

## ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS ASD E LRFD PARA PROJETOS ESTRUTURAIS

### COMPARATIVE ANALYSIS OF ASD AND LRFD METHODOLOGIES FOR STRUCTURAL PROJECTS

COSTA, Renan de Araújo<sup>1</sup>  
PIMENTEL, Fabiano de Carvalho<sup>2</sup>

**Resumo:** Tendo em vista o crescimento das atividades de exploração *offshore* de petróleo e gás em lâminas d'água cada vez mais profundas, a solução de navios *Floating, Production, Storage and Offloading* (FPSO) se mostra como a alternativa mais viável do ponto de vista econômico. O emprego deste tipo de navio-plataforma já é realizado há algumas décadas nos campos de produção a nível global, com destaque para sua aplicação em águas nacionais, nas Bacias de Campos e Santos, principais bacias sedimentares de exploração do pré-sal brasileiro na atualidade. Nesse contexto, os desafios tecnológicos e geográficos têm demandado a necessidade de navios cada vez maiores, mais robustos e por consequência, mais pesados. Este cenário aponta para a necessidade de estruturas metálicas esbeltas e otimizadas a serem empregadas nesse tipo de embarcação. É nessa perspectiva que a análise comparativa de metodologias de cálculo para dimensionamento de estruturas metálicas se apresenta como uma ferramenta essencial para definição do método mais apropriado para a concepção estrutural que a indústria tem demandado.

**Palavras-chave:** análise comparativa, ASD, Método das Tensões Admissíveis, LRFD; Método dos Estados Limites, dimensionamento estrutural, estruturas metálicas, offshore.

**Abstract:** In view of the growth in offshore oil and gas exploration activities in increasingly deep water, the Floating, Production, Storage and Offloading (FPSO) vessel solution is proving to be the most economically viable alternative. This type of ship-platform has already been used for several decades in production fields around the world, especially in Brazilian waters, in the Campos and Santos Basins, the main sedimentary basins currently exploiting in the Brazilian pre-salt. In this context, technological and geographical challenges have led to the need for increasingly larger, more robust and, consequently, heavier ships. This scenario points to the need for slender, optimized steel structures to be used in this type of vessel. From this perspective, the comparative analysis of calculation methodologies for the design of steel structures is an essential tool for defining the most appropriate method for the structural design that the industry has been demanding.

**Keywords:** comparative analysis, ASD, allowable stress design, LRFD, load and resistance factor design, structural design, steel structures, offshore.

<sup>1</sup> Engenharia Civil – Universidade Santa Úrsula – renan.costa@souusu.com.br

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia Civil – COPPE e Docente em Engenharia Civil – Universidade Santa Úrsula – fabiano.pimentel@usu.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração e produção de petróleo através de navios-plataforma (FPSO) abrange uma fração significativa no que diz respeito ao mercado petrolífero a nível mundial. O FPSO é um sistema de produção flutuante que integra produção *offshore*, armazenamento e transferência do petróleo, que por sua vez é extraído de uma formação geológica denominada rocha-reservatório, rochas que distinguem-se pela presença de espaço vazios no seu interior (porosidade), e que estes vazios estejam interconectados, conferindo-lhe característica de permeabilidade (THOMAZ, 2004, p.17). A cada dia, novas tecnologias de exploração são descobertas, outras são aprimoradas, objetivando vencer os desafios de Engenharia que se apresentam ao setor, dos quais, um dos principais é o aumento na lâmina d'água a ser alcançada até a profundidade do leito submarino, onde é feita a conexão com equipamentos que constituem a arquitetura submarina de determinado campo de produção, através de dutos conhecidos como *risers* e *flowlines* (destinados a conduzir o óleo extraído do campo até a unidade de produção) e dutos umbilicais (destinados a transmitir cabos elétricos, de fibra óptica e fluidos hidráulicos, da unidade de produção aos equipamentos submarinos).

No leito submarino, uma série de equipamentos são instalados, como *manifolds*, *PLET*, *PLEM*, *SDU*, *jumpers*, árvores de natal molhadas (*wet christmas tree* – também conhecida como árvore de válvulas), entre outros equipamentos submarinos necessários a essa operação, chegando enfim ao elemento primário, que é a cabeça de poço, interligando toda a arquitetura submarina ao reservatório. Até meados da década de 1980, os equipamentos disponíveis ao redor do globo para a produção de petróleo além das costas litorâneas eram apropriados para profundidades próximas de 400 metros (MORAIS, 2013, p.26). A partir dos anos 2000, as atividades de *upstream* (em linhas gerais, aquelas que estão compreendidas na exploração e produção do petróleo) no *offshore* brasileiro evoluíram até atingir lâmina d'água acima de 2.000 metros. Um exemplo deste marco é o Campo de Lula, localizado na Bacia de Santos, no sudeste brasileiro (SOUZA & SGARBI, 2019). Este é apenas um dos fatores de complexidade relacionados a produção *offshore*, no entanto muitos outros podem ser considerados, como por exemplo, a demanda por sistemas e tecnologias que maximizem a produção, que pode ser mensurada através do barril de líquido/dia. O gás natural por sua vez é mensurado em metros cúbicos/dia (m<sup>3</sup>/dia).

Apresentado o contexto acima, é notório que pesquisas relativas à otimização na extração do óleo no ambiente marinho tem resultado em navios com peso total cada vez maior. Esse fato por consequência, acaba por requerer no âmbito da Engenharia Civil, o desafio de

