UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL

LEONARDO MACHADO MATOS

PROJETO À FADIGA DE TUBULAÇÕES RÍGIDAS DO *HULL* E *TOPSIDE* DE UM FPSO

Niterói, RJ
2020

LEONARDO MACHADO MATOS

PROJETO À FADIGA DE TUBULAÇÕES RÍGIDAS DO *HULL* E *TOPSIDE* DE UM FPSO

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Lopes Gama

Niterói, RJ
2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M425p Matos, Leonardo Machado
Projeto à Fadiga de Tubulações Rígidas do Hull e Topside de um FPSO. / Leonardo Machado Matos ; Antônio Lopes Gama, orientador ; Roger Matsumoto Moreira, coorientador. Niterói, 2020.
215 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2020.mp.10030657750

1. Análise de Fadiga. 2. Tubulações Offshore. 3. Análise de Flexibilidade. 4. Plataforma FPSO. 5. Produção intelectual. I. Gama, Antônio Lopes, orientador. II. Moreira, Roger Matsumoto, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

LEONARDO MACHADO MATOS

PROJETO À FADIGA DE TUBULAÇÕES RÍGIDAS DO *HULL* E *TOPSIDE* DE UM FPSO

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Aprovada em 09 de dezembro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Lopes Gama - Orientador
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. Dr. Juan Manuel Pardal
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. Dr. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

Niterói, RJ
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pela oportunidade da vida e por ter me concedido a possibilidade de todos os aprendizados que tive até aqui.

Agradeço à minha amada esposa Rayanne que sempre me apoiou, apesar de todas as dificuldades que temos pelo caminho. Com ela, aprendi, e continuo aprendendo a cada dia, a ter uma visão de mundo mais humana, na qual a real importância dessa vida é o amor entre os seres.

Agradeço à minha mãe Enildes por todos os ensinamentos, incentivos e suporte oferecido desde sempre.

Agradeço ao meu pai Afonso pela inspiração de perseverança, força e dedicação.

Agradeço ao meu irmão Raphael pelo exemplo de garra, determinação e superação que sempre me deu e me dá até os dias de hoje.

Agradeço ao meu sobrinho Dereck e ao Pingo pela alegria que trazem à nossa família.

Agradeço aos meus amigos Diego e Thaís pelo exemplo de amizade verdadeira, para todas as horas.

Amo todos vocês.

Muito agradecido por todo o conhecimento oferecido pelo Professor Antônio Gama. Pela paciência e dedicação nas inúmeras horas de conversas ao telefone e reuniões ao longo de toda a orientação do trabalho.

Agradeço ao Professor Roger Matsumoto Moreira pelo suporte dado ao longo da dissertação e desenvolvimento do projeto.

Agradeço aos funcionários da Petrobras Walber, Breno, Jordana, Medeiros e Alvim pela oportunidade de aprofundamento neste assunto tão relevante em sistemas de tubulações de unidades *offshore*.

Agradeço também à todos os amigos que fiz em minha jornada e que colaboraram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

RESUMO

Este trabalho trata da análise de fadiga em tubulações rígidas presentes no *hull* e *topside* de um navio FPSO. Para tanto, buscou-se analisar os procedimentos de análise de fadiga, identificar suas diferenças, e principalmente, propor uma nova padronização, a fim de reduzir o tempo de execução de projetos, otimizando arranjos de tubulação e *suportação*, bem como obter resultados mais assertivos, com uma maior precisão da vida útil das tubulações *offshore*. Neste sentido, o trabalho foi realizado a partir de um embasamento teórico pautado em pesquisa bibliográfica e estudo de caso de variados sistemas de tubulações presentes em plataformas do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). Descobriu-se que uma nova metodologia de avaliação de fadiga baseada no critério da tensão admissível permite ao engenheiro a possibilidade de uma análise mais rápida, com uma significativa diminuição da quantidade de casos de carregamentos, alcançando também, uma maior precisão do resultado.

Palavras-chave: Análise de fadiga; Tubulações *offshore*; Padronização de procedimentos; navio FPSO.

ABSTRACT

This work deals with the fatigue analysis of rigid pipes in the hull and topside of a FPSO ship. To this end, we sought to analyse fatigue procedures, identifying the differences between them, and mainly to propose a new standardization, in order to reduce the time of project execution, to optimize piping and support arrangements, as well as obtaining more assertive results, with a greater accuracy of the useful life of offshore pipelines. In this sense, the work was carried out based on a theoretical basis, bibliographic research and case studies of various piping systems present in FPSO (Floating Production Storage and Offloading) platforms. It was found that a new fatigue assessment methodology based on the allowable stress criterion allows the engineer the possibility of a faster analysis, with a significant decrease in the number of load cases, also achieving greater accuracy of results.

Keywords: Fatigue analysis; Offshore pipelines; Standardization of procedures; FPSO ship.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I **13**

1.1 INTRODUÇÃO 13

CAPÍTULO II **18**

2.1 DNV RP D101 *STRUCTURAL ANALYSIS OF PIPING SYSTEMS* (2017) 19

2.2 ASME B31.3 *PIPING PROCESS* (2018) 20

2.2.1 Consideração da Fadiga Devido aos Ciclos de Temperatura – Conforme ASME B31.3 ..... **21**

2.2.2 Análise de Fadiga **23**

2.2.2.1 Dano à fadiga devido à faixa de tensões cíclicas de outras fontes de fadiga que não ondas 24

2.2.2.2 Dano à fadiga devido à faixa de tensões cíclicas devido às ondas 25

2.2.2.3 Método de análise de fadiga alternativo 25

2.3 DNV RP C203 *FATIGUE DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES* (2010) 26

2.3.1 Curvas S-N **28**

2.3.2 Métodos de Análise de Fadiga **30**

2.3.3 Cálculo do Dano Acumulado **31**

2.3.4 Tubulações e *Risers* **31**

2.3.5 Casos em que uma Análise de Fadiga Detalhada Pode Ser Omitida **32**

2.3.6 Fadiga de Alto e Baixo Ciclo **33**

2.4 BS PD 5500 UNFIRED FUSION WELDED PRESSURE VESSELS (1997) 33

2.4.1 Método Simplificado de Análise Utilizando Curvas de Fadiga **35**

2.4.2 Método Detalhado de Avaliação de Fadiga **35**

2.4.2.1 Curvas S-N para avaliação dos detalhes de solda 35

2.4.2.2 Curvas S-N 36

2.4.2.3 Consideração do efeito do material 38

2.4.2.4. Consideração do efeito da espessura de chapa 38

2.5. ASME B31J *Stress Intensification Factors, Flexibility Factors* (2017) 39

2.6. DNV OS C101 *Design of Offshore Steel Structures, General* – LRDF *Method* (2016) 39

2.6.1 *Design Fatigue Factors* (DFF) **39**

2.7 IGE / TD / 12 *Pipework Stress Analysis for Gas Industry Plant. Recommendations on Transmission and Distribution Practice* (2013) 40

2.7.1 Classes de fadiga **40**

2.8 UKOOA FPSO *Design Guidance Notes for* UKCS *Service* (2002) 42

2.9 ABS *Spectral-Based Fatigue Analysis for* FPSO *Installations* (2018) 43

2.10 IIW *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components* (2008) 47
2.11 Considerações sobre as Normas Europeias e Americanas 48
2.12 Estudo Comparativo entre Procedimentos de Projeto à Fadiga de Tubulações em FPSO 51
CAPÍTULO III 55
3.1 FONTES DE DANOS POR FADIGA EM TUBULAÇÕES *OFFSHORE* 55
3.1.1 Tensões térmicas devido aos ciclos operacionais 55
3.1.2 Tensões devido às acelerações 57
3.1.2.1 Aplicação de dados de acelerações no *software* de análise de tensões 61
3.1.2.2 Tensão Média 61
3.1.2.3 Aceleração Resultante (SRSS) 62
3.1.2.4 Efeito da não linearidade 62
3.1.2.5 Cálculo de fadiga pelo *software* CAESAR II 63
3.1.2.6 *Range* de tensão devido à aceleração 64
3.1.2.7 Casos de Carregamento 64
3.1.3 Tensões devido aos deslocamentos estruturais 66
3.1.3.1 Consideração de Fatores de Altura de Onda 67
3.1.3.1.1 Determinação dos Fatores de Altura de Onda 69
3.1.3.2 Distribuição do Dano por Fadiga em função da Altura de Onda 71
3.1.4 Tensões devido ao armazenamento e descarregamento da plataforma 78
CAPÍTULO IV 79
4.1 NOVOS FATORES DE FLEXIBILIDADE E INTENSIFICAÇÃO DE TENSÃO DA ASME B31.J 79
CAPÍTULO V 86
5.1. ESTUDOS DE CASOS DE PROJETOS À FADIGA DE TUBULAÇÕES *OFFSHORE* 86
5.1.1 Estudo de Caso 1 86
5.1.1.1 Linha do *Flare* (30”) ao longo do *pipe rack* 86
5.1.1.2 Linha de 4” ao longo do *pipe rack* 93
5.1.2 Estudo de Caso 2 – Linha de 12” (Gás) 101
5.1.3 Estudo de Caso 3 – Fadiga Térmica x Fadiga devido às acelerações e deslocamentos 111
5.1.3.1 Arranjo 1 com Ø8”: 111
5.1.3.2 Arranjo 2 com Ø8”: 113
5.1.3.3 Arranjo 3 com Ø8” e Ø20”: 115
5.1.4 Avaliação de Dano por Faixa de Altura de Ondas 117
5.1.5 Aceleração Crítica 119

5.1.6 Arranjo com curva 1,5D X curva 5D 123
5.1.6.1 Determinação dos fatores SIF e K das curvas 125
5.1.6.2 Resultados 126
5.1.7 Comparativo entre configurações de *suportação* de sistemas de tubulações . 127
5.1.8 Sistema com peso da válvula triplicado 133
5.1.8.1 - Comparativos de Resultados 136
5.1.9 Sistema conforme norma B31.3 e norma B31.J 136
5.1.9.1 - Determinação dos fatores conforme ASME B31.3. 138
5.1.9.2 - Determinação dos SIF's conforme ASME B31.J 139
5.1.9.3 - Aplicação dos fatores determinados de acordo com a ASME B31.J 139
5.1.9.4 - Comparativos entre danos 140
5.1.10 Combinações de Casos de Carregamento – Acelerações (efeito da não linearidade) 141
CAPÍTULO VI 148
6.1 PROPOSTAS DE PROCEDIMENTOS DE PROJETO À FADIGA DE TUBULAÇÕES 148
6.1.1 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério de Acúmulo de Dano 150
6.1.2 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério da Tensão Admissível 165
CAPÍTULO VII 177
7.1 APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE FADIGA 177
7.1.1 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério do Acúmulo de Dano 177
7.2 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério da Tensão Admissível 179
CAPÍTULO VIII 184
8.1 PROPOSTAS DE NOVOS ESTUDOS E CONCLUSÃO 184
CAPÍTULO IX 185
9.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 185
CAPÍTULO X 188
10.1 APÊNDICES 188
10.1.1 Caso de carregamento do projeto executado – Estudo de Caso 5.1 188
10.1.2 Caso de carregamento do projeto executado – Estudo de Caso 5.2 199
10.1.3 Caso de carregamento do projeto executado – Estudo de Caso 5.3 203
10.1.4 Determinação da Tensão de Fadiga pelo CAESAR II 212

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1 Vista em planta de um navio FPSO com os vários módulos de processo e utilidades, bem como o *pipe rack* disposto ao longo do navio – Fonte: (S/D). 14

Fig. 2 Esquemático das várias solicitações às quais estão submetidas tubulações *on* e *offshore*. 15

Fig. 3 Fator de redução da tensão por número de ciclos. Fonte: (ASME B31.3, 2018). 22

Fig. 4 Curvas S-N para peças expostas ao ar. Fonte: (DNV RP C203, 2010). 29

Fig. 5 Ciclos de tensão onde a avaliação à fadiga pode ser omitida. Fonte: (DNV RP C203, 2010). 33

Fig. 6 Ciclos de tensão onde é necessária uma avaliação detalhada à fadiga. Fonte: (DNV RP C203, 2010). 33

Fig. 7 Curvas S-N de aços *ferríticos* até 350ºC, aços inox *austeníticos* até 430ºC e ligas de alumínio até 100ºC. Fonte: (BS PD 5500, 1997). 36

Fig. 8 Curva de fadiga para materiais com módulo de elasticidade igual a 209.000 N/mm2 Fonte: IGE / TD / 12, 2013. 41

Fig. 9 Tensões induzidas pelas ondas e pelos ciclos de armazenamento e descarregamento (ABS, 2018). 46

Fig. 10 Superposição das tensões induzidas pelas ondas em um ciclo de armazenamento e descarregamento (ABS, 2018). 47

Fig. 11 Curvas obtidas dos resultados dos ensaios do grupo PRG. Fonte: (GRUPO PRG, 2008). 49

Fig. 12 Indicação dos campos de exploração de óleo e gás da Bacia de Santos localizados na Bacia de Santos. Fonte: (S/D). 58

Fig. 13 Nomenclatura dos movimentos da embarcação (Fonte: *A Six Degrees of Freedom Ship Simulation System for Maritime Education*, 2010). 60

Fig. 14 Gráfico do ciclo de tensão devido à temperatura (LCF – *Low Cycle Fatigue*) e devido aos deslocamentos e acelerações (HCF – *High Cycle Fatigue*). 62

Fig. 15 Navio submetido às condições de *tosamento* (a) e alquebramento (b), devido à passagem de uma onda (MENDONÇA, 2016). 67

Fig. 16 RAO de *roll* e *pitch* para os cascos FPSO-BR MC, FPSO-BR P57 e FPSO convencional P54 (SENRA, 2011). 69

Fig. 17 Gráfico da distribuição do dano para diferentes variações de tensões da curva D. 72

Fig. 18 Gráfico da distribuição do dano para diferentes variações de tensões da curva F3. 73

Fig. 19 Gráfico da distribuição do dano para diferentes curvas de fadiga (F3 e D) da DNV RP C-203 para $\Delta\sigma$ = 60 MPa. 74

Fig. 20 Distribuição do dano para diferentes agrupamentos de alturas de onda. 75

Fig. 21 Dano total para três diferentes agrupamentos de alturas de onda para a curva F3 da DNV RP C203, em função da tensão produzida pela onda centenária. 77

Fig. 22 Dano total para três diferentes agrupamentos para a curva D da DNV RP C203. 77

Fig. 23 Comparativo de dano total entre a curva F3 e D da DNV RP C203 para agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metros. 78

Fig. 24 Equações para obtenção dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade de uma curva forjada (ASME B31.3, 2018). Fonte: (S/D). 80

Fig. 25 Equações para obtenção dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade de uma curva forjada. Fonte: (ASME B31.J, 2017). 81

Fig. 26 Orientação dos planos para a curva. Fonte: (ASME B31.3, 2018). 81

Fig. 27 Gráfico dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade. Fonte: (ASME B31.3, 2018). 82

Fig. 28 Equações para determinação dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade (ASME B31.3, 2018). 83

Fig. 29 Equações para determinação dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade. Fonte: (ASME B31.J, 2017). 83

Fig. 30 Comparativo - Fatores intensificadores de tensões e flexibilidade (ASME B31.J x ASME B31.3). 84

Fig. 31 Arranjo geral da linha do flare extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30”. Fonte: (S/D). 87

Fig. 32 Destaque para o nó 17680 de maior tensionamento da tubulação para o movimento de *roll* extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30” - *Flare*. Fonte: (S/D). 90

Fig. 33 Destaque para o nó 17210 de maior tensão da tubulação para o movimento de pitch extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30” - Flare. Fonte: (S/D). 91

Fig. 34 Cota entre o ponto de derivação da linha do flare e a linha média do navio. Fonte: (S/D). 92

Fig. 35 Destaque para o nó 17450 de maior tensão da tubulação para os deslocamentos estruturais extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30” - Flare. Fonte: (S/D). 93

Fig. 36 Arranjo geral da análise extraído do software CAESAR II – Tubulação de 4”. Fonte: (S/D). 94

Fig. 37 Destaque para o nó 2525 e 2530 de maior tensionamento da tubulação para os casos de aceleração e deslocamentos estruturais, respectivamente – Tubulação de 4”. Fonte: (S/D). 95

Fig. 38 Distribuição do dano para a linha do flare obtidas de acordo com o CAESAR II e calculada a paritr da curva S-N (F3). 98

Fig. 39 Distribuição do dano para a linha de 4” obtidas de acordo com o CAESAR II e curva F3. 99

Fig. 40 Arranjo geral da análise extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D). 101

Fig. 41 *Input* de valores dos vetores das acelerações do software CAESAR II. 102

Fig. 42 Indicação da conexão tipo “tê” na qual foi encontrado o dano de 3,67 de acordo com o projeto executado. Fonte: (S/D). 107

Fig. 43 Detalhe dos acessórios presentes no arranjo da tubulação. Fonte: (S/D). 108

Fig. 44 Arranjo geral da análise do arranjo 1 extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D). 112

Fig. 45 Detalhe para o ponto nodal 5020 de ocorrência do dano de 0,80. Fonte: (S/D). 113

Fig. 46 Arranjo geral da análise do arranjo 2 extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D). 114

Fig. 47 Detalhe para o ponto nodal 25 de ocorrência do dano de 0,77. Fonte: (S/D). 115

Fig. 48 Arranjo geral da análise do arranjo 3, com detalhe para a linha de Ø20”, extraído do *software* CAESAR II. Fonte: (S/D). 116

Fig. 49 Detalhe para o ponto nodal 3020 de ocorrência do dano de 0,71. Fonte: (S/D). 117

Fig. 50 Vista isométrica da Análise 3 de injeção de água e remoção de sulfato. Fonte: (S/D). 118

Fig. 51 Vista isométrica do sistema de alimentação de água. As tubulações sem indicação possuem diâmetro nominal de 8”. Fonte: (S/D). 119

Fig. 52 Detalhe para o nó 1469, correspondente ao ponto médio da curva. Fonte: (S/D). 122

Fig. 53 Imagem isométrica do arranjo geral do sistema analisado. Detalhe para a curva do nó 80 abordada neste estudo de caso. Fonte: (S/D). 124

Fig. 54 Detalhe da diferença de raio de curvatura entre a curva de raio longo (à esquerda) e a curva 5D (à direita) representada no nó 80 da análise de flexibilidade. Fonte: (S/D). .. 125

Fig. 55 Equações para obtenção dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade de uma curva forjada (ASME B31.3, 2018). Fonte: S/D). 126

Fig. 56 Comparativo de resultados de dano acumulado extraído do software de análise de tensões CAESAR II. Fonte: (S/D). 127

Fig. 57 Vista isométrica do arranjo geral do sistema de tubulações extraído do *software* CAESAR II. Fonte: (S/D). 128

Fig. 58 Detalhe da tomada adequadamente suportada – Cenário 1. Fonte: (S/D). 129

Fig. 59 Suporte tipo trava removido do trunnion soldado à curva forjada – Cenário 2. Fonte: (S/D). 130

Fig. 60 Suporte tipo trava e guia removidos da tomada de água – Cenário 3. Fonte: (S/D). 131

Fig. 61 Na parte superior da figura, observa-se o dano acumulado para o Cenário 2, enquanto que a parte inferior refere-se ao Cenário 3. Fonte: (S/D). 132

Fig. 62 Detalhe da conexão entre o header e a derivação. Fonte: (S/D). 132

Fig. 63 Arranjo geral do sistema analisado extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D). 133

Fig. 64 Destaque para o nó 3020, ponto de ocorrência do maior dano da análise. Fonte: (S/D). 134

Fig. 65 Conexão tipo weldolet soldada (MSS_SP_97, 2012). Fonte: (S/D). 135

Fig. 66 Detalhe da tomada para a instrumentação de 1” derivando da linha tronco de 8“. Fonte: (S/D). 135

