [15] Grealish, F., Smith, R., & Zimmerman, J. (2006, January 1). *New Industry Guidelines for Fatigue Analysis of Unbonded Flexible Risers*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/18303-MS
- [16] Drumond, Geovana P., Pasqualino, Ilson P., Pinheiro, Bianca C., Estefen, Segean F. *Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review*. 2018. Ocean Engineering
- [17] NORSOX U-009, *Life extension for subsea systems*, 2011.

- [18] ISO 13628-2, Petroleum and natural gas industries – *Design and operation of subsea production systems – Part 2: Unbonded flexible pipe systems for subsea and marine applications*, 2006
- [19] API 17J, 2014, *Specification for Unbonded Flexible Pipe*, 4^a ed., Washington, American Petroleum Institute.
- [20] API 17B, 2014, *Recommended Practice for Flexible Pipe*, 5^a ed., Washington, American Petroleum Institute.
- [21] IPCC, Climate Change 2013: *The Physical Science Basis, Section 3 - Observations: Ocean - Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment*. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>, consultado em 15 de outubro de 2016.
- [22] CAVATI, Ricardo de Souza, 2012, “*Gerenciamento Inteligente da Integridade de risers Flexíveis utilizados na produção de petróleo e gás natural*”. Tese de Mestrado, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [23] BERGE, S., ENGSETH, A., FYLLING, I. et al., 1992, *Flexible Risers and Pipes: Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes*, Report STF70 A92006, SINTEF Structural Engineering, Trondheim, Norway.
- [24] Yong Bai and Qiang Bai, *Chapter 5 - Integrity Management of Flexible Pipes, In Subsea Pipeline Integrity and Risk Management*, edited by Yong BaiQiang Bai, Gulf Professional Publishing, Boston, 2014, páginas 101-124, ISBN 9780123944320
- [25] Handbook on Design and Operation of flexible pipes 2017, NTNU, 4 Subsea and SINTEF Ocean.
- [26] ISO 14224, 2016, Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- *Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*, 3^a ed., Genebra, International Organization for Standardization.
- [27] Schijve, J. *Fatigue of Structures and Materials*. 2ed. Delft, The Netherlands, Springer, 2008.
- [28] ASTM E739, *Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data*, 2010.
- [29] DNV GL-RP-0005, 2014, *Fatigue design of offshore steel structures*, DNV GL Group.
- [30] CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [31] DNV RP-F206, *Riser Integrity Management – Rules and standards*, 2017.
- [32] Seaman, C., Brower, D.V., Tang, H., Le, S., (May 2015). *Development of a Post-Installed Deepwater Monitoring System*. Offshore Technology Conference.
- [33] Soares, S. D., Camerini, C. S., & Santos, J. M. C. (2009, January 1). SS: IMR: *Development of flexible risers monitoring methodology using acoustic emission technology*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/19863-MS
- [34] McCarthy, J. C., & Buttle, D. J. (2012, January 1). *MAPS-FR Structural Integrity Monitoring For Flexible Risers*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [35] Andersen, B. A. M., Staveley, C., Worsley, J., Watley, D., Naldrett, G. J., & Bennett, P. (2010, January 1). *Producing the Intelligent Riser: Advances in Fiber-Optic Monitoring and Visualization Applications Within Flexible Risers*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/139254-MS
- [36] Braga, A. M. B., Morikawa, S., Camerini, C. S., Camerini, M. G., Ribeiro, A. S., & Simoes, T. B. (2011, January 1). *Vibration Monitoring Technique to Detect Failure in Armour Wires of Flexible Risers*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/21730-MS
- [37] Petrobras: *Tecnologias Pioneiras no Pré-sal*. Disponível em: <http://presal.hotsitespetrobras.com.br/tecnologias-pioneiras/>, consultado em 26 de Fevereiro de 2016.

- [38] ABNT NBR IEC 60079-10-1, 2009, *Atmosferas explosivas, Parte 10-1: Classificação de áreas - Atmosferas explosivas de gás*, 1^a ed., Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [39] Lyons, G. J., Mahlouji, H., Patel, M. H., & Brown, D. T. (1993, January 1). *Lifetime In-Service Monitoring of the Emerald Instrumented Flexible Riser*. International Society of Offshore and Polar Engineers
- [40] Software ANFLEX. Versão 8. Petrobras.
- [41] TOLEDO, G.L.; OVALLE, I. I. (1978). *MODA DE KING E MODA DE CZUBER*. Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais. p. 1 - 2. Consultado em 2 de dezembro de 2016.
- [42] Brooke, John; Engineering Committee on Oceanic Resources Working Group on Wave Energy Conversion (2003). *Wave Energy Conversion*. [S.I.]: Elsevier. 170 páginas. ISBN 0-08-044212-9.