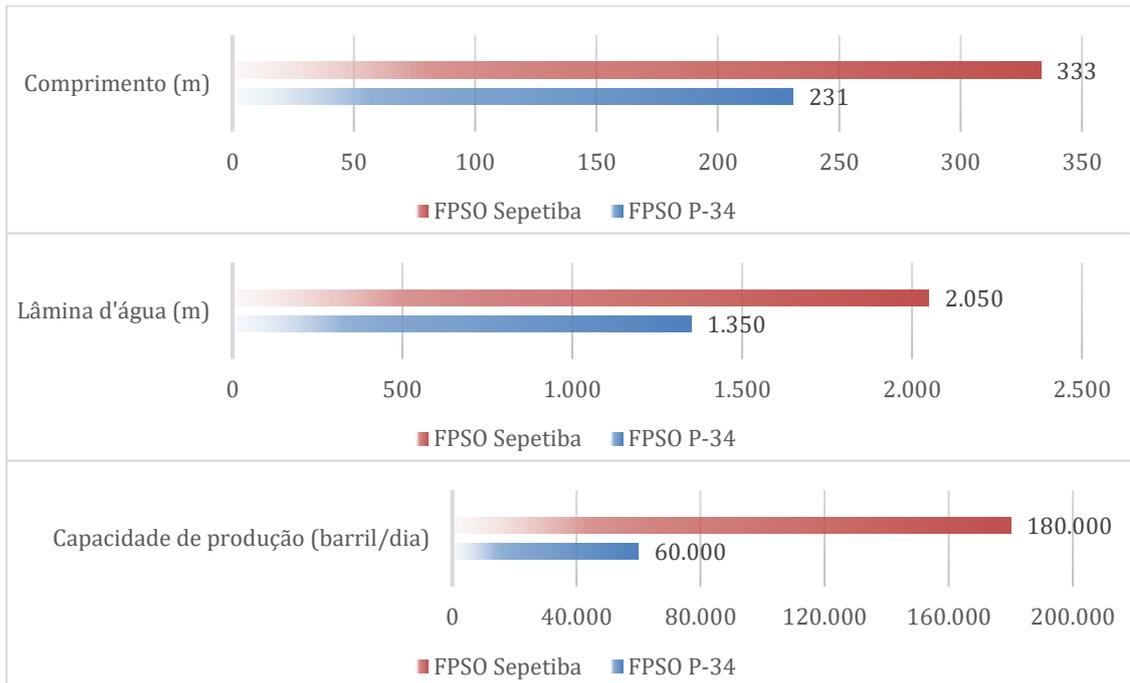
encontrar soluções para o dimensionamento de sistemas estruturais mais leves, e por consequência mais econômicos. A título de comparação, pode-se contrapor dois FPSO empregados na extração e produção de óleo e gás natural em águas nacionais. O primeiro trata-se da P-34, navio-plataforma da Petrobras localizado no Campo de Jubarte, que se encontra na porção norte da Bacia de Campos, a 77 quilômetros do Pontal de Ubu, município de Anchieta, litoral sul do Estado do Espírito Santo, em lâmina d'água variando entre 1.240 e 1.350 metros. Para estabelecer um parâmetro em termos de linha temporal, foi apurado que a Fase 1 de produção do campo de Jubarte estava programada para início em fevereiro de 2006 (CEPEMAR, 2004), sendo o pioneiro na produção do pré-sal da referida bacia.

Essa unidade de produção, estocagem e transferência foi originalmente construída no ano de 1959, no Estaleiro *Verolme United Shipyards* em Rotterdam, Holanda, e classificada pelo *Lloyd's Register of Shipping*, recebendo o nome de Presidente Juscelino, tendo sido rebatizada em 1968 com o nome de Presidente Prudente de Moraes. Em 1972, no estaleiro *Kobe Shipyard and Engine Works, Mitsubish Heavy Industries Ltd*, no Japão, a embarcação passou por uma jumborização (acréscimo no comprimento e no pontal), aumentando seu porte bruto das originais 32.945 toneladas para 53.600 toneladas. A primeira conversão em navio de processo ocorreu em 1976 também na *Mitsubish Heavy Industries Ltd*, no Japão, sendo a conversão atual para FPSO realizada pela Indústrias Verolme-Ishibras, no Rio de Janeiro, encerrada em 1997. Este FPSO possuía 231,10 metros de comprimento e capacidade de estocagem de 62.552 m<sup>3</sup>. A capacidade de processamento da P-34 era de 60 mil barris/dia de petróleo e 600.000 m<sup>3</sup>/dia de gás (CEPEMAR, 2004, p.36). Essa unidade já passou pelo processo de descomissionamento pela Petrobras, e não está mais em atividade nos dias atuais.

Em contraponto, tem-se o FPSO Sepetiba, comissionado para produção no campo de Mero 2, situado no Bloco de Libra, na Bacia de Santos, com profundidade de lâmina d'água atingindo 2.050 metros (PETROBRAS, 2021). Segundo a fabricante do FPSO, a companhia chinesa BOMESC, que opera o estaleiro responsável pela fabricação da embarcação, o Sepetiba tem 333 metros de comprimento, 64 metros de altura e 60 metros de largura, com uma área de convés principal equivalente a cerca de 3,5 campos de futebol padrão, capacidade de armazenamento de petróleo de 2 milhões de barris (BOMESC, 2023) e potencial de produção de até 180.000 barris de petróleo por dia (SBM OFFSHORE, 2023). Esse ativo teve o início de sua operação (primeiro óleo) em dezembro de 2023.

Abaixo, pode-se verificar no Gráfico 01 a comparação entre os FPSO, em termos de comprimento, capacidade de produção e lâmina d'água a ser superada, conforme dados informados acima:

Gráfico 1: Comparação entre os FPSO P-34 e FPSO Sepetiba.



Fonte: Bomesc / SBM Offshore / Petrobras

Analisando os dados acima, percebe-se a expansão da capacidade de produção de uma unidade *offshore* atual, proporcionalmente ao acréscimo em seu peso e dimensões, quando comparado a uma unidade de produção comissionada para operação há apenas duas décadas atrás. A seguir, são disponibilizadas na Figura 01, imagens de ambos os FPSO analisados, evidenciando que mesmo em mera comparação visual, as diferenças são perceptíveis.

Figura 1: À esquerda, FPSO P-34. À direita, FPSO Sepetiba.



Fonte: Shine.cn / Medium.com

Dado o contexto atual e o problema identificado, o presente trabalho se propõe a avaliar, na perspectiva da concepção estrutural, os dois principais métodos de cálculo e dimensionamento de estruturas de aço empregados nessas plataformas. Atualmente, existem algumas normas de referência para o dimensionamento de elementos estruturais metálicos, como a europeia EUROCODE3, a canadense CAN/CSA 516-01, e ainda a norma brasileira NBR 8800:2008, contudo este trabalho baseia-se na norma ANSI/AISC 360 *Specification for Structural Steel Buildings*, da renomada organização americana *American Institute of Steel Construction (AISC)*, cujo texto a princípio preconizava o Método das Tensões Admissíveis (ASD) como metodologia de cálculo. Todavia, as versões mais recentes da norma supracitada têm abordado conjuntamente o Método dos Estados Limites (LRFD) como uma abordagem igualmente disponível e aplicável para o cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas. Um panorama mais detalhado de como se deu essa transição e consolidação entre as duas metodologias dentro da norma supracitada será apresentado na seção de Revisão Bibliográfica.