Fig. 67 Vista isométrica do arranjo geral do sistema de tubulações extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D). 137

Fig. 68 Detalhe do “tê” de redução de 8”x 6” indicado em amarelo e representado pelo nó 540 da análise de flexibilidade (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D). 138

Fig. 69 Detalhe dos fatores SIF’s considerados para a linha tronco e derivação pelo software CAESAR II, conforme a norma ASME B31.3. Fonte: (S/D). 139

Fig. 70 Input de fatores no software conforme ASME B31.J para a linha tronco (CAESAR II, 2014). 140

Fig. 71 Input de fatores no software conforme ASME B31.J para a derivação (CAESAR II, 2014). 140

Fig. 72 Vista isométrica do sistema de processo – Análise 1 (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D). 144

Fig. 73 Vista isométrica do sistema de flare de baixa – Análise 2 (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D). 145

Fig. 74 Vista isométrica do sistema de flare de alta pressão – Análise 3 (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D). 146

Fig. 75 Detalhe da junta soldada abrangida pela curva F3. Fonte: (DNV RP C203, 2014). 153

Fig. 76 Proposta de método para determinação da tensão admissível. Fonte: (S/D). 171

Fig. 77 Indicação da conexão tipo “tê” na qual foi encontrado o dano de 3,67 de acordo com o projeto executado. Fonte: (S/D). 178

Fig. 78 Indicação da posição dos quatro pontos da seção transversal (Caesar II User’s Guide, 2019). Fonte:..... 213

Fig. 79 Determinação das tensões principais nos quatro pontos da seção transversal (Caesar II User’s Guide, 2019). Fonte: 214

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Dados de curvas S-N para peças expostas ao ar. 27

Tabela 2 Categorias de curvas S-N para uniões soldadas de seções ocas. 30

Tabela 3 Classificação de juntas soldadas de topo. 32

Tabela 4 Constante das curvas de fadiga de acordo com a quantidade de ciclos. 37

Tabela 5 Classificação dos detalhes das soldas. 37

Tabela 6 Fator de projeto à fadiga. 40

Tabela 7 Classes de fadiga dos componentes. 41

Tabela 8 Constantes das curvas de fadiga. 42

Tabela 9 Classes de fadiga (FAT) para algumas configurações de junta. 48

Tabela 10 Comparação entre critérios de projeto para tubulações em FPSOs. 53

Tabela 11 Casos de carregamentos – Fadiga Térmica. 57

Tabela 12 Condições de análise segundo os dados de acelerações. 59

Tabela 13 Acelerações inerciais para DOC *informadas no Acceleration Data*. 61

Tabela 14 Composição de acelerações (DOC). 61

Tabela 15 Combinação dos vetores acelerações. 61

Tabela 16 Range dos casos de tensões das acelerações combinadas. 64

Tabela 17 Casos de carregamentos - Acelerações. 65

Tabela 18 Distribuição de alturas significativas e períodos de pico de ondas na região central da Bacia de Santos, Metocean Data. 68

Tabela 19 Determinação do fator de altura de onda para a Bacia de Santos. 71

Tabela 20 Fator de altura de onda para o Grupo 1. 75

Tabela 21 Fator de altura de onda para o Grupo 2. Fonte: 76

Tabela 22 Fator de altura de onda para o Grupo 3. Fonte: 76

Tabela 23 Dimensional da conexão. 82

Tabela 24 Acelerações inerciais para o pipe rack em DOC e DEC. 87

Tabela 25 Composição de acelerações (DOC/DEC). 88

Tabela 26 - Determinação dos fatores de altura de onda considerados no projeto executado. 88

Tabela 27 Casos de carregamentos editados para determinação das tensões devido às acelerações e deslocamento isoladamente e dano devido somente aos deslocamentos estruturais – Dano à fadiga (Flare). 89

Tabela 28 - Tensões devido às acelerações e deslocamentos (*Flare*). 89

Tabela 29 Separação das tensões entre acelerações e deslocamentos (Linha 4”). 94

Tabela 30 Separação dos danos por faixa de altura de onda para acelerações e deslocamentos. 96

Tabela 31 Separação dos danos por faixa de altura de onda somente devido aos deslocamentos..... 96

Tabela 32 Cálculo com base na curva F3 para obtenção do dano devido aos deslocamentos – Linha do *flare*. 97

Tabela 33 Cálculo com base na curva F3 para obtenção do dano devido aos deslocamentos – Linha de 4”. 98

Tabela 34 Resultados de danos isolados para aceleração e deslocamentos de acordo com o CAESAR II..... 99

Tabela 35 Comparativo de tensões para acelerações DOC e DEC para as linhas do flare e de 4”. 100

Tabela 36 Comparativo de resultados de dano para acelerações DOC e DEC para as linhas do flare e de 4”. 100

Tabela 37 Acelerações inerciais para o pipe rack em DOC e DEC..... 102

Tabela 38 Aplicação das acelerações aos casos de carregamentos para DOC e DEC. 102

Tabela 39 Determinação dos fatores de altura de onda considerados no projeto executado.. 103

Tabela 40 Resumo dos casos de carregamentos considerados para a determinação do dano à fadiga no projeto executado..... 104

Tabela 41 - Separação dos danos por altura de onda devido às acelerações e deslocamentos. 106

Tabela 42 - Separação dos danos por fonte de fadiga. 107

Tabela 43 Resultado do dano com fator de altura aplicado aos deslocamentos e acelerações. 109

Tabela 44 Separação dos danos para acelerações e deslocamentos com agrupamento de 1 em 1 metro..... 109

Tabela 45 Comparativo entre fatores de altura de variados projetos e para o agrup. de 1 em 1 metro. 110

Tabela 46 Dano obtido para a fadiga térmica e combinação das acelerações e deslocamentos. 112

Tabela 47 Dano obtido para a fadiga térmica e combinação das acelerações e deslocamentos. 114

Tabela 48 - Dano obtido para a fadiga térmica e combinação das acelerações e deslocamentos. 116

Tabela 49 Separação de dano por faixa de altura e número de ciclos. 118

Tabela 50 Casos de carregamentos – Aceleração crítica. 120

Tabela 51 - Casos de carregamentos – Aceleração crítica. 120

Tabela 52 Resultados de tensões para as acelerações combinadas. 122

Tabela 53 -Casos de carregamentos de fadiga para as acelerações combinadas. 123

Tabela 54 - Caso de carregamento – Aceleração crítica. 123

Tabela 55 Comparativo de resultados dos danos. 123

Tabela 56 Determinação dos fatores de flexibilidade e intensificação de tensões (SIF) para curva forjada. 126

Tabela 57 Comparativo de resultados – Curva 1,5D x 5D. 127

Tabela 58 Comparativo de resultados dos cenários estudados. 132

Tabela 59 Comparativo de resultados analisados. 136

Tabela 60 Dimensional da conexão. 137

Tabela 61 Comparativo entre SIF's (ASME B31.3 x ASME B31.J). 139

Tabela 62 Comparativo de resultados analisados. 141

Tabela 63 Caso de carregamento suscetível ao efeito de não linearidades. 141

Tabela 64 Comparativo de resultados de tensões – Análise 1. 146

Tabela 65 Comparativo de resultados de tensões – Análise 2. 147

Tabela 66 Comparativo de resultados de tensões – Análise 3. 147

Tabela 67 Combinação dos vetores acelerações. 151

Tabela 68 Distribuição de alturas e períodos de ondas. 154

Tabela 69 Fator de altura de onda proposto. 155

Tabela 70 Procedimento de análise de fadiga baseado no critério do Acúmulo de Dano. 156

Tabela 71 Casos de carregamentos – Critério do Acúmulo de Dano. 157

Tabela 72 Agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metro. 169

Tabela 73 Procedimento de análise de fadiga baseado no critério da Tensão Admissível. ... 169

Tabela 74 Casos de carregamentos – Critério da Tensão Admissível. 172

Tabela 75 Resultado de dano com fator de altura aplicado somente para os deslocamentos. 177

Tabela 76 Resultado de dano com fator de altura aplicado para os deslocamentos e acelerações. 178

Tabela 77 3D stress *intensity* para deslocamentos. 179

Tabela 78 3D stress intensity para acelerações. 179

Tabela 79 Médias das tensões - Acelerações. 180

Tabela 80 Somatório das tensões de deslocamentos e acelerações para DOC e DEC. 180

Tabela 81 Dano acumulado a partir da Curva S-N. 180

Tabela 82 Dano Caesar x Dano Curva S-N. 181

Tabela 83 Tensão admissível para dano total de 0,6. 181

Tabela 84 Tensão admissível para dano total aproximado de 1,0 com agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metro. 182

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta do pré-sal, os investimentos em novas plataformas de petróleo se tornaram mais intensos entre os anos de 2011 e 2015. A grande demanda fez com que várias empresas projetistas desenvolvessem seus projetos de tubulações paralelamente e de forma independente. Até então, a inexistência de normas específicas, e também, de um procedimento padrão para cálculo de fadiga de tubulações em instalações *offshore* fez com que diferentes metodologias fossem utilizadas pelas empresas projetistas, que empregam muitas vezes a norma ASME B31.3 ou critérios baseados em recomendações de códigos da DNV aplicadas às áreas naval e de estruturas, tendo como consequências o aumento do prazo de execução e encarecimento do projeto de tubulações.

Desta forma, torna-se necessário evitar diferentes formas de interpretação e execução do cálculo de fadiga, principalmente para os sistemas de tubulação que integram módulos distintos de uma plataforma do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), e que estejam sujeitos às ações do movimento relativo entre módulos e sob a ação das ondas. A Figura 1 mostra uma vista em planta de um navio FPSO com os diferentes módulos e o *pipe rack* dispostos ao longo do navio. A questão abrange a padronização da entrada de dados de acelerações e deslocamentos estruturais, o método de execução do cálculo, a definição dos casos de carga e do número de ciclos de cada tipo de fonte de fadiga, bem como a escolha da curva de fadiga adequada a um determinado sistema de tubulações.

Um exemplo a ser destacado é a norma americana ASME B31.3, sendo a referência de uma das principais normas sobre tubulações de processo. Esta considera que a análise de fadiga deve ser realizada em cada sistema de tubulação, incluindo todos os seus componentes e juntas, e abarcando as tensões resultantes em seus acessórios, para determinar sua capacidade de operar nas condições de funcionamento especificadas no projeto, compreendendo sua ciclicidade.

Neste cenário *offshore*, é preciso entender os inúmeros fatores causadores de fadiga, aos quais estão sujeitas as tubulações. Dentro disto, devem ser consideradas no projeto à fadiga, as tensões devido às variações de temperatura e pressão, e a ação das ondas sobre a plataforma que causam deslocamentos e acelerações nas tubulações.

Dentro de uma unidade FPSO, alguns itens devem ser previstos:

- os deslocamentos sofridos pelo *pipe rack*, devido aos movimentos de *sagging* e *hogging* da embarcação, que são transmitidos para as tubulações através de seus suportes,

levando em consideração que estes submetem as tubulações ao processo de fadiga, além da imposição de tensões e carregamentos aos bocais dos equipamentos;

- o navio e tudo o que está presente nele está submetido às acelerações devido às ondas do mar, que gerarão carregamentos nas tubulações, sendo, consequentemente, mais uma fonte de tensões cíclicas que podem causar falhas por fadiga;
- os carregamentos devido ao escoamento multifásico.

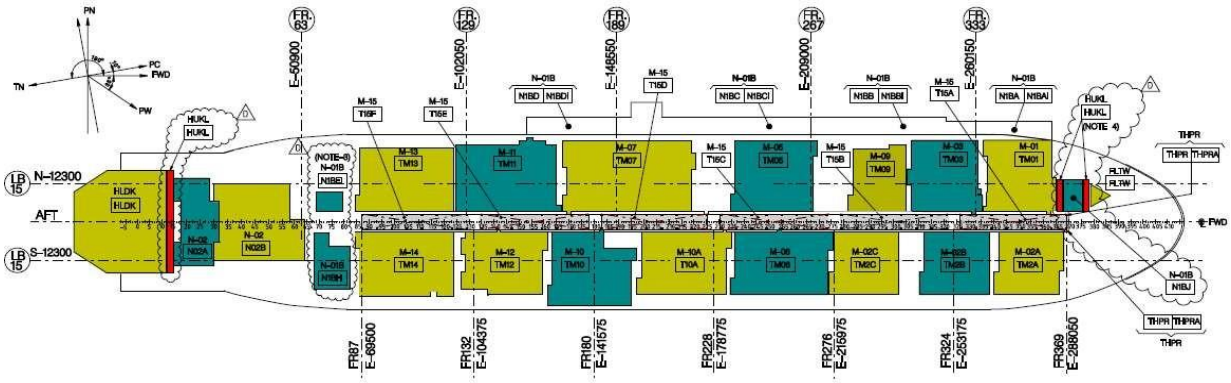


Fig. 1 Vista em planta de um navio FPSO com os vários módulos de processo e utilidades, bem como o *pipe rack* disposto ao longo do navio – Fonte: (S/D).

Além dos itens citados anteriormente, é importante registrar que sistemas de tubulações *offshore* também estarão submetidos aos variados fenômenos operacionais que podem ser observados no fluxograma da Figura 2.

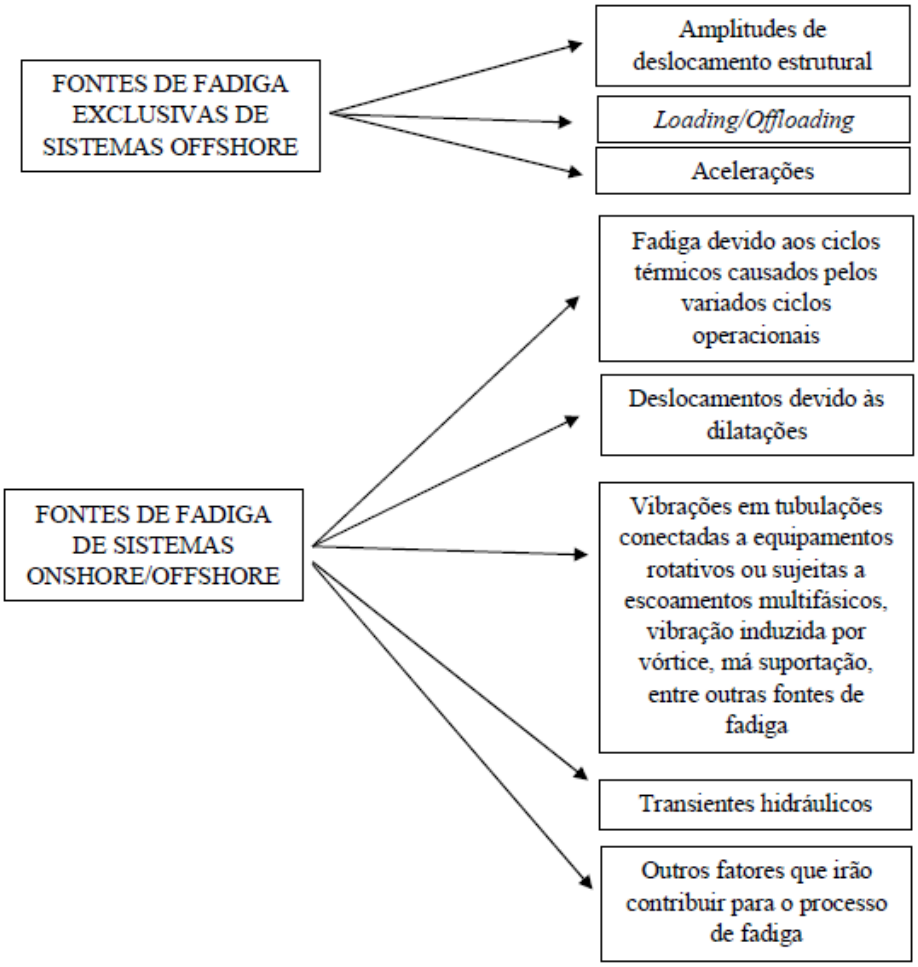


Fig. 2 Esquemático das várias solicitações às quais estão submetidas tubulações *on* e *offshore*.

Ao longo dos variados projetos *offshore* executados até os dias atuais, diferentes procedimentos têm sido adotados para o cálculo do dano devido aos diversos fatores causadores de fadiga. Sendo assim, dentre os propósitos desta dissertação, o objetivo principal é a criação de uma proposta de procedimento de análise de fadiga, sendo uma baseada no critério do acúmulo de dano e a outra baseada no critério da tensão admissível. A metodologia levará em consideração a ação das ondas e dos deslocamentos relativos entre diferentes pontos da plataforma e seus efeitos sobre as tubulações, principalmente sobre aquelas que se estendem por mais de um módulo do FPSO.

Uma série de conclusões foi obtida com a revisão bibliográfica e os estudos de casos apresentados nesta dissertação. Puderam ser avaliados a relação do arranjo, do tipo de acessório, da capacidade de suporte e os métodos de combinação de carregamentos com os resultados das análises de fadiga. Além disto, foi realizado um estudo comparativo dos diferentes procedimentos de análise de fadiga em tubulações *offshore* a fim de constatar possíveis

divergências de metodologia e parâmetros considerados em projetos de engenharia já executados.

O capítulo II desta dissertação trata da revisão da literatura técnica sobre fadiga de tubulações além de abordar uma revisão dos procedimentos adotados em diferentes projetos de tubulações de unidades flutuantes do tipo FPSO. Esta etapa é de fundamental importância para atingir os objetivos do projeto, pois os fundamentos para o desenvolvimento de um procedimento padrão de projeto à fadiga de tubulações *offshore* serão em grande parte estabelecidos com base na presente revisão.

O processo de fadiga está totalmente atrelado aos níveis de tensões às quais um sistema de tubulações está submetido. Sendo assim, uma análise comparativa dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade entre as normas ASME B31.3, publicada no ano de 2018, e a ASME B31.J de 2017 é demonstrada no Capítulo III.

No Capítulo IV, são abordadas algumas das principais fontes de dano por fadiga em tubulações *offshore*. Nesse capítulo também são realizadas algumas simulações através do *sotware* CAESAR II, com o objetivo de identificar o efeito das tensões e da curva de fadiga na distribuição de dano por faixa de altura de onda.

Um total de dez estudos de casos de projetos já executados de tubulações submetidas à fadiga são abordados no Capítulo V, no qual inúmeras simulações foram realizadas com o objetivo de que sejam identificadas as distribuições dos danos por faixa de altura de onda, efeito das curvas de fadiga D e F3 da norma DNV RP D203, destinada à avaliação de fadiga de estruturas *offshore* que traz recomendações em relação à análise de fadiga baseada em ensaios de fadiga e mecânica da fratura, bem como as relações entre o arranjo, a *suportação*, as características dos acessórios e outras variantes com o processo de fadiga.

O Capítulo VI traz o principal objetivo desta dissertação, que são as propostas de procedimentos de análise de fadiga baseada no critério do acúmulo de dano e, principalmente, a proposta baseada no critério da tensão admissível. Este último, busca uma redução significativa da quantidade de casos de carregamentos que deverão ser aplicados ao *software* de análise de tensões, aliado à uma avaliação mais precisa, na qual é aplicado o agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metro. Além disso, são abordados nesse capítulo os diversos parâmetros que envolvem a análise de fadiga, tais como definição da vida útil, curva de fadiga, número de ciclos, fatores de altura de onda, dano admissível, entre outros.

No Capítulo VII são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação das propostas de procedimento de análise de fadiga, tanto a partir do critério do acúmulo de dano, no qual uma redução significativa do dano calculado a partir da aplicação dos fatores de altura para as

acelerações é demonstrada, quanto para o critério baseado no cálculo da tensão admissível, para o qual é demonstrado um comparativo do resultado de dano entre o obtido no software de análise de tensões e o cálculo a partir da curva S-N.

Finalmente, novas propostas de estudos e a conclusão do trabalho realizado são abordadas no capítulo VIII.