7. Anexo

Histórico Oceanográfico

Nessa seção são apresentados os dados de projeto e os dados coletados na UEP das seguintes variáveis:

- a. VENTO: Velocidade e Direção
- b. ONDA: Altura Significativa e Período de Pico Primário
- c. ONDA: Altura Significativa e Direção Preferencial
- d. CORRENTE: Intensidade de Corrente Superficial e Direção

Foram adotadas as convenções do Sistema Internacional de Unidades (S.I.), UNESCO-IOC (*Intergovernmental Oceanographic Commission*) e WMO (*World Meteorological Organization*), onde:

- Para VENTO e ONDA a direção indica de onde vem (no sentido horário com origem no Norte Verdadeiro 0°);
- Para CORRENTE a direção indica para onde vai (no sentido horário com origem no Norte Verdadeiro 0°).

- **VENTO: Velocidade (m/s) e Direção**

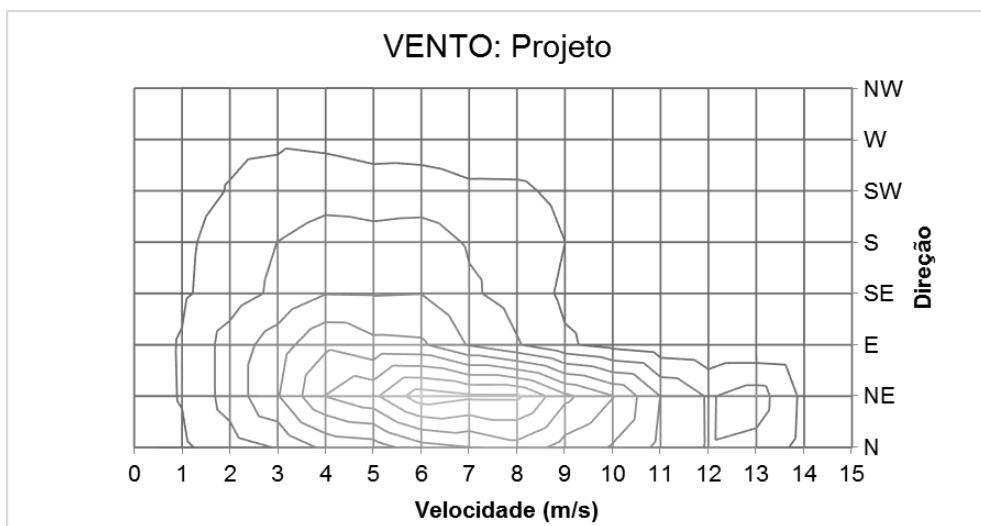


Figura 75: Vento - Dados de Projeto – Velocidade x Direção

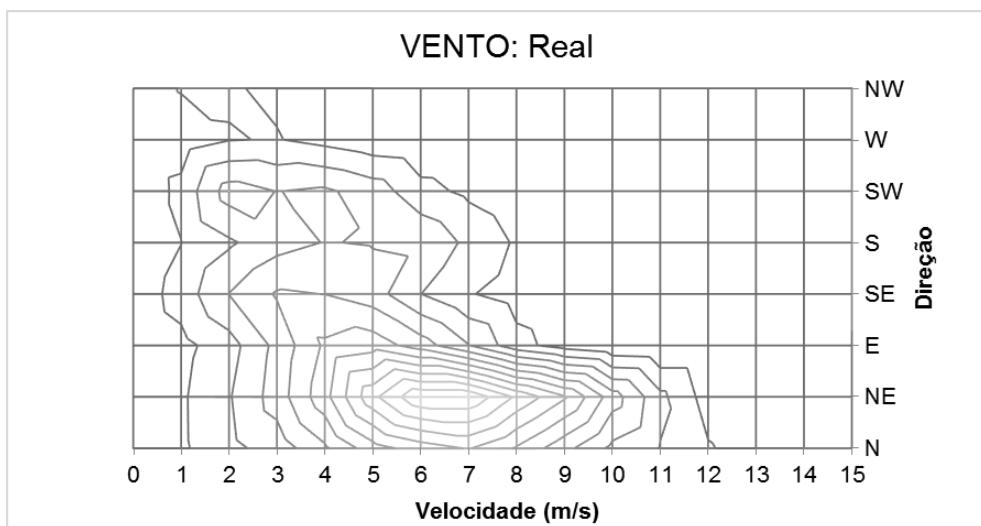


Figura 76: Vento - Dados Reais – Velocidade x Direção

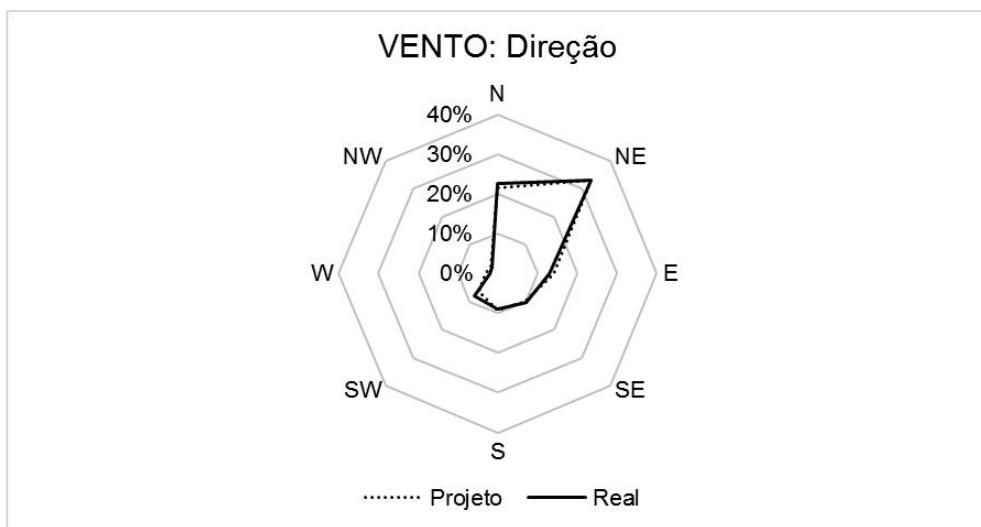


Figura 77: Vento – Direção – Projeto x Real

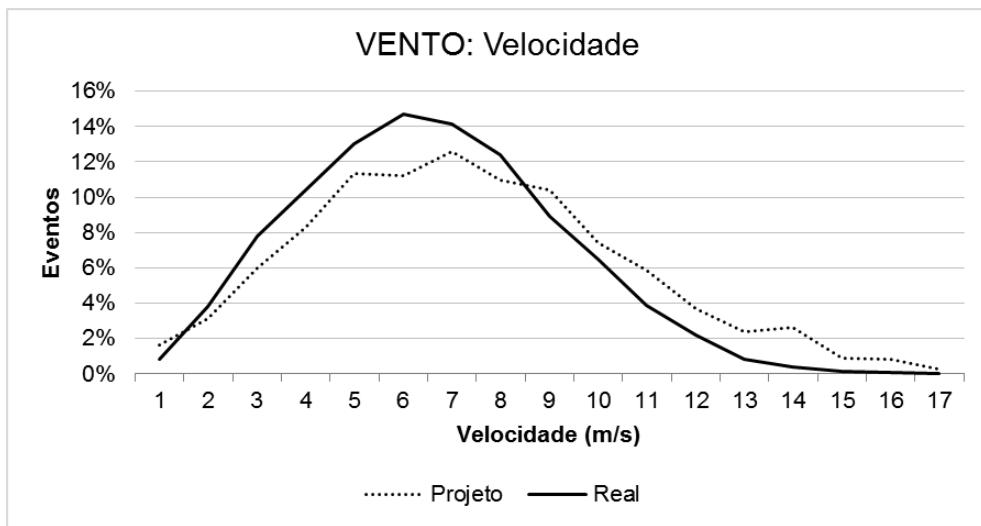


Figura 78: Vento – Velocidade – Projeto x Real

Através das Figuras 75, 76 e 77 é possível confirmar que a predominância dos ventos vindo de nordeste (NE), prevista em projeto, se manteve. Foi observada uma redução do número de ocorrências dos ventos fortes (com velocidades acima de 9 m/s), que pode ser observada na Figura 78.