Apesar de apresentarem algumas similaridades, como o uso de coeficientes de segurança em determinadas etapas de cálculo, são as diferenças existentes entre os métodos, sobretudo no que diz respeito ao dimensionamento final dos elementos estruturais, que justificam a realização desta análise comparativa.

Tendo em vista que o atual mercado de Engenharia no âmbito do cálculo de estruturas *offshore* é altamente competitivo, faz-se necessária uma abordagem que leve em consideração tanto os aspectos de segurança como de economicidade do projeto, pois estes dois fatores são indispensáveis quando trata-se da análise de viabilidade do empreendimento. Dessa perspectiva, torna-se evidente a importância do estudo e comparação das metodologias disponíveis, objetivando verificar dentre os métodos acima mencionados, aquele que alcança de forma mais satisfatória os aspectos destacados.

Por conseguinte, o presente tratado acadêmico visa apresentar conceitos, definições e parâmetros das metodologias apresentadas, baseando-se em literatura técnica, teses acadêmicas já propostas para o assunto em questão, assim como normas aplicáveis, com vistas a prover condições para uma comparação racional e equilibrada entre ambos os métodos, limitando-se a tratar da avaliação dos perfis “I” estruturais dimensionados pela norma ANSI/AISC 360-22 - *Specification for Structural Steel Buildings*. Esse estudo não abrange o escopo de perfis de seção tubular ou norma diferente da supracitada.

A relevância desse trabalho contribui diretamente para o conhecimento e aprofundamento nos estudos e conclusões comparativas dos métodos apresentados, no campo específico das estruturas *offshore*. A pesquisa tem como objetivo pontuar de forma clara as

vantagens e desvantagens resultantes do emprego de cada uma destas filosofias de cálculo. As conclusões estabelecidas ao final da presente análise restringem-se ao campo dos perfis metálicos fabricados em aço, não abrangendo a performance do Método das Tensões Admissíveis e do Método dos Estados Limites para estruturas em concreto armado e madeira, por exemplo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As metodologias utilizadas para o cálculo de estruturas metálicas vêm recebendo diferentes abordagens ao longo do tempo. Esse fato se dá devido a uma busca constante por otimizar o custo necessário de uma determinada estrutura e seu desempenho durante sua vida útil, face aos desafios impostos à exploração de petróleo em profundidades cada vez maiores em regiões marítimas.

José Mauro de Moraes, em seu livro “Petróleo em águas profundas”, afirma:

As dificuldades técnicas decorrentes das distâncias entre a plataforma e os poços são intensificadas pelo fato de a procura por petróleo avançar em direção a águas cada vez mais distantes das costas marítimas, conduzindo à quarta categoria de desafio a ser superado em decorrência das longas extensões no mar, isto é, vencer as maiores distâncias dos campos de petróleo em relação a terra. Esse condicionante está exigindo novo ciclo de inovações, destinadas a diminuir os custos logísticos, solucionar dificuldades técnicas relacionadas à disponibilização de equipamentos, provisões, produtos químicos e equipes de trabalho nas plataformas em alto mar, e **reduzir o tamanho e o peso das plataformas de produção**. (MORAIS, 2013, p.90, grifo meu).

À medida que são demandadas soluções cada vez mais complexas para os problemas relacionados à exploração em alto mar, também ocorrem avanços nos estudos relativos à concepção das estruturas que serão utilizadas para alocar e suportar os equipamentos na superfície marítima, na região onde se encontram os reservatórios que serão explorados. Do ponto de vista do cálculo estrutural, Paula Carnevale afirma:

Com o desenvolvimento da mecânica estrutural, foram criadas teorias quantitativas que progressivamente reproduziam melhor os diversos comportamentos estruturais. Essas melhorias ocorreram, entre outros motivos, nas definições reológicas dos materiais, na determinação dos esforços solicitantes, nas deformações e deslocamentos provocados por determinado carregamento ou ainda na definição de critérios de resistência dos materiais. (CARNEVALE, 2006, p.9).

Objetivando padronizar as teorias que são desenvolvidas, foram criadas normas, que se traduzem em conjuntos de diretrizes e especificações que devem ser observadas por engenheiros e projetistas, por ocasião da concepção dos projetos. Estas normas visam estabelecer uma base comum para o trabalho destes profissionais. Em relação às normas comumente empregadas para o dimensionamento de estruturas de aço, Walter Pfeil e Micheli Pfeil resumem:

No que diz respeito aos critérios para garantia de segurança da estrutura, as normas para projeto de estruturas metálicas utilizavam, até meados da década de 1980, o Método das Tensões Admissíveis, quando passaram gradativamente a adotar o Método dos Coeficientes Parciais, denominado no Brasil de Método dos Estados Limites. Na literatura norte-americana este método é conhecido pela sigla LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), que significa projeto com fatores aplicados às cargas e às resistências. As normas e recomendações aplicadas a edificações - brasileira, NBR 8800:2008; canadense, CAN/CSA 516-01; europeia, EUROCODE3- atualmente em vigor, baseiam-se no Método dos Estados Limites. As normas norte-americanas do *American Institute of Steel Construction (AISC)* mantiveram paralelamente em vigor o método das tensões admissíveis (*Allowable Stress Design - ASD*) e o método LRFD por meio de dois documentos independentes. Em 2005, foi publicada a versão integrada da norma contendo os dois métodos em um único documento, **ANSI/AISC 360-05**. (PFEIL & PFEIL, 2021, p.36, grifo meu).

Importante ressaltar que a norma supracitada ANSI/AISC 360-05 foi atualizada no ano de 2022, passando então a ser intitulada de ANSI/AISC 360-22 - *Specification for Structural Steel Buildings*. Nessa atual versão, permanece a estratégia de manter incorporado em paralelo tanto os métodos de projeto no formato ASD quanto no formato LRFD.

O Método das Tensões Admissíveis foi a metodologia precursora a ser concebida e reconhecida a nível internacional para o estabelecimento de requisitos de projeto. Esta metodologia tem por característica ser mais simplificada em relação ao Método dos Estados Limites, assim como apresenta uma abordagem mais conservadora. A premissa fundamental do método ASD é a adoção da condição na qual a tensão máxima permitida não exceda o limite de escoamento de um determinado material.

As tensões resultantes são calculadas admitindo-se comportamento elástico e linear. A tensão admissível é uma fração de alguma tensão limitante (escoamento, flambagem, etc). A relação da tensão limitante para a tensão admissível é denominada fator de segurança (CARNEVALE, 2006, p.9).