CAPÍTULO II

2.1 NORMAS E DOCUMENTOS TÉCNICOS RELEVANTES AO CÁLCULO DE FADIGA EM TUBULAÇÕES *OFFSHORE*

Este capítulo apresenta uma revisão sobre as principais normas utilizadas no projeto à fadiga de tubulações instaladas em unidades flutuantes do tipo FPSO. Foram consideradas somente as seções das normas mais relacionadas com o tema "Cálculo de Fadiga em Tubulações *Offshore*". Nesta altura, faz-se necessário ressaltar que algumas partes das normas reproduzidas neste trabalho possuem, exclusivamente, o objetivo de melhorar o entendimento dos procedimentos recomendados nos códigos de projeto revisados.

As entidades consultadas foram: ABS (*American Bureau of Shipping*), API (*American Petroleum Institute*), ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), BSI (*British Standards Institution*), CONCAWE (*Conservation of Clean Air and Water in Europe*), DNV (*Det Norske Veritas*), IGE (*Institute of Gas Engineers*), NORSOK (*Norsok Sokkels Konkurranseposisjon*), UKOOA (*United Kingdom Offshore Operators Association*).

As seguintes normas e documentos técnicos foram considerados:

- ASME B31.3 *Piping Process* (2018);
- ASME B31.3 *Appendix W – High Cycle Fatigue* (2018);
- ASME B31J *Stress Intensification Factors, Flexibility Factors* (2017);
- DNV RP C203 *Fatigue Design of Offshore Steel Structures* (2010);
- DNV RP D101 *Structural Analysis of Piping Systems* (2017);
- DNV OS C101 *Design of Offshore Steel Structures, General – LRDF Method* (2016);
- BS PD 5500 *Unfired Fusion Welded Pressure Vessels* (1997);
- IGE / TD / 12 *Pipework Stress Analysis for Gas Industry Plant. Recommendations on Transmission and Distribution Practice* (2013);
- UKOOA FPSO *Design Guidance Notes for UKCS Service* (2002);
- ABS *Spectral-Based Fatigue Analysis for Floating, Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations* (2018);
- IIW *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components* (2008);
- API RP 14E – *Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems*.

2.1 DNV RP D101 *STRUCTURAL ANALYSIS OF PIPING SYSTEMS* (2017)

Decidiu-se iniciar a apresentação da revisão normativa pela DNV RP D101 porque este código tem como objetivo propor as melhores práticas de projeto, consolidadas pela indústria europeia, para análise estrutural de sistemas de tubulações para o setor *offshore*, buscando preservar a vida, a propriedade e o meio ambiente. As aplicações típicas desta norma são tubulações em plataformas de óleo e gás, FPSOs, unidades de perfuração e instalações submarinas. Com relação ao projeto à fadiga de tubulações, destacam-se, nesta norma, as orientações quanto à identificação de tubulações expostas a falhas por fadiga e recomendações de normas para análise de fadiga, conforme descrito na seção 3.12 (*Fatigue Calculations*) do referido código.

Os seguintes sistemas de tubulação deverão ser avaliados quanto a possíveis danos por fadiga segundo a norma DNV RP D101:

- Tubulações conectadas a cabeças de poço na superfície ou a árvores de natal, em que acoplamentos flexíveis não são utilizados para absorver movimentos verticais;
- Tubulações dispostas em *pipe racks* entre duas plataformas;
- Tubulações dispostas ao longo de um FPSO, seja sobre o *deck* do navio ou no *pipe rack*, submetidas a deslocamentos verticais de *tosamento* e alquebramento nas operações de carregamento e descarregamento e, também, devido à ação das ondas do mar. Caso não haja informações específicas quanto aos deslocamentos, recomenda-se utilizar deslocamentos longitudinais de +/- 10 mm por 10 m devido à expansão e contração;
- Longos trechos de tubulações em FPSOs sem suportes ou trechos com válvulas e atuadores pouco suportados que sejam submetidos às acelerações da embarcação devido à ação das ondas do mar;
- Tubulações conectadas a bombas e compressores que induzem forçamentos de baixa frequência, podendo coincidir com a frequência natural de vibração do sistema;
- Tubulações de paredes finas em aço duplex com escoamento de gás em altas velocidades que podem estar sujeitos à fadiga acústica.

Nota-se que os deslocamentos devido às operações de armazenamento e descarregamento do navio são também considerados como possíveis causas de dano por fadiga em tubulações de FPSOs.

Na subseção 3.12.5 (*Recommended design codes and standards for fatigue analysis*), a norma DNV RP D101 recomenda os seguintes códigos para análise de fadiga:

- Para a investigação da fadiga devido somente ao efeito das ondas, o método de análise descrito na DNV RP C203 pode ser utilizado. Não é comum a consideração do DFF (*Design Fatigue Factors*) em todos os sistemas de tubulação do *topside*. Este recurso só é utilizado em linhas que possuem isolamento ou qualquer outro empecilho que dificulte a inspeção de trincas e corrosão. A norma DNV RP C203 se destina, principalmente a estruturas em aço e não tubulações, que além das acelerações e deformações induzidas pelas ondas do mar, também estão submetidas a outras fontes de fadiga, tais como variação de temperatura, transientes hidráulicos, escoamentos bifásicos, entre outros;
- A norma IGE / TD / 12 pode ser utilizada para a avaliação da fadiga de alta frequência devido às altas velocidades de escoamento de gás e vapor – denominada fadiga acústica;
- Para fadiga acústica são recomendadas: CONCAWE *Report* 85/52 *Acoustic Fatigue in Pipes* (1985) e NORSOK L-002 (2016), *Appendix A*;
- O procedimento geral recomendado para análise de fadiga está descrito no *British Pressure Vessel Code* PD 5500 *Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels*, *Annex C*. O exemplo de cálculo W.6.2.3 (Tabelas W.6-4, W.6-5 e W.6-6 do código BS PD 5500) contém uma metodologia conservadora, onde são incluídas diversas fontes de fadiga (movimentos impostos, transientes de pressão, gradientes térmicos, entre outras), utilizando o método de cálculo de dano por fadiga de *Palmgren-Miner*.

Entre outras recomendações gerais, a DNV RP D101 alerta para o risco de falhas por fadiga induzidas por vibração. Recomenda que uma análise modal de todos os sistemas de tubulações seja realizada, sendo desejável uma frequência natural acima de 4 Hz para mitigar as circunstâncias em que a fadiga induzida por vibrações de baixas frequências possa ocorrer.

2.2 ASME B31.3 *PIPING PROCESS* (2018)

Trata-se da norma mais utilizada no desenvolvimento de projetos, fabricação, construção e inspeção de tubulações de processo pressurizadas pertencentes a unidades de processamento. A última revisão da norma ASME B31.3 ocorreu em agosto de 2019, a qual deverá passar a ser

universalmente aplicada 6 meses após a data de sua publicação. Nesta revisão, foram acrescentadas algumas recomendações, principalmente no que diz respeito à questão da avaliação da fadiga em tubulações, pois se trata de um assunto pouco explorado por pesquisas do mesmo caráter. Tendo em vista o objetivo deste projeto, são aqui comentadas as recomendações desta norma com relação ao projeto à fadiga de tubulações.

2.2.1 Consideração da Fadiga Devido aos Ciclos de Temperatura – Conforme ASME B31.3

A primeira tratativa da norma ASME B31.3, referente à consideração da fadiga no estudo de flexibilidade, é dada no parágrafo 302.3.5. Neste, é apresentada a equação (EQ 1) para determinação da tensão admissível devido às tensões denominadas secundárias, como as originadas pela expansão ou contração térmica das tubulações.

$$S_A = f(1{,}25 S_c + 0{,}25 S_h) \qquad \text{(EQ 1)}$$

Onde:

S_A – tensão admissível;

f − fator de redução de tensão em função do número de ciclos;

S_c − tensão admissível na temperatura ambiente;

S_h − tensão admissível na temperatura de projeto.

O fator de redução de tensão é dado pela curva da Figura 3 e pode ser calculado pela Equação 2 (EQ 2).

$$f = 6{,}0\,(N)^{-0{,}2} \qquad \text{(EQ 2)}$$

Onde:

N − número de ciclos esperados em toda a vida útil da tubulação.

Nos projetos em que são esperados um ciclo operacional por dia, o fator de redução de tensão f é igual a 1, ou seja, a ocorrência de um ciclo operacional por dia para uma vida útil da planta de processo de 20 anos, totalizando, assim, 7.300 ciclos.

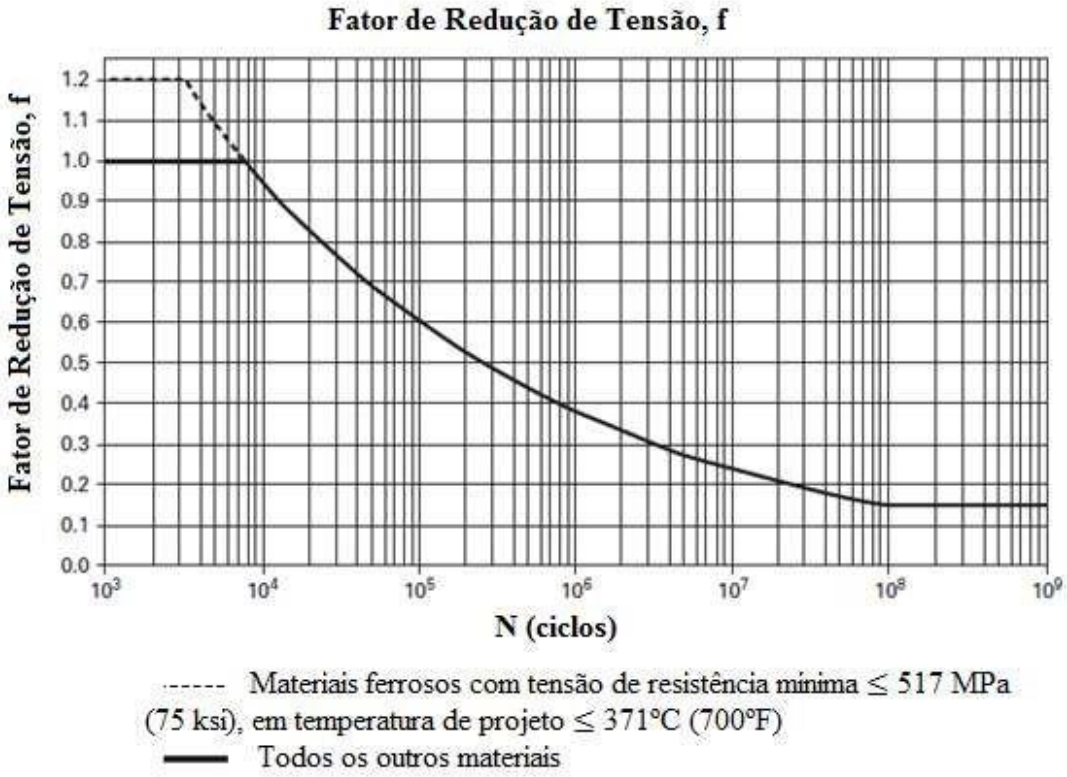


Fig. 3 Fator de redução da tensão por número de ciclos. Fonte: (ASME B31.3, 2018).

A tensão calculada, devido aos deslocamentos da tubulação SE, não poderá exceder a tensão admissível SA. Quando a tensão SE varia devido à expansão térmica ou outros fatores, SE deve ser a máxima das tensões devido aos deslocamentos. Neste caso, o número de ciclos N pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$N = N_{\mathrm{E}} + \sum(r^5{}_{\mathrm{i}} N_{\mathrm{i}}) \qquad \text{(EQ 3)}$$

Onde:

NE = número de ciclos de ocorrência da máxima tensão de deslocamento SE;

Ni = número de ciclos associado com a tensão de deslocamento Si;

ri = Si / SE;

Si = qualquer tensão devido a deslocamento menor do que a tensão SE; i = 1,2,3,...,n.

Conclui-se, portanto, que existe a possibilidade das tensões, devido aos deslocamentos impostos às tubulações pelos movimentos de *sag* e *hog* do FPSO, serem considerados com as tensões de origem térmica, utilizando as equações 1 a 3 (EQ1-EQ3).

2.2.2 Análise de Fadiga - Apêndice W (*High Cycle Fatigue*) - ASME B31.3

Uma análise de fadiga deve ser realizada em cada sistema de tubulação, incluindo todos os seus componentes e juntas, considerando as tensões resultantes em seus acessórios para determinar sua capacidade de operar nas condições de funcionamento cíclicas especificadas no projeto.

O apêndice W (*High Cycle Fatigue*) da norma ASME B31.3, relacionado à avaliação de fadiga de alto ciclo em sistemas de tubulação, foi adicionado nesta revisão, devendo ser usado quando o número de ciclos de tensão exceder 100.000. A norma também define, como ciclo de tensão significativa, a faixa de tensão calculada superior a 20,7 Mpa para aços *ferríticos* e *austeníticos*. Para outros materiais, ou quando expostos a ambientes corrosivos, todos os ciclos devem ser considerados como significativos, a menos que de outra forma documentado no projeto de engenharia. O Apêndice W considera que os procedimentos já existentes da norma para os cálculos da tensão admissível devido ao deslocamento (parágrafo 302 da norma ASME B31.3) e da faixa de tensão (parágrafo 319 da mesma norma) fornecem um método para avaliar os sistemas de tubulação quanto à fadiga, quando o número de ciclos de tensão significativos é menor ou igual a 100.000. As cargas cíclicas da tubulação podem ser devido à expansão térmica, vibração, cargas inerciais, movimento das ondas ou outras fontes.

É importante ressaltar que a fadiga, devido aos ciclos de pressão, não é considerada neste apêndice. Entretanto, precisa ser ponderada no projeto. Para abordar esta questão, os métodos descritos no capítulo IX ou na ASME BPVC, Seção VIII, Divisão 2 devem ser aplicados em sistemas de tubulações submetidos a ciclos de pressão. Além disso, as recomendações que este apêndice traz em relação ao projeto, à fabricação e aos testes devem ser acrescentados às recomendações requeridas nos capítulos I ao VI da norma ASME B31.3.

Outro ponto de curiosidade quanto a publicação da revisão de 2018 da norma ASME B31.3, refere-se ao fato de como seria abordada a questão dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade, uma vez que sofreram alguns ajustes trazidos pela norma ASME B31J publicada no ano de 2017. Curiosamente, o apêndice D da norma ASME B31.3 traz os mesmos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade presentes em suas revisões anteriores. Entretanto,

recomenda-se a utilização dos fatores da norma ASME B31J nos casos a seguir. Segundo a ASME B31.3 (2018), o projetista pode usar os fatores de intensificação de tensão e os fatores de flexibilidade mais aplicáveis da ASME B31J em vez dos fatores mencionados no apêndice D da ASME B31.3 (2018), sendo incentivado a fazê-lo quando:

- $S_F > 0{,}5\ S_A$;
- ciclos significativos estiverem presentes.

Lembrando que SF = S · E · W, onde:

S – tensão atuante;
E – fator de qualidade da junta soldada;
W – eficiência da junta.

No que se refere à fadiga devido às ondas, as acelerações devido a esta fonte de fadiga devem ser consideradas como carregamentos ocasionais e devem satisfazer os requerimentos do parágrafo 302.3.6 que, por sua vez, aborda a questão referente às considerações adotadas para este tipo de carregamento. O apêndice W faz uma divisão de abordagem entre duas situações distintas: a primeira, quando o sistema de tubulações está sujeito à carregamentos cíclicos devido às ondas; a segunda, quando não se tem a presença desta fonte de fadiga. Portanto, o procedimento de análise de fadiga varia de acordo com o tipo de carga cíclica: carregamento de fadiga onde o espectro de carregamento pode ser reduzido a uma série de faixas de tensão por número de ciclos; carregamento de fadiga onde o espectro de carregamento pode ser representado por uma distribuição *Weibull* de dois parâmetros (parâmetro de forma da distribuição da variação de tensão e parâmetro de distribuição de escala de variação de tensão). O dano por fadiga para os dois casos continua sendo baseado no somatório do dano de cada fonte de fadiga.

2.2.2.1 Dano à fadiga devido à faixa de tensões cíclicas de outras fontes de fadiga que não ondas

Neste caso a maior variação de tensão deve ser calculada de acordo com o parágrafo 319 da ASME B31.3 e deve atender aos requerimentos de variação de tensão do parágrafo 302.3.5, com f = 1,0. Os pares de faixa de tensão e número de ciclos (*SEi, Ni*) devem ser determinados com a utilização do método *rainflow* de contagem de ciclos da ASME BPV, Seção VIII, Div.

2, Anexo 5-B. Os ciclos de fadiga para cada caso de carregamento devem ser calculados de acordo com a equação (W1) do apêndice W.

O dano acumulado à fadiga para todas as fontes deve ser calculado conforme equação abaixo (EQ4), equação (W2) do apêndice W:

$$d_t = \sum \frac{Ni}{Nti} \qquad \text{(EQ4)}$$

Onde:

dt - dano por fadiga, que deve ser inferior a 1.

Segundo o Apêndice W da ASME B31.3, quando o dano por fadiga for calculado de acordo com a EQ4, ciclos com faixa de tensão inferiores a 20,7 MPa não precisam ser considerados.

2.2.2.2 Dano à fadiga devido à faixa de tensões cíclicas devido às ondas

Nesta etapa, aborda-se a amplitude variável de carregamentos randômicos em que a distribuição da faixa de tensão de longa duração pode ser representada por uma distribuição de *Weibull* de dois parâmetros. Os requisitos específicos de aplicação são cargas de onda para sistemas presentes em instalações *offshore*. Entretanto, este método também pode ser utilizado em outras situações onde a distribuição de *Weibull* se aplica.

O estado de mar é caracterizado através de determinados parâmetros estatísticos, tais como altura e período de onda, representados no apêndice W por *h* e *Vo*, respectivamente. Quando utilizado para o movimento das ondas, o estado de mar do projeto deve ser especificado pelo detentor do mesmo. O estado de mar deve ser caracterizado por um diagrama de dispersão de ondas de dois parâmetros, altura significativa da onda e período de cruzamento zero. É importante ressaltar que a faixa de tensão é considerada proporcional à altura da onda, e o parâmetro de forma da distribuição de tensões do diagrama de *Weibull* e frequência de cruzamento zero são determinados a partir dos dados do estado do mar. A distribuição da faixa de tensão pode ser representada pela distribuição de *Weibull* de dois parâmetros, utilizando a equação (W3) do apêndice W.

2.2.2.3 Método de análise de fadiga alternativo

O apêndice W da norma ASME B31.3 recomenda a utilização da ASME BPVC, Seção VIII, Divisão 2, como um método alternativo de análise de fadiga em tubulações. De certa forma, esperava-se que o Apêndice W apresentasse um procedimento mais prático e usual que pudesse ser utilizado em projetos de engenharia que possuem a ASME B31.3 como código de projeto.

2.3 DNV RP C203 *FATIGUE DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES* (2010)

A norma traz recomendações em relação à análise de fadiga baseada em ensaios de fadiga e mecânica da fratura. Destinada à avaliação de fadiga de estruturas *offshore*, tem como objetivo assegurar que determinada estrutura terá uma vida adequada à fadiga, além de proporcionar um programa de inspeção durante a vida operacional da estrutura. Para assegurar que uma estrutura irá cumprir a sua função adequadamente, a avaliação de fadiga deverá ser realizada de acordo com o detalhe estrutural, para cada componente submetido à carga cíclica. Qualquer elemento ou componente da estrutura, assim como toda junta soldada ou acessório, bem como qualquer outro ponto de concentração de tensões, é um local considerado com potencial para surgimento de trincas de fadiga, e deve ser individualmente avaliado.

Para investigação do efeito de fadiga sobre tubulações devido à ação das ondas, a metodologia descrita na DNV RP C203 (2010) pode ser utilizada. Entretanto, esta norma se destina principalmente a estruturas de aço e não a tubulações que, além dos deslocamentos e acelerações causados pela ação das ondas, podem sofrer com uma série de outras fontes de fadiga, como variações de temperatura, transientes de pressão, esforços gerados por escoamentos multifásicos, cargas vivas etc. (DNV RP D101, 2017).