Dessa forma, como os dados coletados em campo e os dados previstos em projeto para a ação do vento para o período considerado não apresentam divergências significativas, estes não serão considerados nas demais análises, de forma a otimizar os cenários avaliados.

- **ONDA: Altura Significativa (Hs) e Período de Pico Primário (Tp)**

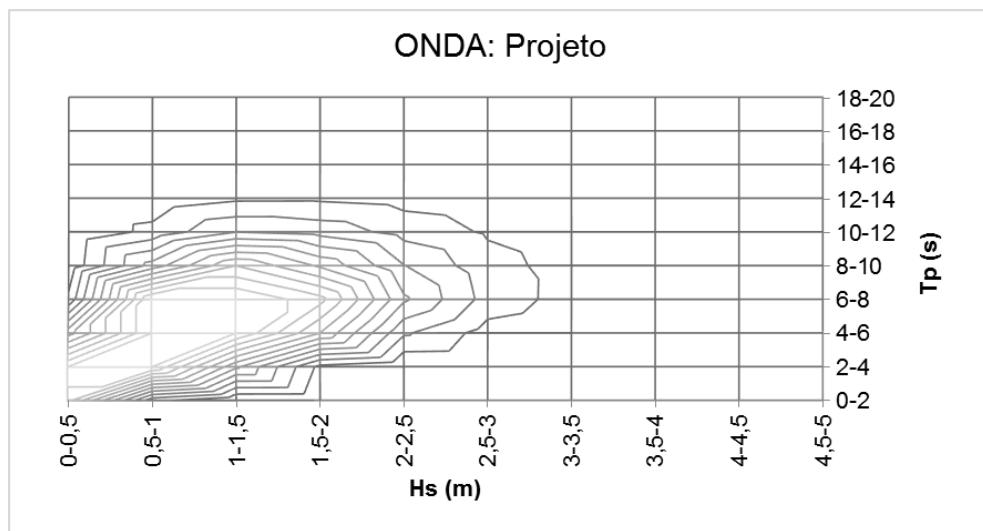


Figura 79: Onda - Dados de Projeto – Hs x Tp

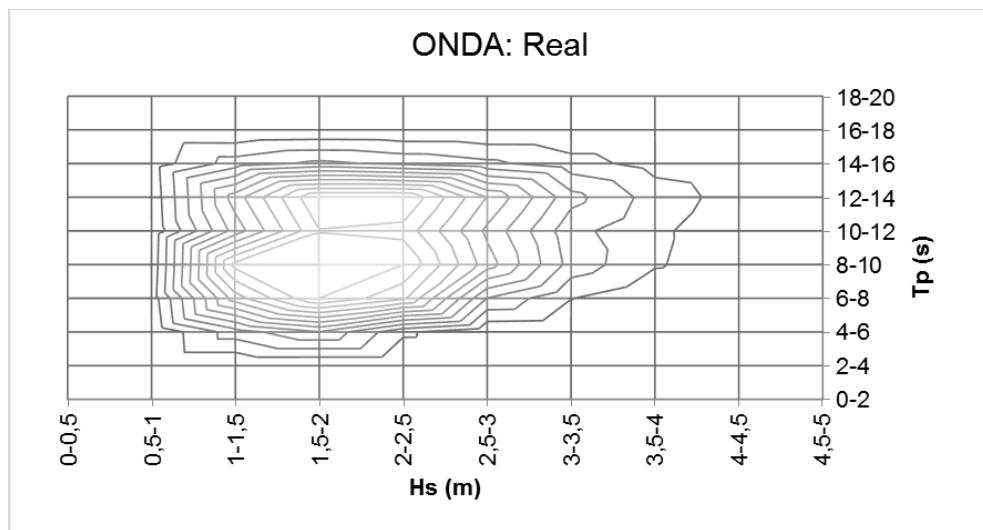