A principal limitação deste método reside no fato de que não é realizada uma verificação de outras condições que possam invalidar a utilização da estrutura, como por exemplo, o

aparecimento de deformidade exagerada da mesma (SALES, MALITE & GONÇALVES, 2020, p. 32).

A partir da década de 1970, instituições como API e DNV iniciaram a incorporação de estudos probabilísticos na calibração de seus respectivos códigos. Até esse ponto, apenas a metodologia ASD era usada como premissa de cálculo. Deste modo, pela primeira vez os métodos probabilísticos são vistos como uma ferramenta racional para alcançar o equilíbrio entre um projeto seguro e de custo otimizado, surgindo na literatura o segundo método para definição de critérios de projeto, conhecido como Método dos Estados Limites - *Load and Resistance Factor Design, LRFD* (EPC ENGENHARIA, 2018). Esse método pode ser considerado semiprobabilístico, porque apesar de incorporar elementos probabilísticos, também mantém uma abordagem determinística para o projeto de estruturas.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre duas determinadas metodologias para o dimensionamento de estruturas metálicas utilizadas no setor *offshore*, mais especificamente nos módulos concebidos em estrutura metálica para emprego em plataformas do tipo FPSO. As metodologias supracitadas, já apresentadas no capítulo anterior, são intituladas Método das Tensões Admissíveis (ASD) e Método dos Estados Limites (LRFD).

No Método das Tensões Admissíveis, o dimensionamento é considerado satisfatório quando a máxima tensão solicitante  $\sigma$  em cada seção é inferior a uma tensão resistente reduzida por um coeficiente de segurança  $\gamma$ . A tensão resistente é calculada considerando-se que a estrutura pode atingir uma das condições limites (estados limites últimos) (PFEIL & PFEIL, 2021, p.36). A equação básica (1) para esta metodologia é formulada a seguir:

$$\sigma_{max} \leq \frac{F_y}{\gamma} \quad (1)$$

onde,

$\sigma_{max}$ : tensão admissível;

$F_y$ : tensão de escoamento do material;

$\gamma$ : coeficiente que considera as incertezas em relação ao carregamento, resistência do material, modelo de cálculo utilizado e imperfeições na execução. Seu valor é consequência do tipo de solicitação.

No Método dos Estados Limites, a garantia de segurança dos estados limites é traduzida pela equação de conformidade (2), para cada seção da estrutura:

$$S_d = S(\sum \gamma_{fi} F_i) < R_d = R(f_k / \gamma_m) \quad (2)$$

onde,

$S_d$ : solicitação de projeto;

$R_d$ : resistência de projeto.

A solicitação de projeto é obtida a partir de uma combinação de ações características  $F_{ik}$ , cada uma majorada pelo coeficiente  $\gamma_{fi}$ , enquanto a resistência de projeto é função da resistência característica do material  $f_k$ , minorada pelo coeficiente  $\gamma_m$ . Os coeficientes  $\gamma_f$ , de majoração das cargas (ou ações) e  $\gamma_m$ , de redução da resistência, refletem as variabilidades dos valores característicos dos diversos carregamentos e das propriedades mecânicas do material, entre outros fatores. A segurança das estruturas fica garantida sempre que a diferença ( $R - S$ ), denominada margem de segurança  $M$ , for positiva (PFEIL & PFEIL, 2021, p.38).

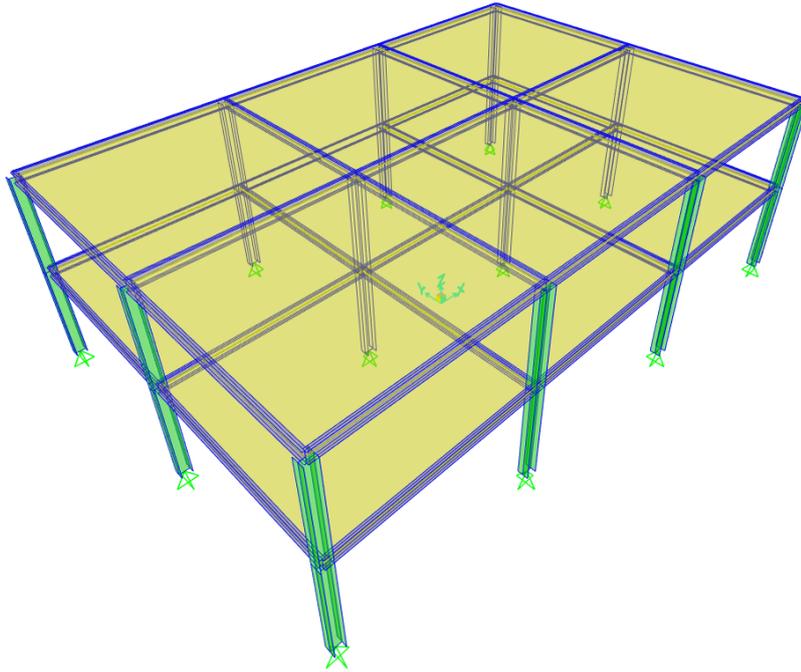
Para a realização da análise comparativa, foi elaborado modelo de estrutura metálica através do programa computacional de análise estrutural por elementos finitos SAP 2000, tendo como base uma amostragem de configuração usualmente encontrada nos FPSO atuais.

O modelo concebido é integralmente projetado como estrutura metálica, composto por 12 pilares, e 14 vigas em formato I, subdivididas em dois níveis. Cada nível apresenta um total de 12 pilares e 7 vigas. A estrutura apresenta um total de 58 segmentos de barras, entre pilares e vigas, conforme apresentado na Figura 02. Para o fechamento do piso foram adotadas chapas de aço, abrangendo os dois níveis.

A condição de contorno adotada para o apoio dos pilares foi a condição de engaste, ou seja, restrição ao deslocamento e rotação nas três dimensões. A conexão entre os elementos viga-viga e viga-coluna foi considerada soldada em todo perímetro de contato entre eles.

A configuração de materiais foi definida para trabalho com ASTM A572, e padronização com perfil Gerdau. A seguir, é apresentada a Figura 02, demonstrando uma vista isométrica do modelo, extraída do programa computacional.