A DNV RP C203 (2010) abrange estruturas de aço com limite de resistência ao escoamento menor que 960 MPa quando expostas ao ar. Esta norma também abrange materiais expostos à água salgada do mar, providos de proteção catódica ou livres do processo de corrosão, com limite de resistência ao escoamento até 550 MPa. Além destes materiais, esta norma também abrange aços inoxidáveis.

É importante se ater a questão da temperatura a qual o material estará submetido. Esta norma é válida até 100ºC. Para temperaturas maiores que esta, deverá ser considerado o fator de redução que é dado por:

$$R_T = 1{,}0376 - 0{,}239.10^{-3}T - 1{,}372.10^{-6}T^2 \qquad \text{(EQ5)}$$

Onde:

T - temperatura em ºC.

A redução da resistência da curva S-N (tensão versus número de ciclos) é dada por:

$$log\,\bar{a}_{RT} = log\,\bar{a} + m\,log\,R_T \qquad \text{(EQ6)}$$

Onde:

log ā – constante do material (conforme a Tabela 1);

m – constante do material (conforme a Tabela 1);

R_T − temperatura em que o material estará submetido;

$\bar{a}_{RT}$ − fator de redução de temperatura.

A Tabela 1 retirada da norma DNV RP C203 traz os parâmetros das diferentes curvas de fadiga obtidas de acordo com o tipo do componente a ser avaliado. Neste caso, para peças expostas ao ar.

Tabela 1 Dados de curvas S-N para peças expostas ao ar.

Curvas S-N no ar						
Curva S-N	$N \leq 10^7$ ciclos		$N > 10^7$ ciclos $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	Limite de Fadiga de 10^7 ciclos	Expoente da espessura k	Concentração de tensão estrutural embutida no detalhe (Classes S-N)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF >10.0	1.00

Fonte: (DNV RP C203, 2010).

As curvas S-N só devem ser aplicadas quando as máximas tensões atuantes nos pontos críticos da peça forem inferiores à resistência ao escoamento do material, pois a análise de tensões utilizada neste método é linear elástica, uma vez que a DNV RP C203 (2010) tem o objetivo de avaliar o dano à fadiga de componentes submetidos a altos números de ciclos de variação de tensão.

2.3.1 Curvas S-N

Destaca-se na revisão da norma DNV RP C203 (2010), a seção 2.4 (S-N curves). Esta norma aborda o dimensionamento à fadiga pelo método determinístico com emprego das curvas S- N, associadas a uma probabilidade de 97,7% do material não falhar, pois o teste considera uma tolerância média padrão. A norma classifica as juntas soldadas de acordo com o ambiente ao qual se encontram expostas, podendo ser no ar ou submersas no mar.

A curva S-N é representada como uma curva logarítmica, que pode ser expressa pela equação:

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \Delta\sigma \qquad \text{(EQ7)}$$

Onde:

N – número de ciclos até a falha para determinado Δσ;

$\Delta\sigma$ − variação de tensão;

m – coeficiente angular da curva S-N;

log ā – ponto de interseção da curva S-N com o eixo log N.

As normas utilizadas em projetos *offshore* apresentam uma série de curvas S-N, com os detalhes típicos para estas estruturas classificadas de acordo com:

- a geometria do detalhe ou junta de conexão;
- direção de aplicação da variação de tensões;
- método de execução e nível de inspeção do detalhe;
- ambiente onde está a estrutura (ar/água);
- presença ou ausência de proteção contra corrosão (proteção catódica);
- tipo de junta soldada.

As tubulações destinadas a operar no casco e no convés do FPSO estão expostas ao ar. Sendo assim, a curva de interesse para estes casos será dada pela Figura 4 e Tabela 2, adaptadas da norma DNV RP C203 (2010) para fins de ilustração.

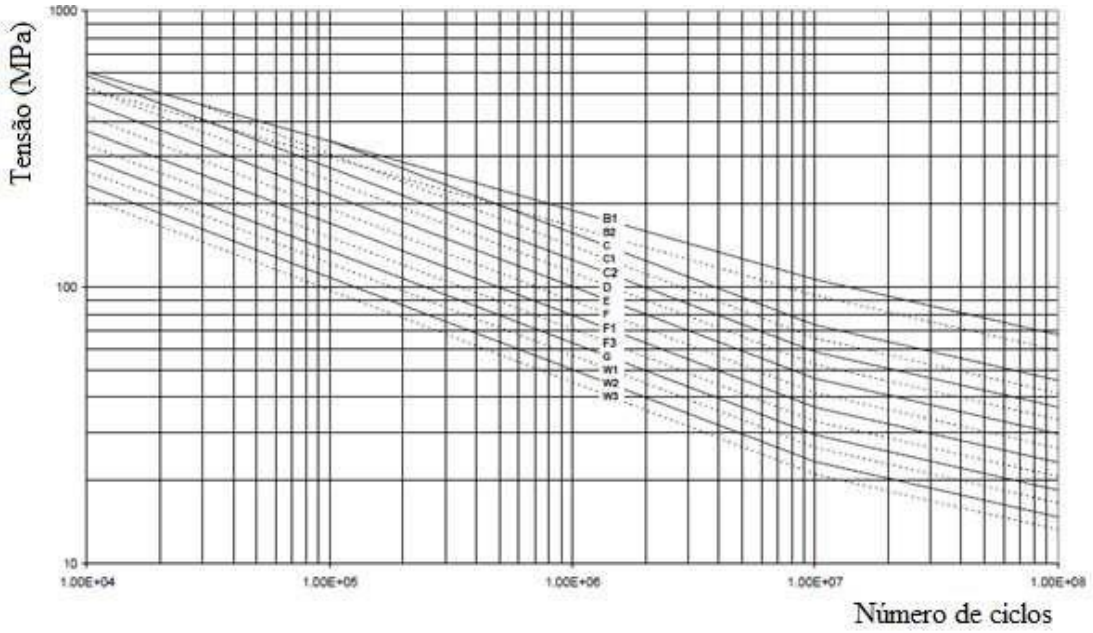
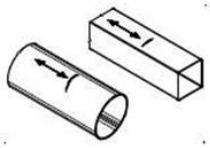
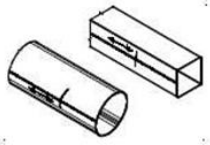
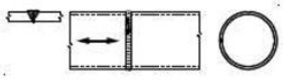


Fig. 4 Curvas S-N para peças expostas ao ar. Fonte: (DNV RP C203, 2010).

A DNV RP C203 (2010) define também a curva a ser utilizada de acordo com o tipo do detalhe do componente a ser avaliado. Como o presente trabalho trata da fadiga em tubulações, são apresentadas no Tabela 2 detalhes de componentes com seções ocas e suas respectivas categorias de curva de fadiga. A curva de fadiga F3, relativa a tubos com soldas circunferenciais de topo feitas por um lado, tem sido adotada no projeto a fadiga de tubulações em unidades flutuantes do tipo FPSO.

Tabela 2 Categorias de curvas S-N para uniões soldadas de seções ocas.

Seções Circulares		
Categoria	*Detalhes Construtivos*	*Descrição*
B1	1. 	1. Sem soldas
B2	2. 	2. Tubulação feita com solda automática longitudinal
C1		3. Solda circunferencial feita dos dois lados e com acabamento
D		4. Solda circunferencial feita em oficina dos dois lados
E		5. Solda circunferencial feita no campo dos dois lados
F		6. Solda circunferencial feita de um lado apenas com apoio
F3	7.	7. Solda circunferencial feita de um lado sem apoio
C1		8. Solda circunferencial feita de um lado com imperfeições e sobrematerial removidos

Fonte: (DNV RP C203, 2010).

2.3.2 Métodos de Análise de Fadiga

Segundo a DNV RP C203 (2010), a análise de fadiga deve ser baseada na curva S-N, determinada nos ensaios de fadiga de corpos de prova, sem especificar o tipo, submetidos a carregamentos cíclicos e na teoria do acúmulo linear de dano.

2.3.3 Cálculo do Dano Acumulado

O dano acumulado devido à ocorrência de cada grupo de ciclos de tensão j de mesma variação de tensão $\Delta\sigma j$ pode ser calculado a partir da regra de Palmgren-Miner.

$$D = \Sigma_{j=1}^{k} \frac{n_j}{N_j} \leq \eta \qquad \text{(EQ8)}$$

Onde:

D – dano acumulado;

nj – número de ciclos de carregamento associado à tensão σ_j;

Nj – número de ciclos para fratura por fadiga devido à tensão σj;

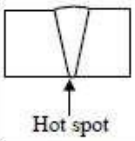
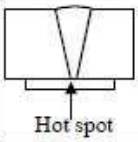
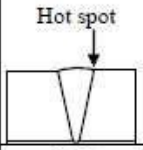
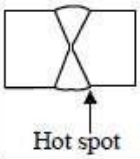
η – fator admissível = 1 (Design Fatigue Factor, DNV OS C101 Section 6 Fatigue Limit States, 2016);

k – número total de grupos de ciclos de tensão.

2.3.4 Tubulações e *Risers*

A norma DNV RP C203 (2010), em sua subseção 2.10.1 – *Stresses at girth welds in pipes and S-N* data, faz considerações sobre as tensões em juntas circunferenciais de tubulações. Para soldas com formatos assimétricos, deve ser incluído um fator de concentração de tensões para a raiz da solda de acordo com a excentricidade máxima permissível. Uma classificação das juntas circunferenciais de topo com suas respectivas curvas de fadiga e fatores de concentração de tensão é apresentada na Tabela 2.4 desta norma, aqui reproduzidos no Tabela 3. A norma DNV RP C203 (2010) também apresenta procedimentos para consideração da excentricidade de tubos sem costura em sua subseção 2.10.2.4.2.

Tabela 3 Classificação de juntas soldadas de topo.

Table 2-4 Classification of welds in pipelines					
Description					
Welding	*Geometry and hot spot*	*Tolerance requirement*	*S-N curve*	*Thickness exponent k*	*SCF*
Single side		$\delta \leq$ min (0.15t, 3 mm)	F1	0.00	1.0
		$\delta >$ min (0.15t, 3 mm)	F3	0.00	1.0
Single side on backing		$\delta \leq$ min (0.1t, 2 mm)	F	0.00	1.0
		$\delta >$ min (0.1t, 2 mm)	F1	0.00	1.0
Single side			D	0.15	Eq. (2.10.1)
Double side			D	0.15	Eq. (2.10.1)

Fonte: (DNV RP C203, 2010).

2.3.5 Casos em que uma Análise de Fadiga Detalhada Pode Ser Omitida

A norma DNV RP C203 (2010), em sua seção 2.11 *Guidance to when a detailed fatigue analysis can be omitted*, considera que uma análise detalhada de fadiga pode ser omitida quando o pico real de tensão for menor do que o limite à fadiga para 107 ciclos, conforme Tabela 1 desta dissertação. Para DFF (*Design Fatigue Factor*) maior que 1, o fator admissível de dano acumulado deve ser reduzido por um fator dado na seção 2.11 da norma DNV RP C203 (2010). A norma DNV OS C101 (2016) deve ser consultada para definição do DFF.

O uso do limite de fadiga é ilustrado nas Figuras 5 e 6, reproduzidas da norma DNV RP C203 (2010). Caso haja pelo menos um ciclo de tensão acima do limite de fadiga, a análise detalhada à fadiga deverá ser realizada.

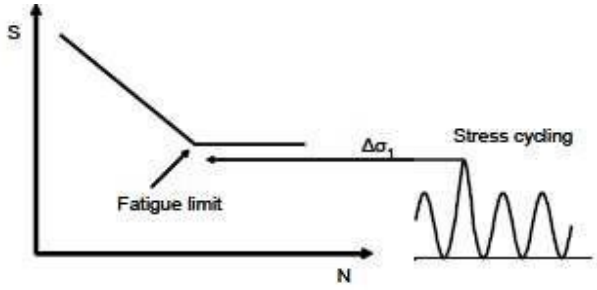


Fig. 5 Ciclos de tensão onde a avaliação à fadiga pode ser omitida. Fonte: (DNV RP C203, 2010).

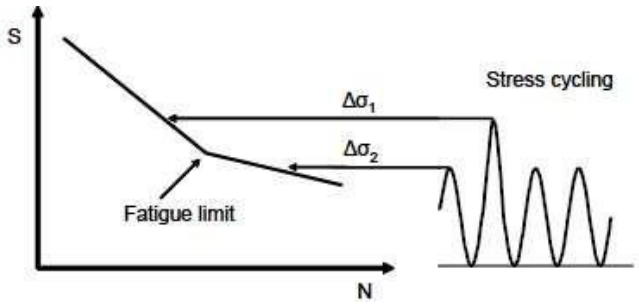


Fig. 6 Ciclos de tensão onde é necessária uma avaliação detalhada à fadiga. Fonte: (DNV RP C203, 2010).

2.3.6 Fadiga de Alto e Baixo Ciclo

O apêndice D1 da DNV RP C203 (2010), Comm. 1.2.3 *Low cycle and high cycle fatigue*, faz algumas considerações sobre a possível combinação das fadigas de alto e de baixo ciclo devido, por exemplo, às ondas do mar muito severas. A operação de carregamento e descarregamento do FPSO também é citada como possível causa de fadiga de baixo ciclo em certos locais da estrutura do navio. Como a norma DNV RP C203 (2010) tem como objetivo principal tratar da fadiga de alto ciclo, as curvas S-N especificadas são mostradas nos gráficos para números de ciclos acima de 10^4. No entanto, as curvas de fadiga podem ser extrapoladas para número de ciclos menores, embora este não seja um procedimento conservador. Desta forma, no Apêndice D1 da DNV RP C203 (2010), recomenda-se utilizar o procedimento descrito na norma NORSOK N-006 (2008) para tratar da fadiga de baixo ciclo.

2.4 BS PD 5500 UNFIRED FUSION WELDED PRESSURE VESSELS (1997)

O anexo C da norma BS PD 5500 (1997), *Assessment of vessels subject to fatigue*, trata de vasos submetidos à fadiga e contém os requisitos para que estes sejam projetados para uma vida

útil à fadiga, sendo, pelo menos, tão grande quanto à vida de serviço requerida. Segundo este anexo, os seguintes fatores influenciam a vida à fadiga:

- Serviços de carga cíclica: ciclos de temperatura, pressão, contração e dilatação da tubulação, vibração, além de cargas externas;
- Corrosão: trincas devido à fadiga em componentes submetidos ao processo de corrosão podem se propagar em tensões ainda mais baixas. Além disso, a razão de propagação (crescimento da trinca no tempo) também pode ser maior;
- Temperatura: não há restrições quanto ao uso das curvas de fadiga para vasos que irão operar a temperaturas abaixo de 0ºC, desde que o material seja suficientemente tenaz para garantir que a fratura não se inicie a partir de uma trinca por fadiga. O anexo C da BS PD 5500 (1997) pode ser aplicado abaixo da temperatura em que ocorra fluência do material. Desta forma, as curvas de projeto são aplicáveis até a temperatura de 350ºC para aços *ferríticos*, 430ºC para aços inoxidáveis *austeníticos* e até 100ºC para ligas de alumínio;
- Vibração: pulsos de pressão, vento ou proximidade com equipamentos rotativos podem causar vibração na tubulação ou entrar em ressonância com o vaso de pressão. Devido à grande quantidade de ciclos de variação de tensão induzida pela vibração, uma trinca pode ocorrer nas juntas soldadas, mesmo quando a variação de tensão é pequena.

Como em muitos casos a vibração não é prevista na fase do projeto, é fundamental que seja realizada, inicialmente, uma inspeção no *start-up* da planta. Se ocorrer uma vibração excessiva em determinado sistema, preferencialmente a fonte desta deverá ser isolada, suportes ou amortecedores deverão ser previstos no local da vibração. A norma BS PD 5500 (1997) recomenda que, se a vibração persistir e não tiver sido considerada como uma causa no processo de fadiga na fase do projeto, uma reavaliação utilizando o "Método Detalhado de Avaliação de Fadiga" desta norma deverá ser feita.

Na seção C2 do anexo C, são definidas as condições para que uma análise de fadiga detalhada seja realizada. A análise de fadiga detalhada não será necessária se os ciclos de tensões de todas as fontes não ultrapassem o valor dado pela equação 9 (EQ9):

$$N < \frac{6x10^9}{f_f^8} \left(\frac{22}{e}\right)^{0,75} \left(\frac{E}{2,9\,.10^5}\right)^3 \qquad \text{(EQ9)}$$

Onde:

e – maior espessura encontrada ou 22 mm;

ff – tensão de projeto;

E – módulo de elasticidade do material.

2.4.1 Método Simplificado de Análise Utilizando Curvas de Fadiga

O anexo C da BS PD 5500 (1997) propõe um método simplificado de análise de fadiga utilizando curvas de projeto. O método é resumido a seguir, sendo recomendada a consulta da norma BS PD 5500 (1997) para maiores detalhes:

- Passo 1 – Identificar a quantidade de ciclos de tensão para os vários eventos (n1, n2, n3, ...).
- Passo 2 – Para cada evento, calcular a maior variação de tensão devido à pressão, variação de temperatura e cargas mecânicas.
- Passo 3 – Checar se a equação (2.10) é satisfeita.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 0{,}6 \left(\frac{22}{e}\right)^{0{,}75} \qquad \text{(EQ10)}$$

Onde:

i = 1, 2, 3...

e – maior espessura encontrada ou 22 mm;

Ni – número de ciclos obtidos da curva de fadiga apropriada.

2.4.2 Método Detalhado de Avaliação de Fadiga

Um resumo do método detalhado de avaliação de fadiga é apresentado a seguir, sendo recomendada a consulta da norma BS PD 5500 (1997) para maiores detalhes. Segundo este método, a resistência à fadiga de um vaso de pressão é governada pela resistência a fadiga dos seus detalhes.

2.4.2.1 Curvas S-N para avaliação dos detalhes de solda

Curvas originadas a partir de ensaios de fadiga realizados com amostras soldadas são fornecidas na norma, e aqui reproduzidas na Figura 7.

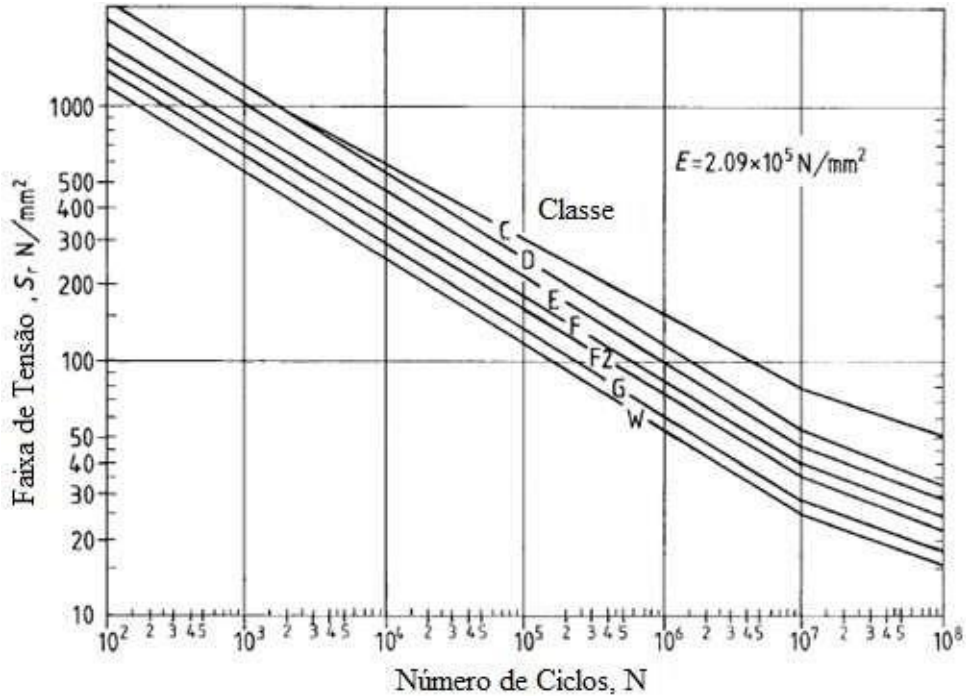


Fig. 7 Curvas S-N de aços *ferríticos* até 350ºC, aços inox *austeníticos* até 430ºC e ligas de alumínio até 100ºC. Fonte: (BS PD 5500, 1997).