Figura 80: Onda – Dados Reais – Hs x Tp

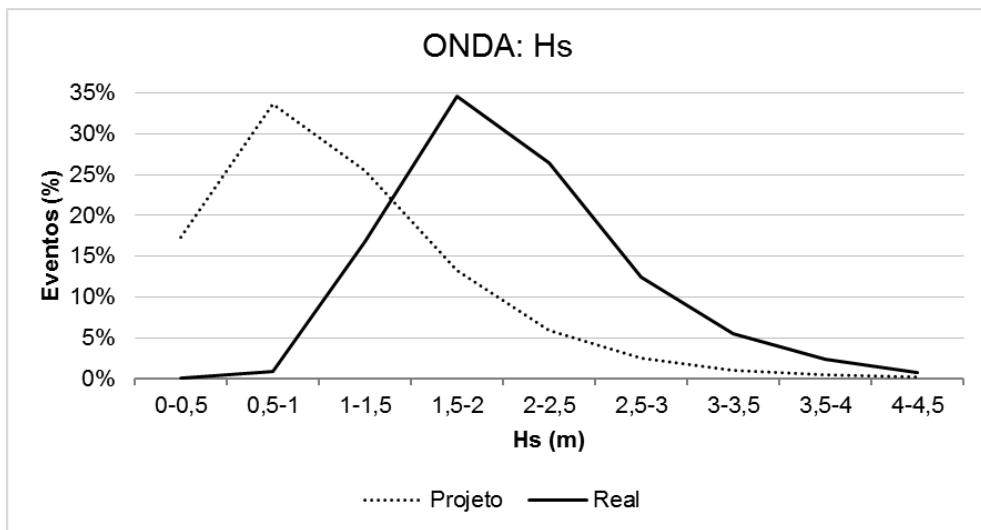


Figura 81: Onda – Hs – Projeto x Real

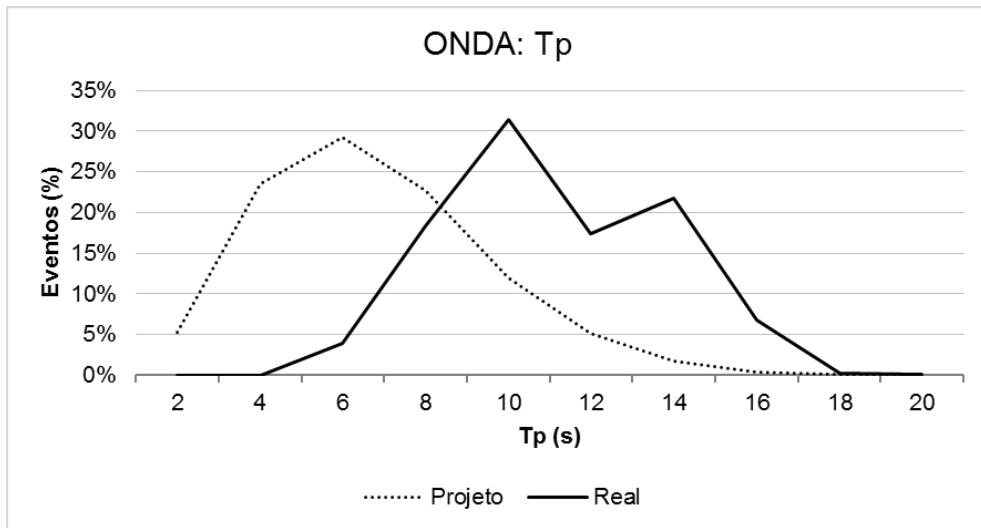


Figura 82: Onda – Tp – Projeto x Real

Com relação à ação da onda, analisando as Figuras 79 e 80, é possível observar que há alteração significativa entre o cenário predominante previsto em projeto (Hs: 0,5-1 / Tp: 0-8) e as reais condições (Hs: 1-2,5 / Tp: 6-14). As Figuras 81 e 82 confirmam esse entendimento.