Figura 2: Modelo estrutural – Vista isométrica

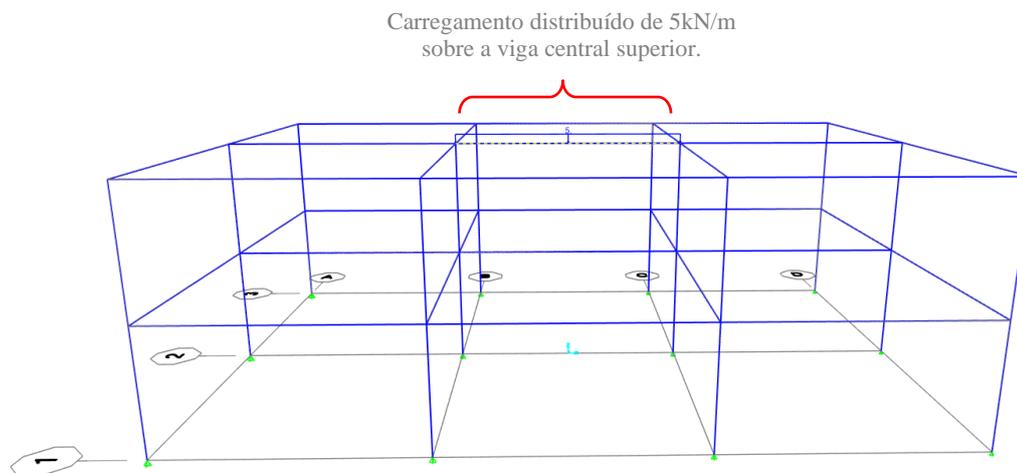


Fonte: SAP 2000

Os seguintes carregamentos foram considerados para avaliação da estrutura dentro das 28 combinações realizadas, incluindo ASD e LRFD:

- Peso próprio (-Z, +X e +Y): Calculado automaticamente pelo programa computacional, levando em consideração a seção transversal escolhida e o peso volumétrico do aço;
- Peso próprio não modelado (-Z, +X e +Y): Simulado através de uma sobrecarga de 100 kg/m<sup>2</sup>, considerando o peso de chapas, soldas e elementos de conexão não modelados pelo programa;
- Sobrecarga: Adotou-se uma sobrecarga de 500 kg/m<sup>2</sup>, supondo cargas referentes a manutenção e operação da área;
- Vento: Considerada uma rajada de vento de 100 Km/h aplicada em todos os pilares, na direção X e Y, de acordo com valores aproximados, apresentados nos estudos realizados sobre estimativa dos períodos de retorno da velocidade e rajada do vento, por Dias, Palmeira e Libonati, 2021.
- Equipamentos (-Z, +X e +Y): Inserido um carregamento distribuído de 5 kN/m sobre a viga central, conforme indicado na Figura 03, simulando a existência de um equipamento no centro da estrutura.

Figura 3: Modelo estrutural proposto – Vista em perspectiva



Fonte: SAP2000

As cargas inerciais (peso próprio, peso próprio não modelado e peso de equipamentos) foram aceleradas nas direções X, Y e Z, empregando fatores típicos de aceleração adotados nos mares brasileiros.

Como configurações necessárias no programa computacional para simular condições mais próximas possíveis do cenário real ao qual a estrutura está exposta, alimentou-se o modelo matemático respeitando as seguintes premissas:

- A sobrecarga e carga de vento não são incrementadas com acelerações, pelo fato de não serem cargas inerciais. Apenas as cargas inerciais são aceleradas;
- O peso próprio não modelado nas direções X, Y e Z são acelerados pelos mesmos valores que as cargas inerciais, dentro das combinações existentes para ASD e LRFD.

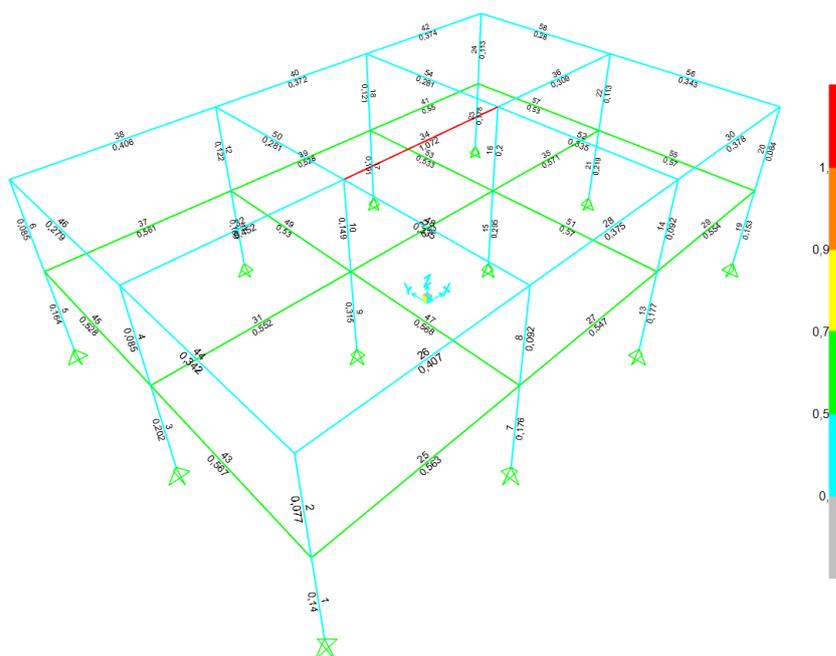
Ressalta-se que não é objeto do presente trabalho a avaliação das tensões nas placas, somente dos elementos lineares. Os elementos de placa são modelados somente com o intuito de simular a rigidez do conjunto placa-viga.

#### 4. RESULTADOS

A seguir, são apresentados na Figura 04 e Figura 05 os resultados da análise estrutural realizada, baseando-se nas metodologias ASD e LRFD respectivamente, de acordo com o modelo proposto (Figura 02), e parâmetros informados na seção anterior, observando a norma AISC 360-22.