A curva de fadiga é representada pela seguinte equação,

$$S_r^{m} N = A \qquad \text{(EQ11)}$$

Onde:

m e A - constantes definidas no Quadro 3.

2.4.2.2 Curvas S-N

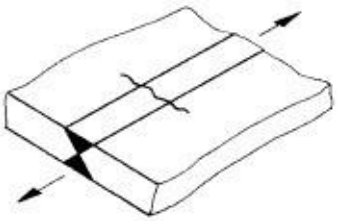
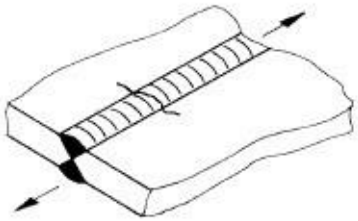
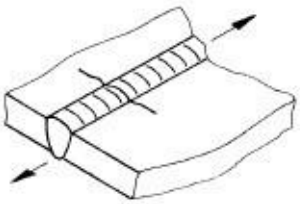
As constantes das curvas de fadiga são aplicadas de acordo com o tipo do detalhe e a quantidade de ciclos, conforme indicado nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 Constante das curvas de fadiga de acordo com a quantidade de ciclos.

Detalhes das Curvas de Fadiga					
Classe	Constantes para Curvas S-N				Faixa de tensão para 10^7 ciclos
	para $N < 10^7$ ciclos		para $N > 10^7$ ciclos		
	m	A	m	A	N/mm²
C[2)]	3.5	4.22×10^{13}	5.5	2.55×10^{17}	78
D	3	1.52×10^{12}	5	4.18×10^{15}	53
E	3	1.04×10^{12}	5	2.29×10^{15}	47
F	3	6.33×10^{11}	5	1.02×10^{15}	40
F2	3	4.31×10^{11}	5	5.25×10^{14}	35
G	3	2.50×10^{11}	5	2.05×10^{14}	29
W	3	1.58×10^{11}	5	9.77×10^{13}	25

Fonte: (BS PD 5500, 1997).

Tabela 5 Classificação dos detalhes das soldas.

Tipo de Junta	Detalhe	Classe
Solda de penetração total feita em mesmo nivel		D
Solda de penetração total feita dos dois lados ou um só lado com desnivel		D
Solda de penetração feita de uma lado apenas sem fixação		D
Solda de penetração total em mesmo nivel e superficie preparada		D

Fonte: (BS PD 5500, 1997).

Se existirem duas ou mais ocorrências de grupos de ciclo de tensão, o dano acumulado deverá ser verificado de tal forma que:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \qquad \text{(EQ12)}$$

2.4.2.3 Consideração do efeito do material

Como apontado anteriormente, a norma permite a aplicação da mesma curva S-N para todos os aços (*ferríticos* e *austeníticos*) e para todas as ligas de alumínio. As curvas de fadiga da Figura 7 estão relacionadas a materiais com módulo de elasticidade de 2,09 x 10^5 N/mm^2, típico para aços *ferríticos* em temperatura ambiente. Quando outro material ou temperatura é considerado, a variação de tensão para o caso particular pode ser obtida através da relação abaixo.

$$\frac{S_r}{S} = \frac{E}{2{,}9\, s\, 10^5} \qquad \text{(EQ13)}$$

Onde:

Sr – variação de tensão do caso particular;
S – variação de tensão conforme curva de fadiga;
E – módulo de elasticidade.

2.4.2.4. Consideração do efeito da espessura de chapa

A resistência à fadiga de uma união soldada pode cair com o aumento da espessura da chapa. Assim, a curva de fadiga considera componentes com espessura de parede até 22 mm. Para chapas com espessura *e* maior que 22 mm, a variação de tensão obtida através da curva de fadiga deverá ser multiplicada pelo fator $(22/e)^{1/4}$.

Levando em consideração os diferentes materiais e espessuras de parede, a equação (EQ14) pode ser reescrita como:

$$N = A \left(\frac{22}{E}\right)^{m/4} \left(\frac{S_r\, 2{,}09\, x\, 10^5}{E}\right)^{-m} \qquad \text{(EQ14)}$$

onde:
N – número de ciclos;
A – constante do material, conforme Tabela 2.4;

m – constante do material, conforme Tabela 2.4;
S_r – variação de tensão do caso particular;
E – módulo de elasticidade.

2.5. ASME B31J *Stress Intensification Factors, Flexibility Factors* (2017)

O código ASME B31 para tubulações requer o uso de fatores de flexibilidade *k* e fatores de intensificação de tensões *SIF* de elementos de tubulações, como curvas e "tês", para determinação das tensões devido a diversos tipos de carregamento, incluindo cargas cíclicas que podem ocasionar falhas por fadiga. A ASME B31J (2017) fornece uma atualização para o cálculo destes fatores, sendo o principal objetivo desta norma melhorar a precisão dos fatores de flexibilidade *k* e intensificadores de tensão *SIF* usados no projeto e na análise de tensões da tubulação. Os fatores de flexibilidades usados para elementos de tubulações pela maioria dos projetistas de tubulações e vasos de pressão foram determinados com base na tecnologia dos anos 50. Segundo o grupo de pesquisa PRG (*Paulin Research Group*), as diferenças entre os fatores de flexibilidade e intensificadores de tensão segundo o apêndice D da ASME B31.3 e os novos fatores da ASME B31J são consideráveis, o que pode modificar significativamente os valores das tensões calculadas.

2.6. DNV OS C101 *Design of Offshore Steel Structures, General* – LRDF *Method* (2016)

Esta norma tem como objetivo prover princípios, requerimentos técnicos e orientações para projetos de estruturas *offshore*. É importante destacar nesta norma, em sua seção 5, *Fatigue Limit States*, a definição dos fatores de projeto à fadiga conforme a seguir.

2.6.1 *Design Fatigue Factors* (DFF)

São fatores que devem ser aplicados para reduzir a probabilidade de falhas por fadiga, e dependem da importância do componente com relação à integridade estrutural, disponibilidade para inspeção e reparo. Os fatores *DFF* devem ser aplicados no projeto de vida à fadiga. A norma recomenda que o fator admissível de dano acumulado de projeto seja expresso como a razão do dano acumulado para um determinado número de ciclos pelo fator de projeto à fadiga (*DFF*). A Tabela 6 traz os fatores a serem considerados de acordo com a condição e localização do elemento estrutural avaliado.

Tabela 6 Fator de projeto à fadiga.

Fator de Projeto à Fadiga (DFF)	
DFF	**Elemento Estrutural**
1	Estrutura interna, com acesso e não soldada diretamente às partes submersas.
1	Estrutura externa, com acesso para inspeção regular e reparos em condições secas e limpas.
2	Estrutura interna, com acesso e soldada diretamente às partes submersas.
2	Estruturas externas não acessíveis para inspeções e reparos em condições secas e limpas.
3	Áreas sem acesso ou impossível de ser acessada para inspeções e reparos durante a operação da unidade.

Fonte: (DNV OS C101, 2016).

Unidades que seguem programas normais de inspeção, de acordo com os requerimentos da classe como, por exemplo, um intervalo de inspeção de 5 anos, o *DFF* deverá ser considerado igual a 1.

Os fatores de projeto à fadiga são baseados em considerações especiais nas quais uma falha por fadiga pode provocar consequências significativas, tais como: risco de perda de vidas humanas, significante poluição ambiental e maior economia para o projeto. Estes fatores podem ser utilizados conforme, por exemplo, a seção 2.11 da norma DNV RP C203 (2010) *Guidance to when a detailed fatigue analysis can be omitted*, onde no caso de *DFF* maior que 1, o fator redutor $DFF^{-0,33}$ deve ser aplicado à tensão limite de fadiga do material.

2.7 IGE / TD / 12 *Pipework Stress Analysis for Gas Industry Plant*. *Recommendations on Transmission and Distribution Practice* (2013)

Segundo esta norma, a maior variação de tensão sofrida por um tubo e seus componentes devido às variações de pressão, temperatura e outras cargas, deve ser avaliada para evitar falha local da estrutura devido a uma trinca. O apêndice V desta norma contempla a análise de fadiga.

Variações na pressão, temperatura e cargas externas aplicadas causam variações de tensões na parede dos tubos, podendo uma trinca devido à fadiga crescer nestas condições. Por esta razão, é necessário garantir que todo o sistema de tubulação possua vida à fadiga adequada.

2.7.1 Classes de fadiga

A aplicação das classes de fadiga nos componentes é dada na Tabela 7. Para outros componentes que não estão listados na Tabela 7, ou juntas com penetração parcial, deverá ser assumida a classe de fadiga G, a menos que este componente esteja referenciado nas normas BS PD 5500 (1997) ou BS 7608 (2014) com outra classe de fadiga, menos conservadora. A curva de fadiga de projeto é apresentada na Figura 8 e Tabela 8.

Tabela 7 Classes de fadiga dos componentes.

COMPONENTE		CLASSE DE FADIGA
Trecho de tubo reto	Esmerilhada	Classe D
	Não esmerilhada	Classe E
Transições de espessuras	Esmerilhada	Classe D
	Não esmerilhada	Classe E
Reduções concêntricas e excêntricas		Classe E
Curvas soldadas	Com costura	Classe E
	Sem costura	Classe D
Curva gomada		Classe E
Colar de topo		Classe F
Flange de pescoço		Classe F
Nipoflange		Classe F
Tê fabricado		Classe F
Tê fabricado conforme BS 1640		Classe F
Tê forjado		Classe F
Sweepolet		Classe F
Tê com reforço integral		Classe F
Sela ou reforço integral		Classe F

Fonte: (IGE / TD / 12, 2013).

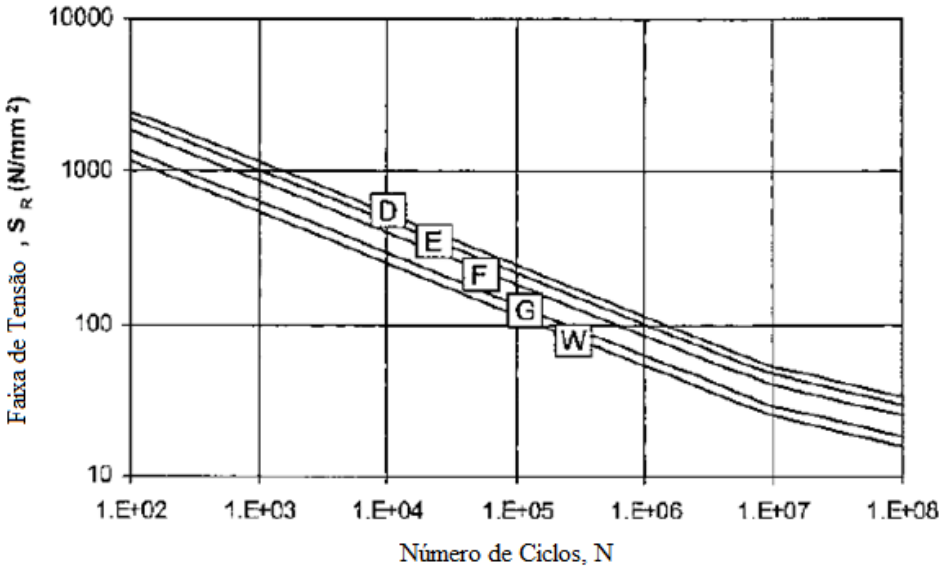


Fig. 8 Curva de fadiga para materiais com módulo de elasticidade igual a 209.000 N/mm2 Fonte: IGE / TD / 12, 2013.

Tabela 8 Constantes das curvas de fadiga.

Classe	Constantes da Curva S-N (para E=209 x 10^3 N/mm^2)				Faixa de tensão para N = 10^7 ciclos (N/mm^2)
	para N ≤ 10^7 ciclos		para N > 10^7 ciclos		
	m	A	m	A	
D	3.0	1.52×10^{12}	5.0	4.18×10^{15}	53 N/mm^2
E	3.0	1.04×10^{12}	5.0	2.29×10^{15}	47 N/mm^2
F	3.0	6.33×10^{11}	5.0	1.02×10^{15}	40 N/mm^2
G	3.0	2.50×10^{11}	5.0	2.05×10^{14}	29 N/mm^2
W	3.0	1.58×10^{11}	5.0	9.77×10^{13}	25 N/mm^2

Fonte: Adaptado de IGE / TD / 12 (2013).

A curva de fadiga é dada pela seguinte equação:

$$N = \frac{A}{{S_R}^m} \qquad \text{(EQ15)}$$

onde:

N – número de ciclos;

S_R – variação de tensão do caso particular;

A – constante do material, conforme Tabela 8;

m – constante do material, conforme Tabela 8.

2.8 UKOOA FPSO *Design Guidance Notes for* UKCS *Service* (2002)

Neste guia desenvolvido pela *UKOOA*, verificou-se em sua seção 2.10.3 *Static vs. dynamic deformations*, que existem considerações sobre relações entre as deformações estáticas e dinâmicas do FPSO. São consideradas deformações estáticas aquelas que ocorrem no FPSO quando em águas calmas (ausência de ondas). As deformações dinâmicas são as decorrentes da ação das ondas sobre a embarcação. Neste documento, considera-se que 40% da deformação total do FPSO é estática, consequentemente, as deformações dinâmicas devido a ação das ondas correspondem a 60% da deformação total do FPSO. Esta informação corrobora com a recomendação da aplicação do fator de 0,6 sobre a deformação total do FPSO informada pela equipe de estruturas, verificado na seção 5.1.8 *Fatigue evaluation in inter module analysis* da especificação técnica. Esta premissa de deformações dinâmicas é aplicada aos casos de carregamentos do estudo de flexibilidade.

2.9 ABS *Spectral-Based Fatigue Analysis for* FPSO *Installations* (2018)

Este guia fornece informações sobre métodos para execução de análise espectral de fadiga de instalações *offshore* do tipo FPSO. A análise espectral da fadiga baseia-se na linearidade presumida das cargas induzidas pelas ondas em relação às próprias ondas. Esta aproximação é aplicável a sistemas flutuantes de produção, armazenamento e descarregamento (FPSOs) e sistemas flutuantes de armazenamento e descarregamento (FSOs). A aplicação do método de análise espectral de fadiga a um casco é apresentada neste guia.

São empregados conceitos e terminologias básicas que foram definidos no ABS *Guide for the Fatigue Assessment of Offshore Structures* (2003). Nessa referência, afirma-se que: "A avaliação da fadiga denota um processo em que a solicitação de fadiga em um elemento estrutural (por exemplo, um detalhe da conexão) é estabelecida e comparada com a resistência à fadiga prevista desse elemento. Uma maneira de categorizar uma técnica de avaliação da fadiga é dizer que ela se baseia em um cálculo direto do dano à fadiga, ou da expectativa de vida à fadiga. Três metodologias importantes de avaliação são os métodos simplificado, espectral e determinístico. Alternativamente, uma avaliação indireta da fadiga pode ser realizada pelo método simplificado, com base na limitação de uma faixa de tensão prevista (definida probabilisticamente), igual ou inferior a uma faixa de tensão permitida. Também existem técnicas de avaliação baseadas em métodos de análise no domínio do tempo, que são especialmente úteis para sistemas estruturais sujeitos a resposta estrutural não-linear ou carga não-linear."

A técnica de avaliação da fadiga apresentada é um método de cálculo direto baseado na análise espectral, que pode produzir um resultado da avaliação da fadiga em termos de danos ou vida útil esperados. A resistência à fadiga dos detalhes estruturais é estabelecida usando a abordagem da curva *S-N* especificada no guia referenciado. Deve-se ter em mente que, para a estrutura do casco de uma instalação *offshore*, o carregamento induzido por ondas é geralmente a fonte dominante de dano por fadiga.

Segundo este guia da ABS, alguns tipos de estruturas flutuantes *offshore* também podem ser submetidos a cargas de fadiga significativas de outros tipos de carregamento. Este é o caso de cascos que sofrem carga e descarga frequentes de fluidos produzidos. Por exemplo, nos sistemas FPSO e FSO, essas alterações de carga podem induzir grandes faixas de tensão na viga do casco e tensão secundária (embora em ciclos mais baixos do que as cargas de onda direta).

A fadiga induzida pelos ciclos de armazenamento e descarregamento também é abordada neste guia.

Os principais componentes do método de análise de fadiga espectral deste guia da ABS são categorizados nos seguintes componentes:

- estabelecer as solicitações por fadiga;
- determinar resistência ou capacidade à fadiga;
- calcular danos por fadiga ou vida útil esperada.

Quando as ondas oceânicas são a principal fonte de solicitação de fadiga, a tarefa fundamental de uma análise espectral de fadiga é a determinação da função de transferência de tensão, H_σ (ω | θ), que expressa a relação entre a tensão em um local estrutural específico e a unidade de amplitude de onda na frequência da onda (ω) e direção da onda (θ) em relação ao navio. A função de transferência de tensão, H_σ (ω | θ), para um local onde a resistência à fadiga deve ser avaliada, deve ser determinada pelo método dos elementos finitos (MEF) de análise estrutural usando um modelo tridimensional (3-D) que representa toda a estrutura do casco, a estrutura de suporte do equipamento na parte superior e a interface com o sistema de amarração e, se aplicável, com os *risers*. Os casos de carga a serem utilizados na análise estrutural devem ser os obtidos de acordo com a seção 6 do guia.

Segundo o guia, é preferível que uma análise estrutural seja realizada em cada frequência, ângulo de incidência, nas condições básicas de carregamento e velocidade do navio, se aplicável, empregada na análise espectral e que as tensões resultantes sejam usadas para gerar diretamente a função de transferência de tensão. Normalmente, a faixa de frequência a ser usada é de 0,2 a 1,80 rad/s, em incrementos não maiores que 0,1 rad/s. No entanto, dependendo das características da resposta, pode ser necessário considerar uma faixa de frequência diferente. O intervalo da direção da onda é de 0 a 360 graus, em incrementos não superiores a 30 graus.

As condições básicas de carregamento estão relacionadas às variações prováveis no carregamento que a estrutura do casco do FPSO experimentará durante sua vida útil no local e para o(s) caso(s) de trânsito. Os principais parâmetros que definem uma condição básica de carregamento são os arranjos de carga / lastro do tanque e variações significativas nas cargas do equipamento na parte superior. Esses parâmetros influenciam diretamente não apenas os componentes de tensão estáticos da resposta do casco, mas também afetam as tensões cíclicas induzidas por ondas. Existem duas maneiras diretas deste efeito. Primeiramente esse efeito é sentido nas magnitudes e distribuições de massas e forças restauradoras na determinação de

acelerações globais e locais e deslocamentos de corpo rígidos, que por sua vez afetam os efeitos da carga induzida por ondas, empregados na análise estrutural. Em segundo lugar, a variação do calado afeta as áreas do casco que serão submetidas a pressões externas diretas e a magnitude e distribuição dessas pressões.

Devido à variação nas condições básicas de carregamento e seus efeitos nas previsões de danos por fadiga, é necessário considerar mais de um caso básico na análise de fadiga. No mínimo, para a análise das condições pós-instalação no local, dois casos devem ser modelados e usados no processo de análise de fadiga baseada em espectro. Os dois casos exigidos são aqueles resultantes e representando, provavelmente, os níveis mais profundos e rasos, respectivamente, que se espera que a instalação experimente durante sua vida útil no local.