- ONDA: Altura Significativa (H_s) e Direção Preferencial

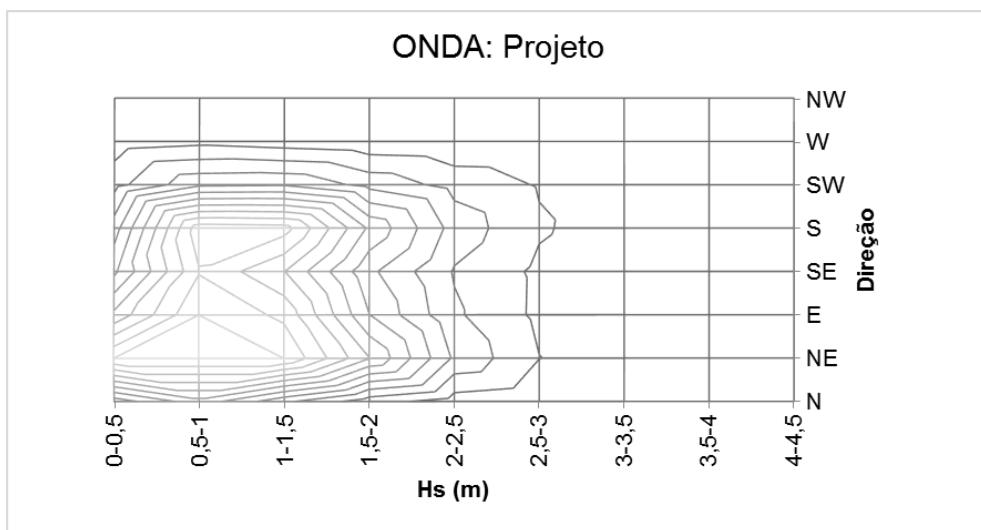


Figura 83: Onda – Dados de Projeto – H_s x Direção

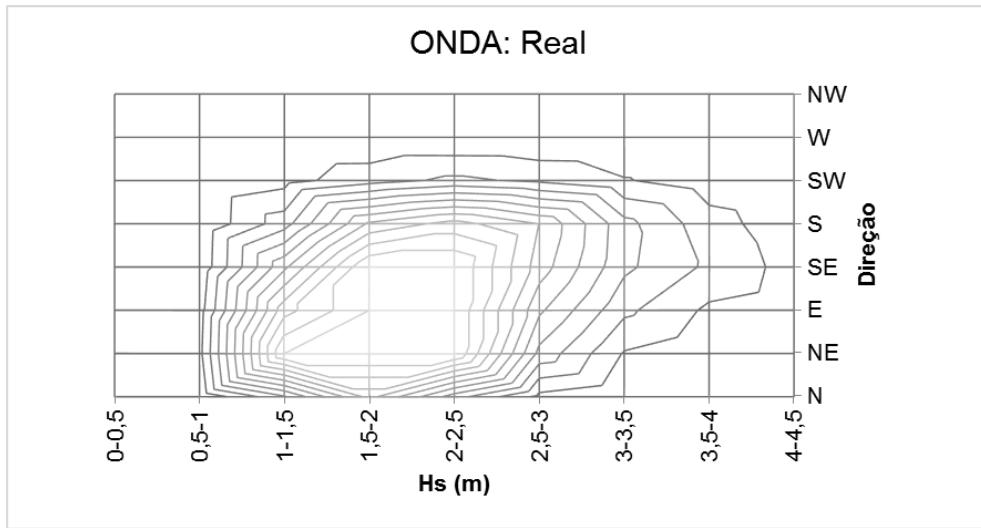


Figura 84: Onda – Dados Reais – H_s x Direção

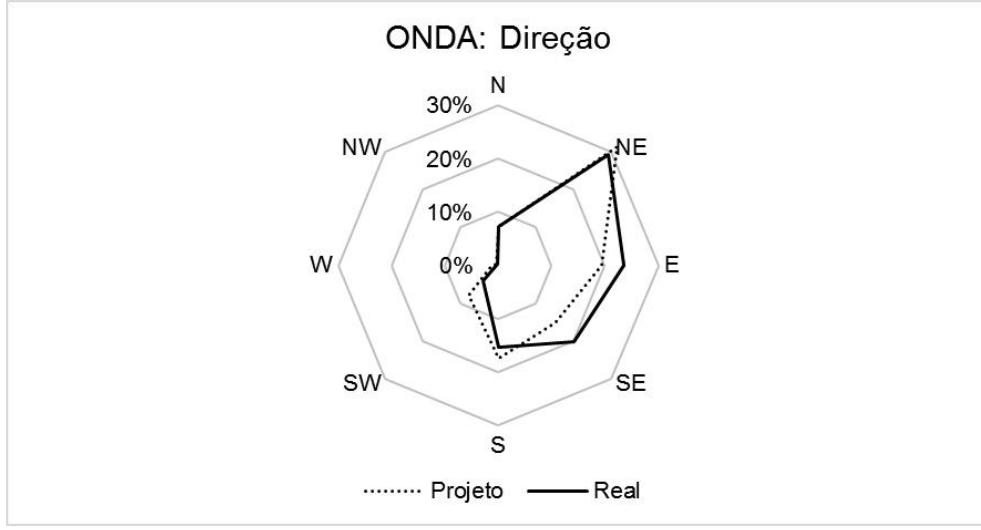


Figura 85: Onda – Direção – Projeto x Real

As Figuras 83, 84 e 85 revelam que há certa compatibilidade entre as direções previstas em projeto e aquelas observadas nas condições reais. Contudo é importante observar que há um aumento das ondas vindo de leste e sudeste, que no caso em questão representam as ondas de través (chegando por bombordo), e, como descrito por Alves [12] os movimentos causados por ondas com incidência lateral, quando transmitidos ao duto, reduzem o tempo de vida útil do mesmo.