#### 4.1) Análise de tensão no Método das Tensões Admissíveis:

Figura 4: Resultado em ASD – Vista em perspectiva



Fonte: SAP 2000

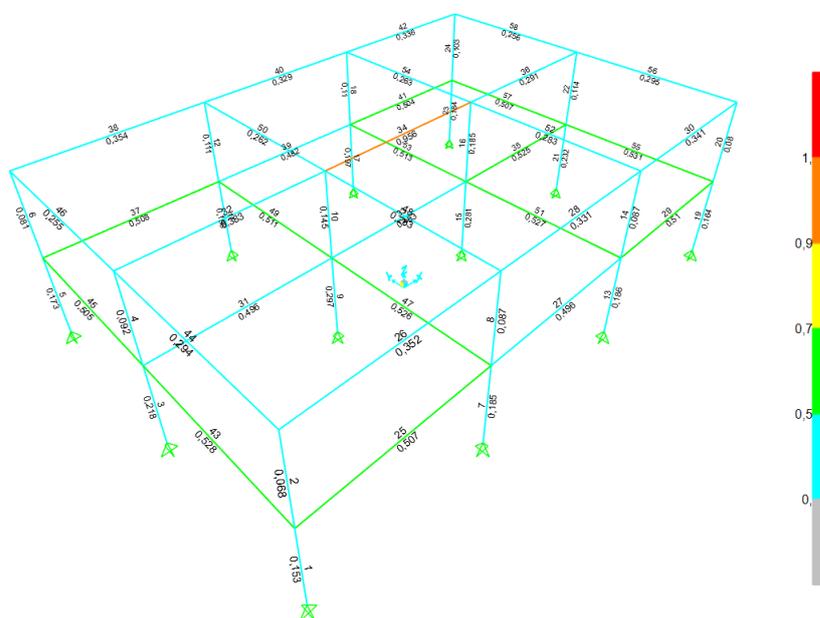
Faz-se necessária uma breve explanação de como os resultados da análise estão sendo apresentados / categorizados na Figura 04. No lado direito da figura pode-se notar uma legenda em formato de barra vertical, indicando através de cores a categorização do resultado do quociente entre a máxima tensão solicitante  $\sigma$  em relação a tensão resistente da barra, reduzida por um coeficiente de segurança  $\gamma$ , em cada seção separadamente (trataremos aqui esse quociente pelo termo *razão de tensões*). Em outras palavras, quanto mais próximo do valor 1, mais próxima está a seção de atingir um dos estados limites, de acordo com o Método das Tensões Admissíveis (ASD).

Verifica-se então que a barra com maior razão de tensões é a viga central superior do modelo, que na análise teve resultado de 1,072. Este resultado justifica-se, tendo em vista que sobre essa seção foi aplicado um carregamento distribuído de 5kN/m. Nesta configuração, o resultado da análise na seção denota que a tensão solicitante está acima do valor da tensão

resistente da barra, ou seja, acima do que a barra pode suportar, portanto não seria aceitável seguir com o projeto nestes termos. As demais barras que compõem o modelo (vigas e pilares) resultaram em solicitações significativamente menores. As seções de vigas do primeiro nível em sua totalidade tiveram resultado contido no intervalo entre 0,5 – 0,7. As seções de vigas do segundo nível apresentaram resultado contido no intervalo 0 – 0,5. Detalhes podem ser encontrados na Tabela 1.

#### 4.2) Análise de tensão no Método dos Estados Limites:

Figura 5: Resultado em LRFD – Vista em perspectiva



Fonte: SAP 2000

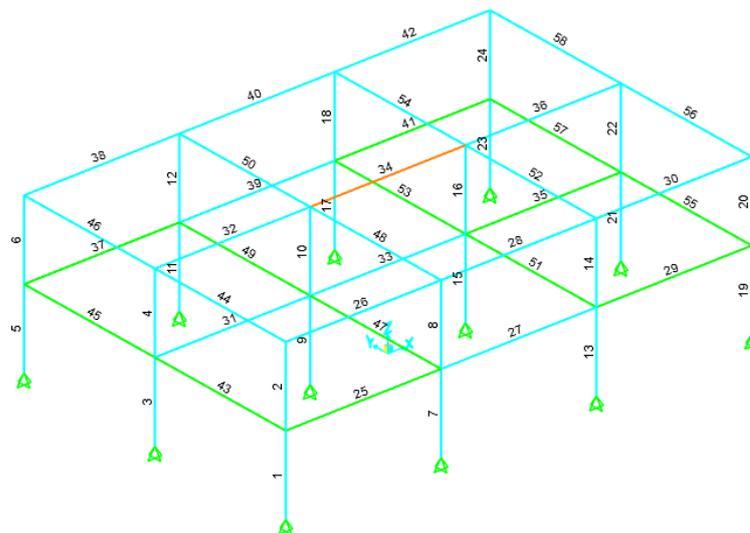
O isométrico apresentado na Figura 05 segue os mesmos padrões já mencionados na seção anterior, ou seja, baseia-se na norma AISC 360-22 e a legenda à direita em formato de barra vertical visa apresentar o parâmetro para avaliação da razão de tensões em cada seção do modelo, porém agora de acordo com o Método dos Estados Limites (LRFD).

Nota-se que a viga central também foi a que apresentou resultado mais próximo de 1, assim como na análise em ASD. Porém o resultado da análise nessa barra ficou abaixo do valor unitário (0,956), evidenciando que a viga foi solicitada dentro do estado limite.

Outro fator importante foi o resultado da análise para as vigas do 1º nível (nível inferior). Das 17 seções de vigas dispostas no nível inferior, 13 apresentaram resultado dentro do mesmo intervalo em comparação a análise em ASD, porém, ao serem comparados através do Gráfico 03, evidencia-se através das linhas de tendência que em todas estas barras a razão de tensões em LRFD foi menor.

Pode-se notar que, comparando-se os resultados em ASD e LRFD, na primeira metodologia as solicitações estão mais próximas a tensão máxima admissível (tensão resistente). Esse fato torna-se uma preocupação quando o valor máximo é ultrapassado, e este cenário se dá na seção da viga central superior. As barras que compõem as vigas do nível inferior também apresentaram maior número dentro do intervalo 0,5 – 0,7 na análise em ASD, se comparada com a análise em LRFD, porém como estão muito abaixo do limite (valor unitário), não acrescentam dificuldades ao correto dimensionamento. Abaixo, é apresentada uma tabela comparativa (Tabela 01) para cada barra/seção, e na sequência, dois gráficos complementares (Gráfico 02 para pilares e Gráfico 03 para vigas) de acordo com os resultados das respectivas análises em ASD e LRFD detalhados na tabela. Para explicitar a identificação da localização das barras na estrutura, é apresentado abaixo na Figura 06, uma vista em perspectiva com numeração dos eixos das barras verticais e horizontais, essa numeração é a mesma utilizada na Tabela 01. Ressalta-se que, para uma melhor organização, os pilares e vigas foram sequenciados e separados na numeração, ou seja, os segmentos que representam os pilares receberam a numeração de 1 a 24, e os segmentos que representam as vigas receberam numeração de 25 a 58.