Os danos por fadiga decorrente de casos previstos de trânsito do FPSO (geralmente apenas a viagem do FPSO ao local da instalação) devem ser determinados. Na avaliação do dano por fadiga acumulado durante os casos de trânsito, os efeitos da velocidade do navio devem ser incluídos na avaliação dos RAOs (*Response Amplitude Operators*) de tensão e do número de ciclos de tensão. Sugere-se que as solicitações de fadiga produzidas pelos casos de trânsito sejam calculadas separadamente.

Uma estrutura experimentará vários tipos de cargas durante sua vida útil. Descrever adequadamente essas fontes é o primeiro passo crucial na avaliação da fadiga da estrutura. Obviamente, é impossível prever ou descrever com certeza as condições ambientais que a estrutura experimentará durante sua vida útil. No entanto, é possível definir uma série de condições meteorológicas e estabelecer estatisticamente a probabilidade de cada condição ocorrer na estrutura durante sua vida. Uma análise de fadiga pode então ser realizada com base nesse tipo de descrição estatística das condições ambientais.

Durante a vida útil de um FPSO, o mesmo experimentará um grande número de ondas, desde as muito pequenas a possíveis ondas gigantes. Uma maneira prática de descrever essas ondas em constante mudança é dividi-las em várias categorias (estados do mar) e usar estatísticas de ondas de curto prazo para representar cada estado do mar e estatísticas de ondas de longo prazo, geralmente na forma de um diagrama de dispersão de ondas e roseta, para delinear a taxa na qual um estado de mar ocorre.

De maneira semelhante, existem dois níveis na descrição da direcionalidade da onda, ou seja, espectro direcional da onda ou propagação da onda por curto prazo e roseta da onda por longo prazo.

Em resumo, a análise de fadiga espectral começa após a determinação da função de transferência de tensão. Os dados das ondas são então incorporados para produzir espectros de

resposta de tensão, que são usados para derivar a magnitude e frequência de ocorrência de faixas de tensão nos locais onde o dano por fadiga deve ser calculado. Os dados das ondas são representados em termos de um diagrama de dispersão das ondas e um espectro de energia das ondas. O diagrama de dispersão de ondas consiste em estados do mar, que são descrições de curto prazo do mar em termos de probabilidade conjunta de ocorrência de uma altura significativa da onda, *Hs*, e um período característico. Um método apropriado deve ser empregado para estabelecer os danos por fadiga resultantes de cada estado do mar considerado. Os danos resultantes de cada estado do mar são chamados de curto prazo. A fadiga total resultante da combinação do dano de cada uma das condições de curto prazo pode ser obtida através da regra de Miner. O apêndice 3 deste guia da ABS contém uma descrição detalhada das etapas envolvidas em um método sugerido de análise de fadiga espectral, que segue as etapas básicas mencionadas acima.

Observou-se neste guia, que os ciclos de armazenamento e descarregamento são considerados como fadiga de baixo ciclo. As Figuras 9 e 10, reproduzidas do guia da ABS, ilustram a combinação das tensões induzidas pelas ondas e pelos ciclos de armazenamento e descarregamento. Este guia apresenta procedimentos para cálculo do dano por fadiga de baixo e alto ciclo.

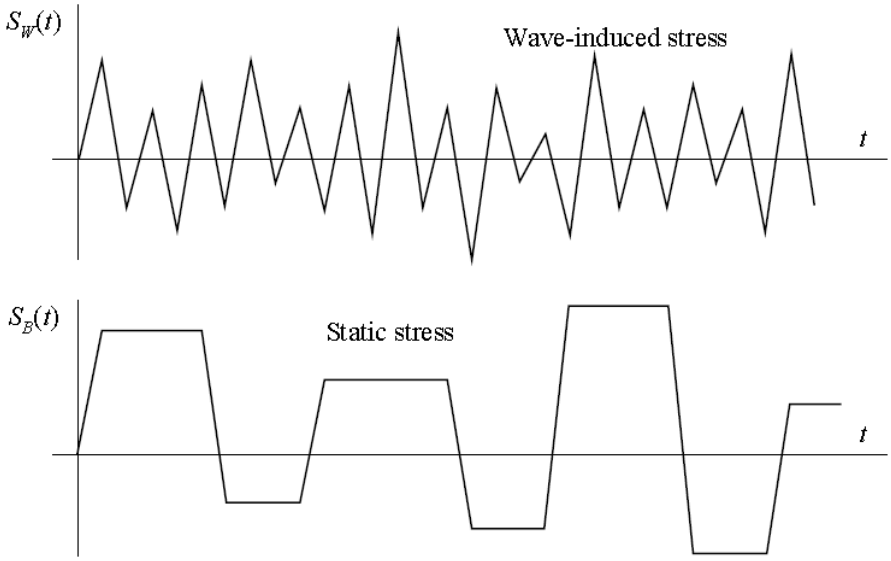


Fig. 9 Tensões induzidas pelas ondas e pelos ciclos de armazenamento e descarregamento (ABS, 2018).

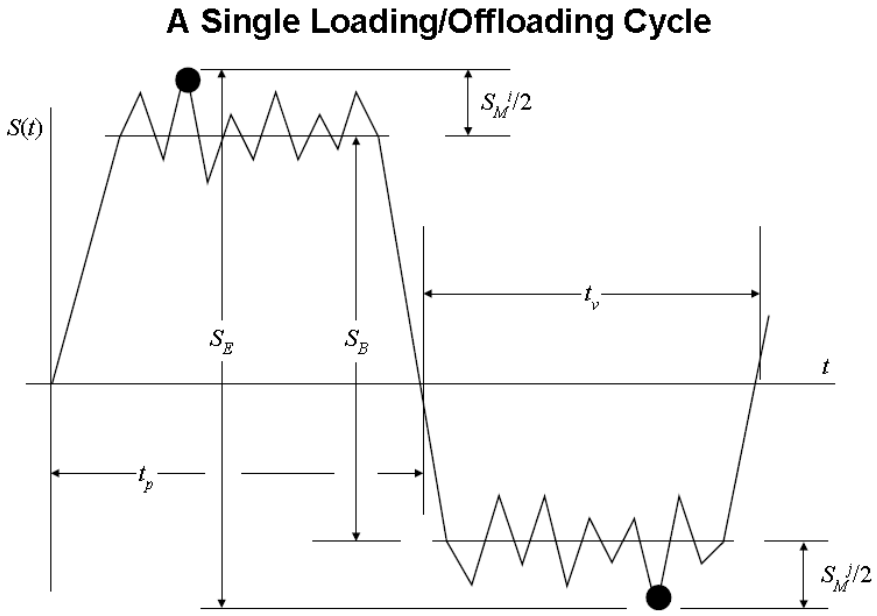
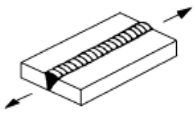
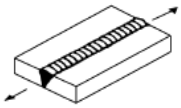


Fig. 10 Superposição das tensões induzidas pelas ondas em um ciclo de armazenamento e descarregamento (ABS, 2018).

2.10 IIW *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components* (2008)

O Instituto Internacional de Soldagem (IIW) apresenta as classes de fadiga (*FAT*), que representam a tensão $\Delta\sigma$ (MPa) em $2x10^6$ ciclos para as juntas soldadas (vide Tabela 9), considerando vários efeitos como, por exemplo, concentradores de tensão, direção de carregamento, imperfeições na solda, entre outros. Além disso, são especificadas as curvas para cada processo de soldagem.

Tabela 9 Classes de fadiga (FAT) para algumas configurações de junta.

No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT Al.	Requirements and Remarks
300	**Longitudinal load-carrying welds**				
311		Automatic longitudinal seam welds without stop/start positions in hollow sections with stop/start positions	125 90	50 36	
312		Longitudinal butt weld, both sides ground flush parallel to load direction, proved free from significant defects by appropriate NDT	125	50	
313		Longitudinal butt weld, without stop/start positions, NDT with stop/start positions	100 90	40 36	

Fonte: (IIW, 2008)

2.11 Considerações sobre as Normas Europeias e Americanas

Sokolov (2013) faz uma análise comparativa entre as normas americana e europeia no que diz respeito aos procedimentos de projeto à fadiga. Uma diferença importante entre os códigos europeus e americanos reside no fato de que os códigos europeus, como BS 7608, BS 7910, PD 5500, EM 13445-3, utilizam dados de resistência à fadiga obtidos em ensaios com juntas soldadas. Já os códigos americanos, como ASME B31.3, ASME III, ASME VIII, API-579, utilizam dados de ensaios em barras sem soldas. Estes dados vêm sendo corrigidos ao longo dos anos para a consideração da resistência à fadiga de detalhes soldados.

Assim, o artigo questiona o fato de qual destas duas escolas de avaliação de fadiga atende de maneira mais adequada ao estudo de fadiga. Começando com um levantamento histórico dos códigos, a ASME B31.3 foi a norma pioneira no que se refere a projeto à fadiga em componentes pressurizados no ano de 1955, utilizando a metodologia de Markl e George (1949). Ao longo do meio século seguinte, as pesquisas revelaram algumas limitações e discrepâncias do método adotado por esta norma. As curvas de fadiga foram obtidas por Markl para todos os tipos de tubulação e, posteriormente, normalizado para a curva de fadiga de referência, de acordo com o detalhe da solda, utilizando os fatores de concentração de tensão (i).

Estes fatores são multiplicadores da tensão admissível que foram adotados para incorporar o efeito da redução da resistência à fadiga nos tipos de juntas que variam de acordo com suas geometrias e qualidade. Um fator de segurança de 2,0 foi aplicado na curva média de fadiga para deslocá-la para um patamar mais baixo de tensão admissível, conforme a equação (EQ16),

$$i\, S_d = 245000\, N_f^{-0,2} \qquad \text{(EQ16)}$$

onde:

i – fator de concentração de tensões;

S_d – tensão admissível em lbf/pol^2;

N_f – número de ciclos até a falha.

Entretanto, a equação 16 não foi incluída na norma ASME B31.3, que a generalizou para representar as condições estáticas equivalentes, condições de alto número de ciclos e condições de baixo número de ciclos de fadiga, simultaneamente. Assim, a equação de projeto estabelecida foi apresentada anteriormente nesta dissertação, sendo o fator de redução de tensão *f*, o único relacionado ao projeto à fadiga.

Em 2008, o PRG (*Paulin Research Group* – grupo americano de pesquisa na área de análise de tensões em tubulações) buscou validar experimentalmente os dados e ensaios de Markl. Conforme mostra a Figura 11, chegou-se à conclusão de que a inclinação da curva de Markl estava em desacordo, não só com os dados dos ensaios obtidos pelo PGR, mas também em desacordo com os códigos europeus. A incorreta inclinação da curva tem como consequência resultados não conservativos para regimes de alto número de ciclos.

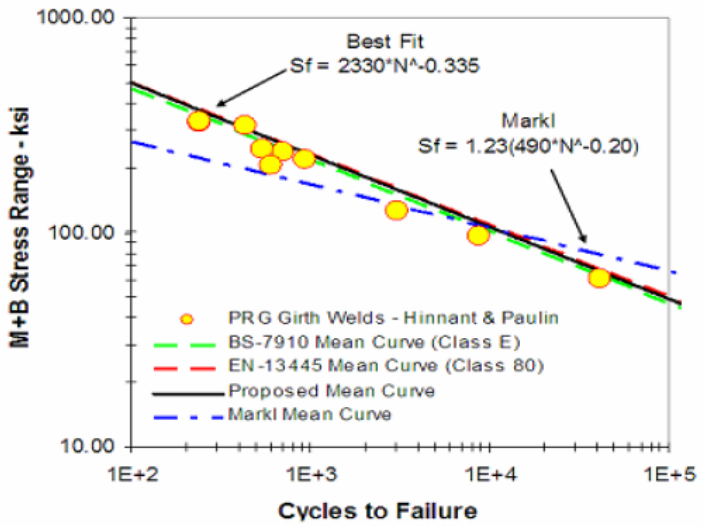


Fig. 11 Curvas obtidas dos resultados dos ensaios do grupo PRG. Fonte: (GRUPO PRG, 2008).

Assim, o PRG propôs a equação (EQ17) ao invés da equação (EQ2) desta dissertação, reproduzida da norma ASME B31.3, para determinação do fator de redução de tensão baseada em seus resultados:

$$f = 20{,}6\ (\mathrm{N})^{-0{,}335} \qquad \text{(EQ17)}$$

Essa proposta tinha o objetivo de alcançar um fator de segurança consistente de 1,84 para todos os números de ciclos, entretanto, não foi aplicada pela ASME.

A norma ASME VIII incorporou o estudo de fadiga no ano de 1968, adaptado da norma ASME III (destinada a componentes nucleares), que já incorporava métodos de análise de fadiga com um fator de redução de tensão de 4,0 a 3,0, abrangendo fadiga de baixo ciclo, às quais estes componentes eram, principalmente, submetidos.

A base de ensaios de fadiga da ASME III foi originada por Langer (1962) através de ensaios de fadiga em barras de aço polidas submetidas a 10^6 ciclos, onde o limite de fadiga absoluto era determinado. Além disso, um fator de 2,0 na tensão ou de 20 no número de ciclos foi aplicado para aproximar o limite inferior da curva de resistência à fadiga. Após ter sido incorporado à ASME VIII, este método vem sendo modificado desde 1968.

Em 1998, o WRC (*Weld Research Council*) implementou uma correlação entre o teste não-destrutivo das juntas soldadas com suas expectativas de vida à fadiga. Passou a ser assim considerado o fator de redução de resistência à fadiga (*FSRF – Fatigue Strength Reduction Factor*) aplicado às curvas de fadiga obtidas por Langer, de maneira a ser considerado o efeito da redução da resistência à fadiga nas juntas soldadas. A *Argonne National Laboratory* (ANL) validou os dados dos ensaios de Langer em 2003 e concluiu que, em alguns casos, os dados se mostravam não-conservativos, mesmo em condições ambientes, da mesma forma como foi observado em outras pesquisas realizadas. Assim, a ANL propôs algumas modificações relacionadas à área nuclear, concluindo que o fator de segurança de 2,0 para tensão e 20 para número de ciclos ainda eram razoáveis, uma vez que não traziam um excessivo grau de conservadorismo, como se acreditava anteriormente.

A União Europeia publicou o novo código EN 13445 de vaso de pressão em 2002. Uma comissão europeia determinou que fosse realizado um estudo comparativo entre esta e a ASME VIII edição 2004, que levasse em consideração o risco e os custos envolvidos. Foi verificado que, em determinados casos, a análise de fadiga de acordo com a ASME VIII previa uma maior estimativa de vida à fadiga se comparada à EN 13445. Uma resposta oficial da ASME concluiu que o estudo da comissão europeia omitiu o fator de redução de resistência à fadiga (*FSRF*).

Estes fatores foram publicados na edição de 2007 da ASME VIII, com mais algumas modificações de metodologia, tais como:

- análise de fadiga com a utilização de elementos finitos em sobreposição à análise, conforme estabelecido pelo código;
- determinação da tensão equivalente através do critério de Von Mises, adaptado para a análise de fadiga;
- o método *Master S-N* foi adicionalmente oferecido como uma alternativa aos dados obtidos por Langer em seus ensaios;
- as curvas de Langer passaram a contemplar diversos materiais como o aço carbono (baixas liga, altas liga, alta resistência), aços martensíticos e austeníticos extrapolados para 10^{11} ciclos;
- o novo método *Master S-N* utiliza o desenvolvimento original do Dr. P. Dong do *Batelle Institute* (ou método Batelle), com algumas modificações realizadas pela ASME;
- o grupo PRG completou o estudo sobre o efeito das modificações realizadas pela ASME (correção de espessura, tensão principal e plasticidade);
- as curvas de fadiga do método *Master S-N* contempladas na edição 2007 da ASME VIII consideram três níveis de falha, são do tipo logarítimico e não possuem um limite de fadiga.

As principais conclusões do artigo podem ser resumidas como a seguir.

- Os códigos europeus de análise de fadiga estão historicamente em uma condição mais favorável do que os códigos ASME.
- Os códigos ASME III e ASME VIII foram baseados em ensaios mais antigos (entre os anos 1950 e 1960), onde diferenças de detalhes de juntas soldadas não eram contempladas.
- Foram acrescentadas várias modificações ao método original de análise de fadiga proposto pela ASME, uma vez que estes se encontravam distorcidos.
- Enquanto os métodos da ASME não forem totalmente confirmados pela indústria, sua aplicação na avaliação da fadiga será mantida em dúvida.

2.12 Estudo Comparativo entre Procedimentos de Projeto à Fadiga de Tubulações em FPSO

Conforme já mencionado, a grande demanda por plataformas do tipo FPSO, principalmente nos anos de 2011 a 2015, fez com que várias empresas projetistas desenvolvessem seus projetos de tubulações paralelamente e de forma independente. A inexistência de um procedimento padrão para cálculo de fadiga de tubulações em instalações

offshore fez com que diferentes metodologias fossem utilizadas pelos projetistas, que empregam muitas vezes o código ASME B31.3, ou critérios baseados em recomendações da DNV RP 203 aplicadas às disciplinas naval e de estruturas.

Nesta seção, serão analisados diferentes procedimentos de cálculo de fadiga adotados em projetos de tubulações para FPSOs. Importante observar que as divergências de metodologias de análise de fadiga de cada projeto já se tornam claras na comparação entre as especificações técnicas de cada projeto. Foram considerados como base de estudo, quatro sistemas de tubulações de processo de diferentes plataformas, que se estendem ao longo do FPSO, sendo desta forma bastante influenciados pelas acelerações e deslocamentos estruturais do navio.

Há uma unanimidade entre os critérios na orientação de que as tensões cíclicas causadas pelas acelerações devido ao movimento do navio e o deslocamento estrutural devem ser considerados no projeto à fadiga. Entretanto, divergem no método de avaliação e na definição do dano máximo admissível. Determinados critérios consideram que deverá ser utilizado o método mais conservativo entre o método simplificado da DNV RP C203 e o método global de cálculo de fadiga da ASME BPV Sec. VIII Div. 2 (apêndices 4 e 5). Alguns especificam o tempo de vida útil de 25 anos para as instalações, enquanto que outros informam que a vida útil deverá ser conforme o projeto. Outro aspecto importante é com relação à especificação da curva de fadiga a ser utilizada. Determinados critérios entram no mérito de qual curva deverá ser utilizada, levando em consideração o tipo de fabricação da tubulação, bem como a maneira como a qual será inspecionada e também se possui ou não acessórios soldados.

Nenhum dos procedimentos analisados considerou os efeitos do armazenamento e descarregamento do FPSO, embora os deslocamentos produzidos por estas operações sejam considerados pelo código DNV RP D101 como possíveis causas de danos por fadiga em FPSOs. Foram observadas divergências também com relação à frequência natural mínima recomendada para tubulações com possibilidade de apresentar vibrações excessivas, como tubulações que operam com escoamentos multifásicos. Os procedimentos de projeto também diferem em outros aspectos, como listado a seguir.

- Emprego de relações entre os deslocamentos de *sag* e *hog* para redução dos casos de carregamento na análise computacional.
- Aplicação de fatores aos deslocamentos estruturais do FPSO para adequação dos níveis de deslocamentos em relação às diferentes alturas de onda.
- Agrupamento das faixas de altura de onda para redução dos casos de carregamento na análise computacional.

- Alguns projetos consideram a condição operacional (*DOC – Design Operating Condition*) e outros a condição extrema de projeto (*DEC – Design Extreme Condition*).
- Consideração de diferentes números de ciclos de ondas para cálculo de dano por fadiga.
- Emprego de diferentes casos de carregamento.

A Tabela 10 apresenta um resumo das principais diferenças encontradas entre os quatro projetos analisados.

Tabela 10 Comparação entre critérios de projeto para tubulações em FPSOs.