- **CORRENTE: Intensidade de Corrente e Direção**

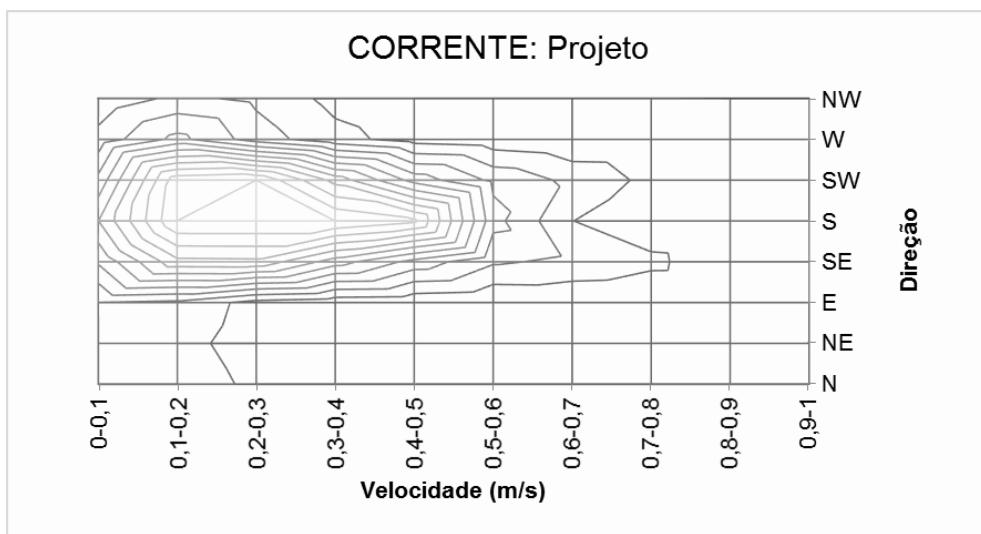


Figura 86: Corrente – Dados de Projeto – Velocidade x Direção

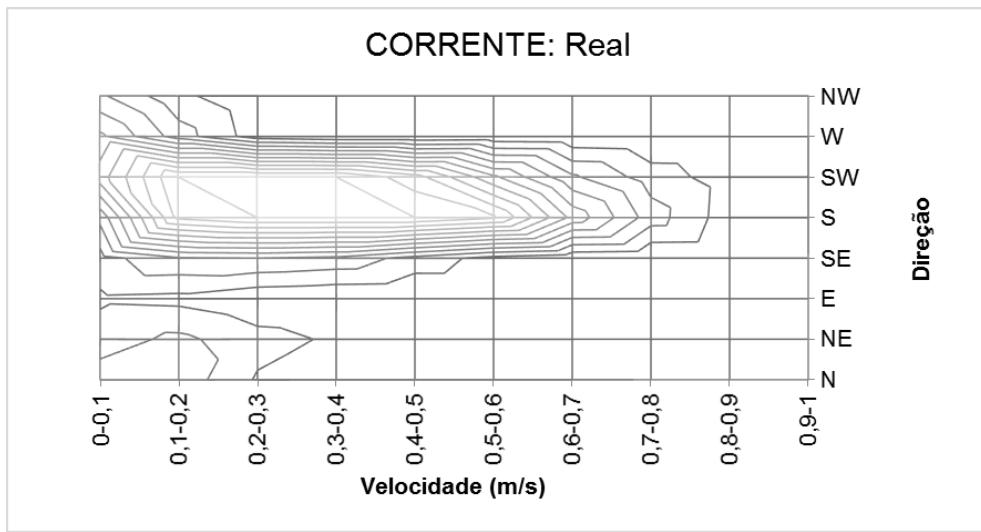


Figura 87: Corrente – Dados Reais – Velocidade x Direção

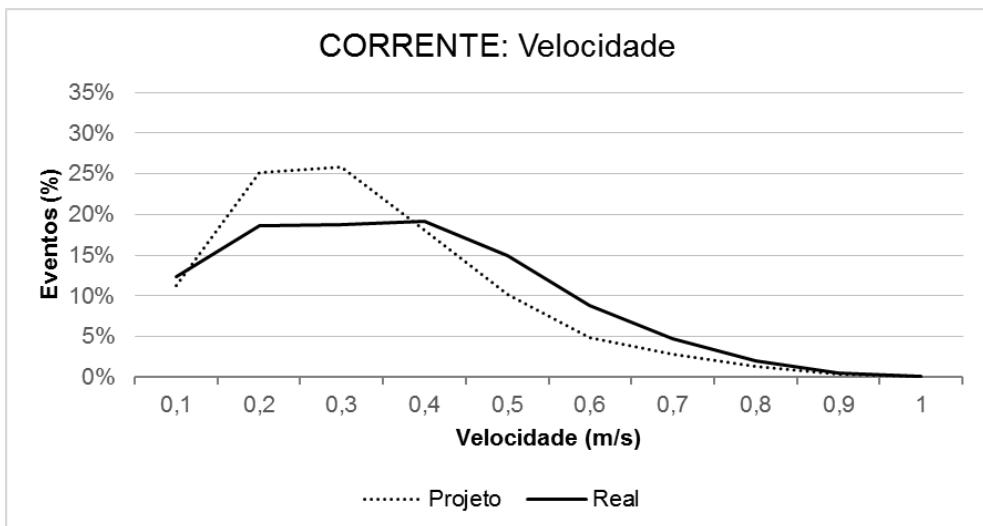


Figura 88: Corrente – Velocidade – Projeto x Real

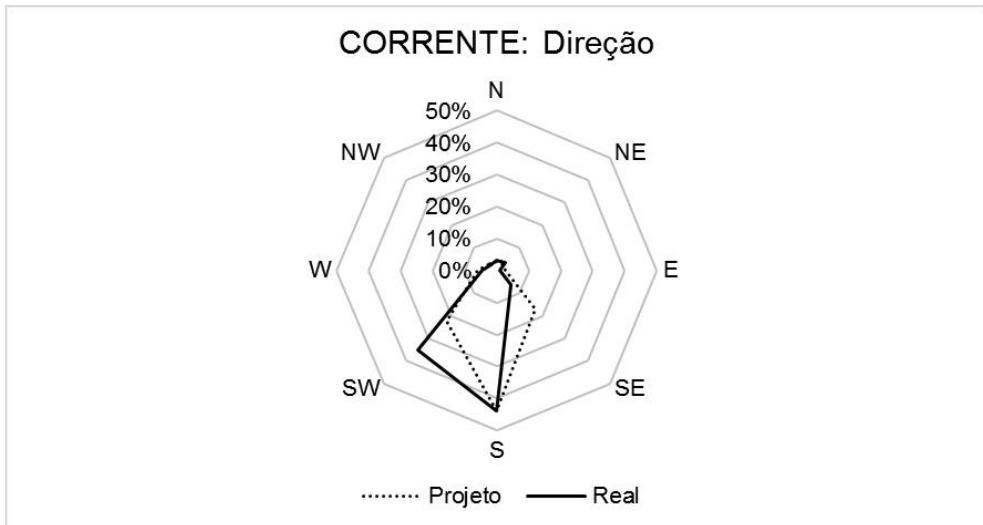


Figura 89: Corrente – Direção – Projeto x Real

As Figuras 86 e 87 apresentam a correlação entre a velocidade e a direção da corrente para dados de projeto e dados reais, respectivamente, indicando a concentração de eventos na direção sul (S) e sudoeste (SW) e aumento do número de eventos para velocidades acima de 0,4 m/s. Essa informação é confirmada pelas Figuras 88 e 89.

A concentração de eventos na direção sudoeste corrobora a importância da análise dos dados ambientais reais, visto que estes, além do impacto sobre a vida útil em fadiga dos dutos flexíveis, impõem carregamentos significativos nos sistemas de ancoragem da UEP.