Figura 6: Modelo estrutural – Perspectiva



Fonte: SAP 2000

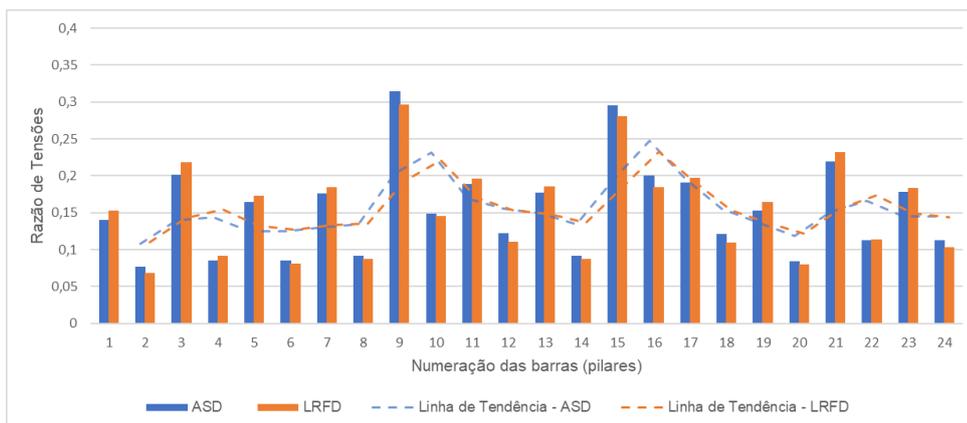
Na Tabela 01 são relacionados os resultados obtidos nas análises, tanto numéricos quanto em relação à respectiva categorização de cores dada na legenda das Figuras 04 e 05. Também é apresentada uma primeira análise, demonstrando a diferença percentual dos valores em ASD em relação aos valores em LRFD.

Tabela 1: Análise comparativa da razão tensões das barras

Barra	Tipo	Resultado ASD		Resultado LRFD		Diferença percentual entre ASD e LRFD
1	Pilar	0,14		0,153		8,9%
2	Pilar	0,077		0,068		12,4%
3	Pilar	0,202		0,218		7,6%
4	Pilar	0,085		0,092		7,9%
5	Pilar	0,164		0,173		5,3%
6	Pilar	0,085		0,081		4,8%
7	Pilar	0,176		0,185		5%
8	Pilar	0,092		0,087		5,6%
9	Pilar	0,315		0,297		5,9%
10	Pilar	0,149		0,145		2,7%
11	Pilar	0,189		0,196		3,6%
12	Pilar	0,122		0,111		9,4%
13	Pilar	0,177		0,186		4,9%
14	Pilar	0,092		0,087		5,6%
15	Pilar	0,295		0,281		4,9%
16	Pilar	0,2		0,185		7,8%
17	Pilar	0,191		0,197		3,1%
18	Pilar	0,121		0,11		9,5%
19	Pilar	0,153		0,164		6,9%
20	Pilar	0,084		0,08		4,9%
21	Pilar	0,219		0,232		5,8%
22	Pilar	0,113		0,114		0,9%
23	Pilar	0,178		0,184		3,3%
24	Pilar	0,113		0,103		9,2%
25	Viga	0,563		0,507		10,5%
26	Viga	0,407		0,352		14,5%
27	Viga	0,547		0,498		9,4%
28	Viga	0,375		0,331		12,5%
29	Viga	0,554		0,51		8,3%
30	Viga	0,378		0,341		10,3%
31	Viga	0,552		0,496		10,7%
32	Viga	0,452		0,383		16,5%
33	Viga	0,53		0,483		9,3%
34	Viga	1,072		0,956		11,4%
35	Viga	0,571		0,525		8,4%
36	Viga	0,309		0,291		6%
37	Viga	0,561		0,508		9,9%
38	Viga	0,406		0,354		13,7%
39	Viga	0,528		0,482		9,1%
40	Viga	0,372		0,329		12,3%
41	Viga	0,55		0,504		8,7%
42	Viga	0,374		0,336		10,7%
43	Viga	0,567		0,528		7,1%
44	Viga	0,342		0,294		15,1%
45	Viga	0,568		0,505		11,7%
46	Viga	0,279		0,255		9%
47	Viga	0,568		0,526		7,7%
48	Viga	0,335		0,283		16,8%
49	Viga	0,53		0,511		3,6%
50	Viga	0,281		0,262		7%
51	Viga	0,57		0,527		7,8%
52	Viga	0,335		0,283		16,8%
53	Viga	0,533		0,513		3,8%
54	Viga	0,281		0,263		6,6%
55	Viga	0,57		0,531		7,1%
56	Viga	0,343		0,295		15%
57	Viga	0,53		0,507		4,4%
58	Viga	0,28		0,256		8,9%

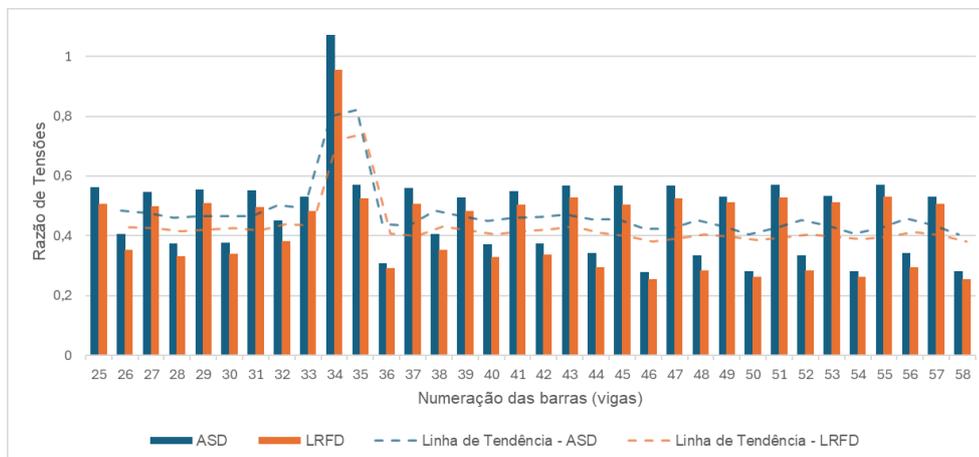
Nos Gráficos 02 e 03 são realizadas comparações entre a razão de tensões encontrada nas análises de ambas as metodologias. O eixo X representa cada um dos segmentos que compõem a estrutura. O eixo Y apresenta intervalos de valores para razão de tensões. As linhas de tendência visam explicitar semelhanças ou contrastes entre as metodologias, nas saídas das análises.