ITEM		PROJETO 1	PROJETO 2	PROJETO 3	PROJETO 4
1 - DANO ADMISSÍVEL		1,0	1,0	0,6 para tubos até 22 mm (espessura). $\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 0{,}6\ (22/e)^{0{,}75}$	0,6 para tubos até 22 mm (espessura). $\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 0{,}6\ (22/e)^{0{,}75}$
2 - CURVA DE FADIGA		-	**- F3** para todos os materiais e temperaturas; **- E** da PD5500 para 100% radiografados; **- D** da PD 5500 para tubo sem acessório soldado.	**- F3** **- B1** → sem cost. **- B2** → com cost. (DNV RP C203)	-
3 - VIDA ÚTIL		-	Conforme o projeto	25 anos	Conforme o projeto
4 - ESCOAMENTO BIFÁSICO	**MÉTODO DE ANÁLISE**	Nas linhas identificadas pela equipe de PROCESSO, as forças devido ao escoamento bifásico devem ser consideradas nos pontos de mudanças de direção para avaliação da tensão e consideração dos carregamentos nos suportes.	Nas linhas identificadas pela equipe de PROCESSO, as forças devido ao escoamento bifásico devem ser consideradas nos pontos de mudanças de direção, sendo realizada análise estática ou dinâmica, de acordo com a necessidade. Para a análise estática, considerar DLF igual a 2 (Fator de	Nas linhas identificadas pela equipe de PROCESSO, as forças devido ao escoamento bifásico devem ser consideradas nos pontos de mudanças de direção, sendo realizada análise estática ou dinâmica, de acordo com a necessidade. Para a análise estática, considerar DLF igual a 2 (Fator de Carregamento Dinâmico).	Nas linhas identificadas pela equipe de PROCESSO, as forças devido ao escoamento bifásico devem ser consideradas nos pontos de mudanças de direção, sendo realizada análise estática ou dinâmica, de acordo com a necessidade. Para a análise estática, considerar DLF igual a 2 (Fator de Carregamento Dinâmico).

ITEM		PROJETO 1	PROJETO 2	PROJETO 3	PROJETO 4
			Carregamento Dinâmico).		
	FREQ. NATURAL	≥ 3 Hz	≥ 2 Hz	≥ 5 Hz	≥ 5 Hz
5 - MÉTODO DE CÁLCULO		DNV; Curva S-N; Palmgren Miner	DNV RP C 203 ou ASME VIII, o mais conservador.	DNV RP C 203	DNV RP C 203 ou ASME VIII, o mais conservador.
6 - DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE CICLOS		Sim	Sim	Sim	Sim

CAPÍTULO III

3.1 FONTES DE DANOS POR FADIGA EM TUBULAÇÕES *OFFSHORE*

Tubulações instaladas em FPSOs podem estar sujeitas a um grande número de fatores causadores de fadiga. Além das tensões devido às variações de temperatura e pressão, a ação das ondas sobre a plataforma impõe deslocamentos e acelerações nas tubulações, que devem ser considerados no projeto à fadiga. Vibrações induzidas pelo escoamento multifásico também são comuns em tubulações de processo. Além disto, as operações de armazenamento e descarregamento (*loading and offloading*) de óleo produzido pela plataforma também geram ciclos de deformação da estrutura do FPSO, que podem resultar em deslocamentos impostos às tubulações.

Neste trabalho, foram consideradas as seguintes fontes de fadiga:

- tensões de origem térmica devido às variações de temperatura dos ciclos operacionais;
- deslocamentos impostos às tubulações devido aos movimentos de tosamento e alquebramento (*sag and hog*) do FPSO;
- acelerações das tubulações devido aos movimentos de rotação jogo, arfagem, guinada (*roll, pitch, yaw*) e de deslocamento avanço, deriva, afundamento (*surge, sway, heave*) nos três eixos do navio;
- deslocamentos impostos às tubulações devido aos ciclos de armazenamento e descarregamento do FPSO;

3.1.1 Tensões térmicas devido aos ciclos operacionais

Quando um tubo é submetido a uma variação de temperatura, ele sofre uma variação de comprimento. Se o tubo estiver livre, essa variação também será livre e não se desenvolverão tensões internas nem reações. Entretanto, se o tubo estiver fixado de alguma forma, aparecerão tensões internas no tubo e reações nos pontos de fixação, em consciência da restrição imposta à livre dilatação ou contração do tubo. (TELES, 2004).

Estas tensões geradas são as chamadas tensões secundárias, que também podem ser originadas devido aos movimentos provocados por agentes externos aos sistemas de tubulações, tais como um bocal de um equipamento, ou mesmo devido ao deslocamento estrutural que serão impostos às tubulações devido à ação das ondas.

Em uma unidade FPSO, os equipamentos de processo possuem ciclos de operação, estando ora em funcionamento, ora fora de funcionamento. Isto se reflete para a tubulação que

ora estará operando com a temperatura do fluido, ora estará parada em temperatura ambiente. Assim, as tensões que surgem nas tubulações devido às restrições dos movimentos, conforme descrito no parágrafo anterior, são cíclicas ao longo de toda a vida útil da planta de processo, sendo esta uma fonte de fadiga de baixo ciclo de repetição (LCF – *Low Cycle Fatigue*).

Conforme já apresentado no Capítulo II, a norma ASME B31.3 apresenta o cálculo da tensão admissível devido às tensões secundárias no parágrafo 302.3.5, conforme a Equação 3.1.

$$S_A = f\ (\ 1{,}25\ S_c +\ 0{,}25\ S_h) \qquad \text{(EQ18)}$$

onde:

S_A – tensão admissível;

$f\ -$ fator de redução de tensão em função do número de ciclos;

$S_c\ -$ tensão admissível na temperatura ambiente;

$S_h\ -$ tensão admissível na temperatura de projeto.

O fator de redução de tensão é dado pela curva da Figura 3 mostrada no Capítulo II, e pode ser calculado pela Equação 19.

$$f = 6{,}0\ (N)^{-0{,}2} \qquad \text{(EQ19)}$$

onde:

$N\ -$ número de ciclos esperados em toda a vida útil da tubulação.

Para a avaliação da fadiga devido aos ciclos de temperatura, ocorridos durante a operação de um sistema de tubulações, deve ser considerado, de forma conservadora, a ocorrência de um ciclo de operação por dia, totalizando 7000 ciclos operacionais para uma vida útil da unidade de 20 anos.

O *software* de análise de flexibilidade determina as tensões secundárias atuantes em um sistema de tubulações através do caso de carregamento denominado “expansão”, indicado pela abreviatura EXP. Estas tensões são obtidas a partir da subtração algébrica entre o caso de “operação” (OPE); que se refere ao somatório de todas as contribuições do sistema em operação, sendo elas: peso da tubulação somado ao peso do fluido (W), temperatura (T1 ou T2), pressão interna (P1) e deslocamentos de agentes externos (D1 ou D2); do caso de “sustentação” (SUS), que leva em consideração o peso próprio da tubulação e do fluido (W) adicionado à pressão interna (P1). O resultado dessa combinação corresponde às tensões

secundárias geradas pelo efeito da temperatura (T1 ou T2) e dos deslocamentos de agentes externos (D1 ou D2) do sistema de tubulações.

Assim, no que se refere à avaliação da fadiga, deve ser considerada a tensão resultante no caso EXP. Os casos de carregamento para consideração da fadiga térmica devem ser distribuídos conforme Tabela 11.

Tabela 11 Casos de carregamentos – Fadiga Térmica.

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS
L1	W+T1+P1+D1	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA	OPE	-
L2	W+T2+P1+D2	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA	OPE	-
L3	W+P1	PESO PRÓPRIO + PRESSÃO	SUS	-
L4	L1-L3	EXPANSÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA	EXP	-
L5	L2-L3	EXPANSÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA	EXP	-
L6	L4, L5	Máximo EXP	MÁX.	-
L7	L6	FADIGA	FAT	7000

Onde:

W – Peso da tubulação + fluido;

T1 – Temperatura de Projeto Máxima;

T2 – Temperatura de Projeto Mínima;

P1 – Pressão de Projeto;

D1 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Máxima (provenientes de um equipamento, por exemplo);

D2 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Mínima (provenientes de um equipamento, por exemplo);

Conforme observado na Tabela 11, a fadiga térmica deve ser verificada para o caso de maiores níveis de tensões, seja na condição de projeto máxima ou na condição de projeto mínima.

3.1.2 Tensões devido às acelerações

Os movimentos de rotação, jogo, arfagem, guinada (*roll, pitch, yaw*) e de deslocamento, avanço, deriva, afundamento (*surge, sway, heave*) nos três eixos do navio geram acelerações que devem ser avaliadas quanto ao processo de fadiga das tubulações *offshore*.

Estas acelerações diferem de acordo com a condição do sistema, uma vez que este pode estar submetido a uma condição de operação extrema (DEC), condição de operação normal (DOC), e a condição transitória que corresponde ao transporte da plataforma até o local de destino (TRANSIT).

Para a elaboração das informações referente à intensidade de ondas, um diagrama de dispersão de ondas é elaborado a partir das distribuições de altura significativa de onda (H_S) e período (T_P), sendo obtidos a partir do processamento de informações registradas em determinado intervalo de tempo (FRANZ et al., 2016).

Importante ressaltar que o projeto de engenharia de todas as unidades FPSO estudadas neste trabalho, deve seguir os mesmos parâmetros meteorológicos e oceanográficos informados em uma única especificação de dados, já que se encontram localizadas na mesma região da Bacia de Santos, conforme ilustrado na Figura 12.

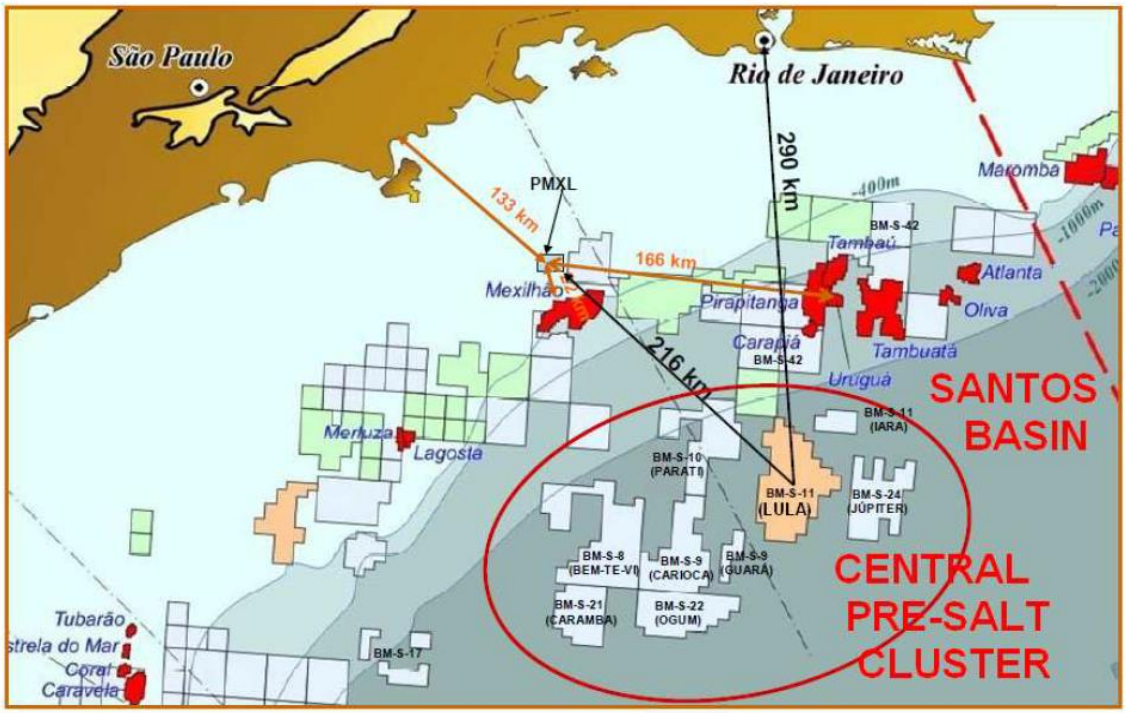


Fig. 12 Indicação dos campos de exploração de óleo e gás da Bacia de Santos localizados na Bacia de Santos. Fonte: (S/D).

Quando se trata de probabilidade de ocorrências de fenômenos naturais, considera-se o período de retorno que é o tempo em anos em que as ondas máximas ocorrerão novamente. As amostras de alturas significativas de ondas são identificadas e extrapoladas através da distribuição de *Weibull* para variados períodos de retorno.

A distribuição de *Weibull* é um dos métodos mais usuais na análise de valores extremos de altura significativa da onda para uma distribuição de longo termo. É uma das distribuições

mais utilizadas em trabalhos desenvolvidos em renomados centros de estudos de climatologia de ondas (PICCININI, 2008).

Em geral, projetos de engenharia avaliam o sistema de tubulações submetido a três diferentes condições, as quais variam de acordo com o tempo de retorno, conforme indicado na Tabela 12.

Tabela 12 Condições de análise segundo os dados de acelerações.

CONDIÇÃO	PERÍODO DE RETORNO
DOC (Condição de Projeto para Operação)	1 ano
DEC (Condição de Projeto Extrema)	100 anos
TRANSIT (Transitória)	10 anos

Para a análise de fadiga, as informações contempladas no estudo oceanográfico servem de base para a obtenção da quantidade de ciclos de ocorrências das ondas significativas. Além disso, é com base neste estudo que são obtidas as amplitudes de deslocamentos da viga navio e acelerações impostas às tubulações.

As acelerações dos módulos de um FPSO, bem como a aceleração do centro de gravidade do navio, encontram-se discriminadas em especificação única para cada plataforma, pois variam de acordo com o formato do casco do FPSO. As acelerações destes variados pontos são obtidas a partir das equações, conforme documento *Acceleration Data*:

$$a_l^{'} = a_l + g.sen(\theta_{PITCH}) \quad \text{(EQ20)}$$
$$a_t^{'} = a_t + g.sen(\theta_{ROLL}) \quad \text{(EQ21)}$$
$$a_v^{'} = a_v + g \quad \text{(EQ22)}$$

onde:

θ_{PITCH} – Ângulo de inclinação;

θ_{ROLL} – Ângulo de rolamento;

a_l – aceleração dinâmica longitudinal para cada ponto;

a_t - aceleração dinâmica transversal para cada ponto;

a_v - aceleração dinâmica vertical para cada ponto;

g – aceleração da gravidade (9,81 m/s^2).

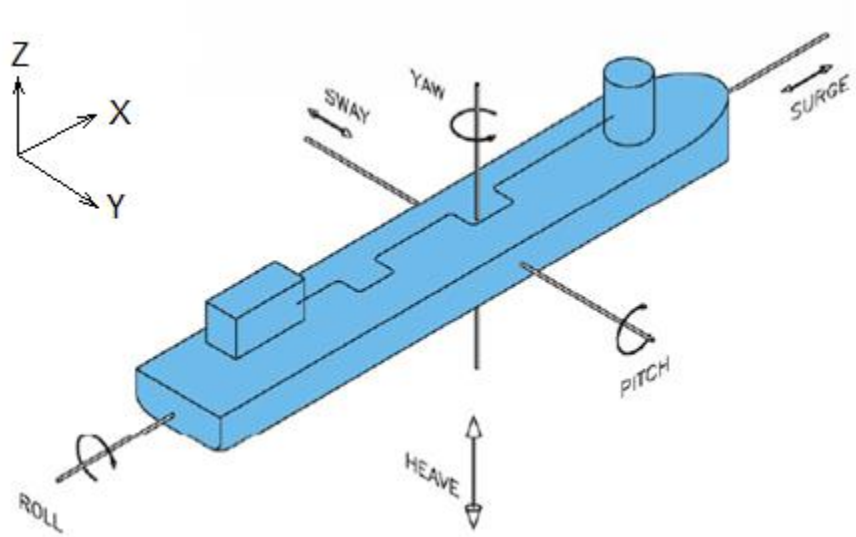


Fig. 13 Nomenclatura dos movimentos da embarcação (Fonte: *A Six Degrees of Freedom Ship Simulation System for Maritime Education*, 2010).

Esta especificação informa a máxima aceleração esperada para uma única amplitude. Os valores máximos baseiam-se em pesquisas de todos os resultados obtidos de diferentes ângulos e elevações do navio, bem como variadas condições de onda. Os resultados apresentados nesta dissertação levam em consideração a máxima aceleração longitudinal, transversal e vertical nos variados pontos de interesse de acordo com todas as condições de DOC, DEC e TRANSIT.

Dessa forma, os valores de acelerações devem ser aplicados em todas as direções e sentidos, conforme abaixo:

U1 – aceleração no eixo x (g);
U2 – aceleração no eixo y (g);
U3 – aceleração no eixo z (g).

Importante registrar que, geralmente, os projetos de engenharia adotam o eixo de referências de acordo com o apresentado no canto superior esquerdo da Figura 13 sendo, o eixo “x” longitudinal ao navio, o eixo “y” transversal, e o eixo “z” representando o eixo vertical da embarcação. Entretanto, determinados projetos já executados, como o caso do estudos de caso 5.1.1 e 5.1.2 que serão apresentados no Capítulo V, adotaram eixo de referência diferente, sendo bastante comum em projetos de tubulações representar a direção vertical pelo eixo “y”, a direção longitudinal pelo eixo “x” e a direção transversal pelo eixo “z”.

3.1.2.1 Aplicação de dados de acelerações no *software* de análise de tensões

A Tabela 13 apresenta um exemplo de dados de acelerações informados no *Acceleration Data* para a condição DOC em determinada área/módulo do FPSO. São informadas as magnitudes das acelerações de *roll*, *pitch* e *heave* da plataforma em termos da aceleração da gravidade.

Tabela 13 Acelerações inerciais para DOC *informadas no Acceleration Data*.

CONDIÇÃO	ACELERAÇÃO		
	X (g)	Y (g)	Z (g)
DOC	0,200	-0,170	0,075

A aplicação das acelerações no *software* de análise de flexibilidade se dá através de vetores U1, U2 e U3, conforme indicado na Tabela 14.

Tabela 14 Composição de acelerações (DOC).

EIXO	VETOR U1	VETOR U2	VETOR U1
X (g)	0,200	-	-
Y (g)	-	-0,170	-
Z (g)	-	-	0,075

A fim de simular os efeitos das 3 componentes de aceleração em todas as direções e sentidos, os vetores U1, U2, e U3 são combinados um a um, ora positivamente, ora negativamente, resultando em um total de 8 combinações, conforme a Tabela 15.

Tabela 15 Combinação dos vetores acelerações.

+U1+U2+U3
+U1-U2+U3
+U1+U2-U3
+U1-U2-U3
-U1+U2+U3
-U1-U2+U3
-U1+U2-U3
-U1-U2-U3

3.1.2.2 Tensão Média

Segundo a norma ABS *Spectral Based Fatigue Analysis* (2018), o processo de tensão em componentes estruturais de uma instalação *offshore* pode ser considerado por uma sobreposição de tensões induzidas por ondas e também pelos carregamentos estáticos.

O gráfico da Figura 14 apresenta as tensões ocasionadas devido aos ciclos térmicos (LCF - *Low Cycle Fatigue*), e também pelas acelerações e deslocamentos provocados pelas ondas.