Gráfico 2: Comparação entre razão de tensões dos pilares (ASD x LRFD).



Fonte: SAP 2000

Gráfico 3: Comparação entre razão de tensões das vigas (ASD x LRFD).



Fonte: SAP 2000

É possível notar que a diferença entre os métodos se dá em maior escala para elementos estruturais solicitados a esforços elevados (acima de 50% de sua capacidade). Para elementos nos quais os esforços solicitantes são baixos, a diferença entre os métodos se mostra pouco relevante.

## 5. CONCLUSÃO

Dados os resultados acima, conclui-se que o Método dos Estados Limites proporcionou um dimensionamento mais otimizado à estrutura, convergindo nesse sentido para uma estrutura mais favorável em termos econômicos. Tendo em vista que neste método é levado em consideração as origens das ações, a variação da intensidade e a responsabilidade da estrutura, os resultados da análise apresentam-se mais aderentes ao modelo proposto. Isso pode ser explicado pelo fato que neste método é utilizado o coeficiente de segurança externo, que ao ser multiplicado pelo carregamento que está atuando no elemento, dá lugar a um novo valor, que considera os fatores já mencionados acima (origens, variação e responsabilidade).

Percebe-se que na barra sobre a qual foi aplicado o carregamento distribuído, a razão de tensões chegou próxima ao limite máximo permitido (0,956), evidenciando a otimização alcançada, e contrastando com o valor obtido no Método das Tensões Admissíveis, situado acima de 1 (1,072), e, portanto, inviabilizando o dimensionamento da estrutura nesta configuração de modelo e carregamento propostos.

Por fazer utilização de um único coeficiente de segurança para expressar todas as incertezas, independentemente de sua origem, o Método das Tensões Admissíveis acaba por propor uma estrutura mais conservadora em termos de capacidade de resistência estrutural das barras. Isso pode ser notado nos resultados fornecidos através da Tabela 01 e condensados no Gráfico 03, tendo em vista que as seções de viga em sua totalidade apresentaram razão de tensões maiores no ASD, se comparadas ao LRFD, conforme claramente demonstrado através das linhas de tendência de ambas as metodologias. Essa diferença é acentuada na barra central superior onde a carga distribuída de 5kN/m está aplicada, simulando as solicitações de um equipamento sobre a viga central superior da estrutura. Constata-se que, por lançar foco somente na proposição de uma distância pertinente entre a situação de utilização e a situação relativa ao colapso da estrutura, o Método das Tensões Admissíveis tem uma abordagem menos satisfatória em termos de verificação de condições que possam invalidar a utilização da estrutura, tendo essa desvantagem ficado clara na comparação proposta entre as análises do modelo. Importante observar que, em relação ao resultado da análise nos pilares da estrutura, não foram notadas diferenças significativas, tendo ocorrido inclusive alguns casos em que a razão de tensões em LRFD apresentou resultado ligeiramente maior.

Verifica-se por fim que o Método dos Estados Limites apresenta uma abordagem mais racional, e em consequente, mais atrativa ao viabilizar um uso mais otimizado e econômico do modelo estrutural apresentado, através da utilização de fatores diferenciados para cada

combinação de carregamentos, no entanto sem prejuízos no que diz respeito a segurança da estrutura, tanto para estados limites últimos quanto para estados limites de utilização.

Tendo em vista as restrições deliberadamente propostas para o presente trabalho, sugere-se para tratados acadêmicos futuros a avaliação das deformações dos elementos levando em consideração a otimização de estruturas pelo Métodos das Tensões Admissíveis e pelo Método dos Estados Limites, dado que uma estrutura pode ser otimizada empregando o processo de análise no Método dos Estados Limites, mas por critérios de utilização a estrutura não se encontrará apta, por aspectos relacionados a esbeltez e flambagem das seções, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION - AISC. ANSI/AISC 360-22 - Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, 2022.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Campo de Mero (AIP) | 2021 – Rio de Janeiro, 2021.

BOMESC. FPSO SEPETIBA Set Sail Smoothly. 2023. Disponível em: <<https://www.bomesc.com/news/239.html>>. Acesso em: 16 dezembro 2023.

CARNEVALE, Paula Baliú. Comparação entre o dimensionamento de uma estrutura offshore pelo método das tensões admissíveis e pelo método dos estados limites. Rio de Janeiro, 2006.

CEPEMAR. EIA - Estudo Ambiental do Campo de Jubarte. Rio de Janeiro, 2004.

DIAS, E.M., PALMEIRA, A.C.P.A., LIBONATI, R. 2021. Estimativa dos períodos de retorno da velocidade e rajada do vento e altura significativa das ondas no atlântico sudoeste. Revista S&G 16, 1, 84-100. <https://revistasg.emnuvens.com.br/sg/article/view/1703>

MORAIS, José Mauro de. Petróleo em Águas Profundas. Brasília: Ipea, 2013.

EPC ENGENHARIA. Critérios de projeto: Diferença entre método de tensões admissíveis (WSD) e método dos estados limites (LRFD). 2018. Disponível em: <<https://engenhariaepc.wordpress.com/2018/12/05/criterios-de-projeto-diferenca-entre-metodo-de-tensoes-admissiveis-wsd-e-metodo-dos-estados-limites-lrfd/>>. Acesso em: 04 novembro 2023.

PETROBRAS. Licença de Instalação do Projeto Mero 2 é expedida. 2021. Disponível em: <<https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/w/licenca-de-instalacao-do-projeto-mero-2-e-expedida>>. Acesso em: 16 Maio 2024.

PFEIL, Walter. PFEIL, Michèle. Estruturas de Aço: dimensionamento prático – 9 ed. – Rio de Janeiro, LTC, 2022.

SALES, José Jairo de. MALITE, Maximiliano. GONÇALVES, Roberto Martins. SET-403 - Sistemas Estruturais - Segurança nas Estruturas. São Carlos, 2020.

SBM OFFSHORE. FPSO Sepetiba Sails Away. 2023. Disponível em: <<https://www.sbmoffshore.com/newsroom/news-events/fpso-sepetiba-sails-away/>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

SOUZA, Leonardo Silveira de. SGARBI, Geraldo Norberto Chaves. Bacia de Santos no Brasil: geologia, exploração e produção de petróleo e gás natural. Santander, 2019.

THOMAS, José Eduardo. Fundamentos de engenharia de petróleo – 2 ed. – Rio de Janeiro, Interciência, 2004.