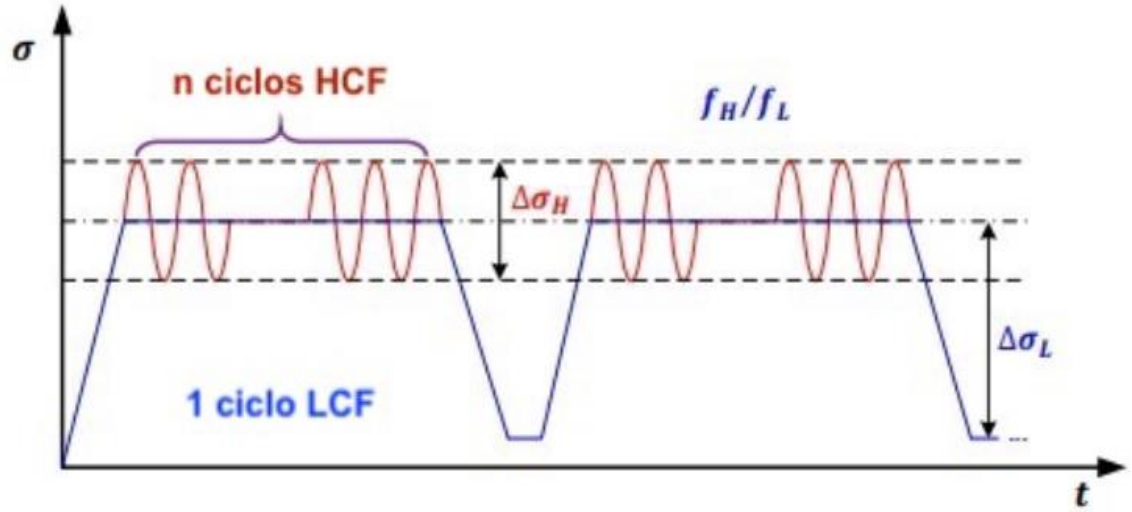


Fig. 14 Gráfico do ciclo de tensão devido à temperatura (LCF – *Low Cycle Fatigue*) e devido aos deslocamentos e acelerações (HCF – *High Cycle Fatigue*).

É conhecido o efeito da tensão média como parcela de contribuição para o processo de fadiga, entretanto, devido à grande complexidade de sua determinação, o seu efeito normalmente é desprezado no cálculo de fadiga executado nos projetos de tubulações.

3.1.2.3 Aceleração Resultante (SRSS)

O apêndice G da norma DNV RP D-101 aborda os principais casos operacionais e ocasionais de carregamentos de tubulações *offshore*. Este apêndice recomenda que o resultado da raiz quadrada do somatório dos quadrados das tensões originadas pelas acelerações deve ser considerado como uma combinação ocasional. Sendo assim, um acréscimo de tensão de 1,33 sobre a tensão admissível a quente do material (S_H) poderá ser utilizada para esta avaliação conforme permite a norma ASME B31.3 (2018). Os casos L27 e L36 dos casos de carregamentos da Tabela 17 retratam esta verificação para as condições de temperatura T1 e T2, respectivamente.

3.1.2.4 Efeito da não linearidade

Uma atenção especial deve ser dada aos efeitos de não linearidade ao se formular os casos de carregamento de análise de flexibilidade de tubulações, por influenciarem no resultado das tensões. Uma vez formulados ou ordenados de maneira inadequada, ou seja, utilizando-se casos de cargas isolados para a consideração dos vetores acelerações (U1, U2 e U3), ao invés de considerá-los combinados com o caso de operação, para que, posteriormente, sejam subtraídos em uma combinação algébrica, traz resultados imprecisos de tensões. Representam efeitos não lineares de uma análise de flexibilidade de tubulações os seguintes itens:

- fator de atrito entre o suporte da tubulação e a estrutura;

- consideração de folga (*gap*) que permitem a tubulação um deslocamento definido até tocar o suporte;

- consideração de restrições em apenas um sentido, como por exemplo, uma restrição vertical "+Y", ao invés de uma restrição "+/-Y";

- perda de apoio da tubulação - ocorre quando, devido à proximidade com um trecho vertical e à temperatura, a tubulação acaba não tendo contato com o suporte mais próximo.

Um comparativo de resultados de casos de carregamentos levando em consideração a questão da não linearidade dos cálculos é abordado no estudo de caso desta dissertação.

3.1.2.5 Cálculo de fadiga pelo *software* CAESAR II

O *software* CAESAR II utiliza as curvas S-N e a regra de *Palmgren Miner* para o cálculo do dano acumulado por fadiga. Quanto à tensão de fadiga do sistema de tubulações, esta é calculada conforme descrito no Apêndice 11.1.4 desta dissertação.

As tensões de fadiga admissíveis são interpoladas *logaritmicamente* a partir da curva de fadiga inserida no *software*, considerando amplitudes de tensão de pico a pico, e com base no número de ciclos designados para o caso de carga.

Na análise estática devido a carregamentos como, por exemplo, expansão térmica, pressão, etc., a tensão calculada é assumida como um valor cíclico com amplitude de pico a pico, desta forma, para uma análise de fadiga devido a carregamentos variáveis desta mesma natureza, a tensão admissível à fadiga é extraída diretamente da curva de fadiga, uma vez que esta foi definida com base em amplitudes de tensão de pico a pico.

Para a análise dinâmica, a tensão calculada é assumida como um valor cíclico de 0 a pico (por exemplo, vibração, terremoto, etc.), de modo que a tensão admissível extraída da curva de fadiga deve ser dividida por dois antes de ser usada na comparação.

Os casos de carregamentos do tipo FAT (*fatigue*) devem ser construídos relacionando o caso de carregamento a ser avaliado, além de levar em consideração a quantidade prevista de ciclos para cada evento.

O *software* fornece duas maneiras para visualização dos resultados dos casos de carregamentos do tipo FAT. O primeiro é o resultado de tensão através do recurso "*stress summary*" que mostra a maior tensão de fadiga calculada para um determinado ponto nodal. A outra maneira de apresentação do resultado se dá em forma de dano através da ferramenta "*cumulative usage*". Para os casos em que exista mais de um caso de carga cíclica contribuindo para uma falha por fadiga, esta mesma ferramenta deve ser utilizada, desta vez, selecionando todos os casos de carga FAT que contribuem para a geração do dano no sistema de tubulações.

3.1.2.6 *Range* de tensão devido à aceleração

Considerando que o efeito das acelerações inerciais ocorrerá para os dois sentidos de cada eixo de atuação, o caso de carregamento para aceleração sugerido neste item contempla o *range* da aceleração (amplitude de pico a pico), conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 Range dos casos de tensões das acelerações combinadas.

Combinação 1	**(+U1+U2+U3)-(-U1-U2-U3)**
Combinação 2	(+U1-U2+U3)-(-U1+U2-U3)
Combinação 3	(+U1+U2-U3)-(-U1-U2+U3)
Combinação 4	(+U1-U2-U3)-(-U1+U2+U3
Combinação 5	(-U1+U2+U3)-(+U1-U2-U3)
Combinação 6	(-U1-U2+U3)-(+U1+U2-U3)
Combinação 7	(-U1+U2-U3)-(+U1-U2+U3)
Combinação 8	(-U1-U2-U3)-(+U1+U2+U3)

3.1.2.7 Casos de Carregamento

Como exemplo, levando somente em consideração o efeito das acelerações impostas às tubulações do FPSO, e desprezando-se, neste momento, o efeito dos deslocamentos de *SAG* e *HOG*, a Tabela 17 traz uma proposta de combinação de casos de carregamento, seja para a condição DOC ou DEC.

Importante ressaltar que estes casos de carregamento ainda não consideram o fator de altura de onda, tão pouco a definição da quantidade de faixas de alturas, sendo seu único objetivo a apresentação da composição dos casos com atenção voltada para a minimização de imprecisões de resultados oriundos do efeito da não linearidade no cálculo de tensões.

Conforme observado na Tabela 17, os vetores acelerações são combinados com o caso de operação para a condição de projeto máxima L1, conforme as linhas L3 à L10, e para a condição de projeto mínima L2, conforme as linhas L11 à L18. Posteriormente, estes são combinados algebricamente com o respectivo caso de operação (L1 e L2), resultando nos casos L19 ao L26 para a condição de projeto máxima, e L28 ao L36 para a condição de projeto mínima.

Tabela 17 Casos de carregamentos - Acelerações.

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS
L1	W+T1+P1+D1	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA	OPE	-
L2	W+T2+P1+D2	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA	OPE	-
L3	W+T1+P1+D1+U1+U2+U3	COMBINAÇÃO 1 – TEMP. 1	OPE	-
L4	W+T1+P1+D1+U1+U2-U3	COMBINAÇÃO 2 – TEMP. 1	OPE	-
L5	W+T1+P1+D1+U1-U2+U3	COMBINAÇÃO 3 – TEMP. 1	OPE	-
L6	W+T1+P1+D1+U1-U2-U3	COMBINAÇÃO 4 – TEMP. 1	OPE	-
L7	W+T1+P1+D1-U1+U2+U3	COMBINAÇÃO 5 – TEMP. 1	OPE	-
L8	W+T1+P1+D1-U1+U2-U3	COMBINAÇÃO 6 – TEMP. 1	OPE	-
L9	W+T1+P1+D1-U1-U2+U3	COMBINAÇÃO 7 – TEMP. 1	OPE	-
L10	W+T1+P1+D1-U1-U2-U3	COMBINAÇÃO 8 – TEMP. 1	OPE	-
L11	W+T2+P1+D2+U1+U2+U3	COMBINAÇÃO 1 – TEMP. 2	OPE	-
L12	W+T2+P1+D2+U1+U2-U3	COMBINAÇÃO 2 – TEMP. 2	OPE	-
L13	W+T2+P1+D2+U1-U2+U3	COMBINAÇÃO 3 – TEMP. 2	OPE	-
L14	W+T2+P1+D2+U1-U2-U3	COMBINAÇÃO 4 – TEMP. 2	OPE	-
L15	W+T2+P1+D2-U1+U2+U3	COMBINAÇÃO 5 – TEMP. 2	OPE	-
L16	W+T2+P1+D2-U1+U2-U3	COMBINAÇÃO 6 – TEMP. 2	OPE	-
L17	W+T2+P1+D2-U1-U2+U3	COMBINAÇÃO 7 – TEMP. 2	OPE	-
L18	W+T2+P1+D2-U1-U2-U3	COMBINAÇÃO 8 – TEMP. 2	OPE	-
L19	L3-L1	+U1+U2+U3	SUS	-
L20	L4-L1	+U1+U2-U3	SUS	-
L21	L5-L1	+U1-U2+U3	SUS	-
L22	L6-L1	+U1-U2-U3	SUS	-
L23	L7-L1	-U1+U2+U3	SUS	-
L24	L8-L1	-U1+U2-U3	SUS	-
L25	L9-L1	-U1-U2+U3	SUS	-
L26	L10-L1	-U1-U2-U3	SUS	-
L27	L19	+U1+U2+U3 - SRSS	OCC	-
L28	L11-L2	+U1+U2+U3	SUS	-
L29	L12-L2	+U1+U2-U3	SUS	-
L30	L13-L2	+U1-U2+U3	SUS	-
L31	L14-L2	+U1-U2-U3	SUS	-
L32	L15-L2	-U1+U2+U3	SUS	-
L33	L16-L2	-U1+U2-U3	SUS	-
L34	L17-L2	-U1-U2+U3	SUS	-
L35	L18-L2	-U1-U2-U3	SUS	-
L36	L28	+U1+U2+U3 - SRSS	OCC	-
L37	L19-L35	(+U1+U2+U3)-(-U1-U2-U3)	SUS	-
L38	L20-L34	(+U1-U2+U3)-(-U1+U2-U3)	SUS	-

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS
L39	L21-L33	(+U1+U2-U3)-(-U1-U2+U3)	SUS	-
L40	L22-L32	(+U1-U2-U3)-(-U1+U2+U3	SUS	-
L41	L23-L31	(-U1+U2+U3)-(+U1-U2-U3)	SUS	-
L42	L24-L30	(-U1-U2+U3)-(+U1+U2-U3)	SUS	-
L43	L25-L29	(-U1+U2-U3)-(+U1-U2+U3)	SUS	-
L44	L26-L28	(-U1-U2-U3)-(+U1+U2+U3)	SUS	-
L45	L27,L36	+U1+U2+U3 - SRSS	OCC	-
L46	L37	FADIGA – Combinação 1	FAT	Nº Ciclos total/8
L47	L38	FADIGA – Combinação 2	FAT	Nº Ciclos total/8
L48	L39	FADIGA – Combinação 3	FAT	Nº Ciclos total/8
L49	L40	FADIGA – Combinação 4	FAT	Nº Ciclos total/8
L50	L41	FADIGA – Combinação 5	FAT	Nº Ciclos total/8
L51	L42	FADIGA – Combinação 6	FAT	Nº Ciclos total/8
L52	L43	FADIGA – Combinação 7	FAT	Nº Ciclos total/8
L53	L44	FADIGA – Combinação 8	FAT	Nº Ciclos total/8

Onde:
W – Peso da tubulação + fluido;

T1 – Temperatura de Projeto Máxima;

T2 – Temperatura de Projeto Mínima;

P1 – Pressão de Projeto;

D1 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Máxima (provenientes de um equipamento);

D2 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Mínima (provenientes de um equipamento).

SRSS – Aceleração resultante (raiz quadrada da soma dos quadrados – *Square Root Sum of Squares*).

3.1.3 Tensões devido aos deslocamentos estruturais

As ondas em alto mar possuem comprimentos da ordem do comprimento da própria embarcação, fazendo com que o navio passe por situações nas quais a sua estrutura não se encontre uniformemente apoiada pelas forças de empuxo. Quando sua meia nau passa pela crista, ou pelo cavado, de uma dessas ondas, surgem grandes momentos fletores ao longo de

sua estrutura, momentos de tosamento e alquebramento, que geram cargas significativas nos chapeamentos do fundo e do convés. Nos projetos de engenharia, estas condições são denominadas *sagging* e *hogging*, respectivamente (ALVES, 2015).

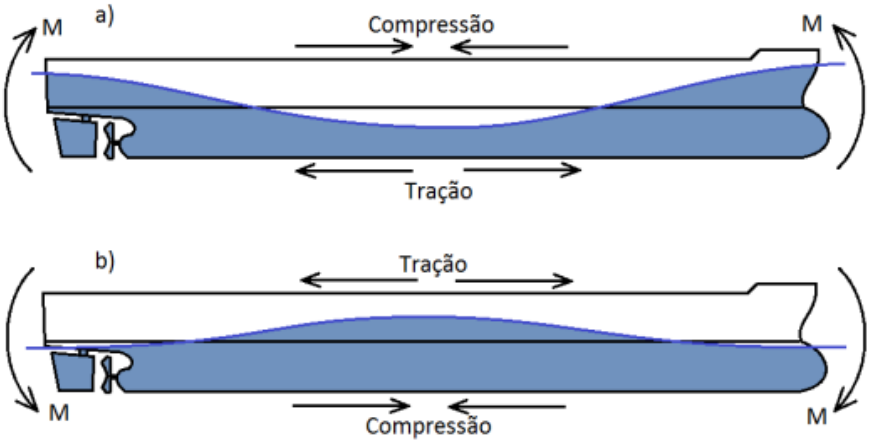


Fig. 15 Navio submetido às condições de *tosamento* (a) e alquebramento (b), devido à passagem de uma onda (MENDONÇA, 2016).

Os deslocamentos da estrutura do navio devido aos movimentos de *sagging* e *hogging* serão transmitidos para todos os módulos, e também, para a estrutura de sustentação das variadas tubulações que são interligadas aos módulos da plataforma. Quanto menos rígidos forem os módulos da plataforma, maiores serão os deslocamentos relativos presentes naquele determinado módulo. Esta fonte de fadiga corresponde a um regime de alto ciclo de repetições (HCF – *High Cycle Fatigue*).

3.1.3.1 Consideração de Fatores de Altura de Onda

Sobre a aplicação de fatores para adequação dos níveis de deslocamentos e acelerações da estrutura do FPSO em relação às diferentes alturas de onda, pressupõe-se um comportamento linear entre a altura das ondas e as diferentes solicitações e carregamentos provocadas por estas na estrutura do FPSO. Estes deslocamentos e acelerações são impostos às tubulações para fins de análise de tensões e fadiga. Conforme já observado no item 2.9 desta dissertação, sobre a revisão do documento ABS – *Spectral-based fatigue analysis for* FPSO *installations* (2018), a análise espectral da fadiga baseia-se na linearidade presumida das cargas induzidas pelas ondas em relação às próprias ondas. Esta suposição é aplicável para instalações *offshore*, como FPSOs e FSOs.

O apêndice W da norma ASME B31.3 (2018) também considera que as tensões causadas pela ação das ondas são proporcionais à altura das ondas. Deve-se ressaltar, entretanto, que o período da onda varia com sua altura, conforme pode ser observado, por exemplo, na Tabela 18 extraída do *Metocean Data*. Consequentemente, as relações entre ondas de alturas diferentes e de períodos distintos, com as acelerações e os deslocamentos estruturais do FPSO, podem ser não-lineares, sendo esta relação dependente do RAO do FPSO. Para fins de ilustração deste conceito, a Figura 16 apresenta RAOs de *roll* e *pitch* para FPSOs com diferentes tipos de cascos, onde nota-se que as amplitudes de *roll* e *pitch* dependem não apenas da altura das ondas, mas também do período destas. Desta forma, considera-se que para fins de análise de fadiga, o ideal seria utilizar dados de deslocamentos e acelerações da estrutura do FPSO, obtidos a partir de funções de transferência (RAO) do FPSO em função dos parâmetros das ondas. Na falta destas funções de transferência específicas para deslocamentos e acelerações, considera-se a relação linear entre altura de onda e as tensões causadas pelas acelerações e deslocamentos.

Tabela 18 Distribuição de alturas significativas e períodos de pico de ondas na região central da Bacia de Santos, Metocean Data.

Hs(m)		Tp(s)																		Freq	%	Mean Tp
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
0.0	0.5	1	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	8	0.01	8.24
0.5	1.0	107	113	205	256	273	159	112	74	68	50	41	38	12	4	0	0	0	0	1512	2	7.73
1.0	1.5	15	938	1115	1792	3608	2505	692	373	283	260	108	103	31	11	3	0	2	3	11842	15.64	7.7
1.5	2.0	1	349	3682	3524	4602	6028	2948	1626	993	534	251	174	69	26	18	8	1	2	24836	32.8	8.12
2.0	2.5	0	13	1265	4995	2430	2755	2041	1870	1806	982	523	284	105	32	10	8	2	0	19121	25.25	8.74
2.5	3.0	0	6	109	2114	2404	1040	858	798	879	1021	514	288	108	20	8	6	1	1	10175	13.44	9.27
3.0	3.5	0	1	4	403	1240	856	277	292	294	424	431	280	77	18	8	1	1	1	4608	6.09	9.82
3.5	4.0	0	0	0	43	268	550	189	91	140	141	139	209	75	16	5	1	0	0	1867	2.47	10.45
4.0	4.5	0	0	0	3	31	207	161	48	47	63	68	89	73	17	3	0	0	0	810	1.07	11.16
4.5	5.0	0	0	0	0	4	48	116	48	15	21	41	57	35	19	6	0	0	0	410	0.54	11.75
5.0	5.5	0	0	0	0	0	16	45	60	19	15	16	22	20	7	8	1	0	0	229	0.3	11.88
5.5	6.0	0	0	0	0	0	2	22	44	19	7	6	15	9	0	0	0	0	0	124	0.16	11.5
6.0	6.5	0	0	0	0	0	0	10	18	22	0	3	11	2	0	0	0	0	0	66	0.09	11.55
6.5	7.0	0	0	0	0	0	0	3	12	12	2	0	7	3	0	0	0	0	0	39	0.05	11.99
7.0	7.5	0	0	0	0	0	0	4	4	14	1	0	1	5	0	0	0	0	0	29	0.04	11.99
7.5	8.0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	4	0	0	3	0	0	0	0	0	11	0.01	12.51
8.0	8.5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	9	0.01	12.47
8.5	9.0	0	0	0	0	0	0	1	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0.01	10.82
9.0	9.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0.01	12.88
9.5	10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	16.95
10.0	10.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.5	11.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Freq		124	1420	6380	13131	14862	14168	7482	5371	4616	3527	2141	1580	629	173	69	25	7	7	75712		
%		0.16	1.88	8.43	17.34	19.63	18.71	9.88	7.09	6.1	4.66	2.83	2.09	0.83	0.23	0.09	0.03	0.01	0.01			
Mean Hs		0.86	1.35	1.75	2.07	2.03	2.04	2.2	2.31	2.38	2.49	2.69	2.9	3.14	3.12	3.05	2.43	2.07	1.96			

Fonte: (METOCEAN DATA).

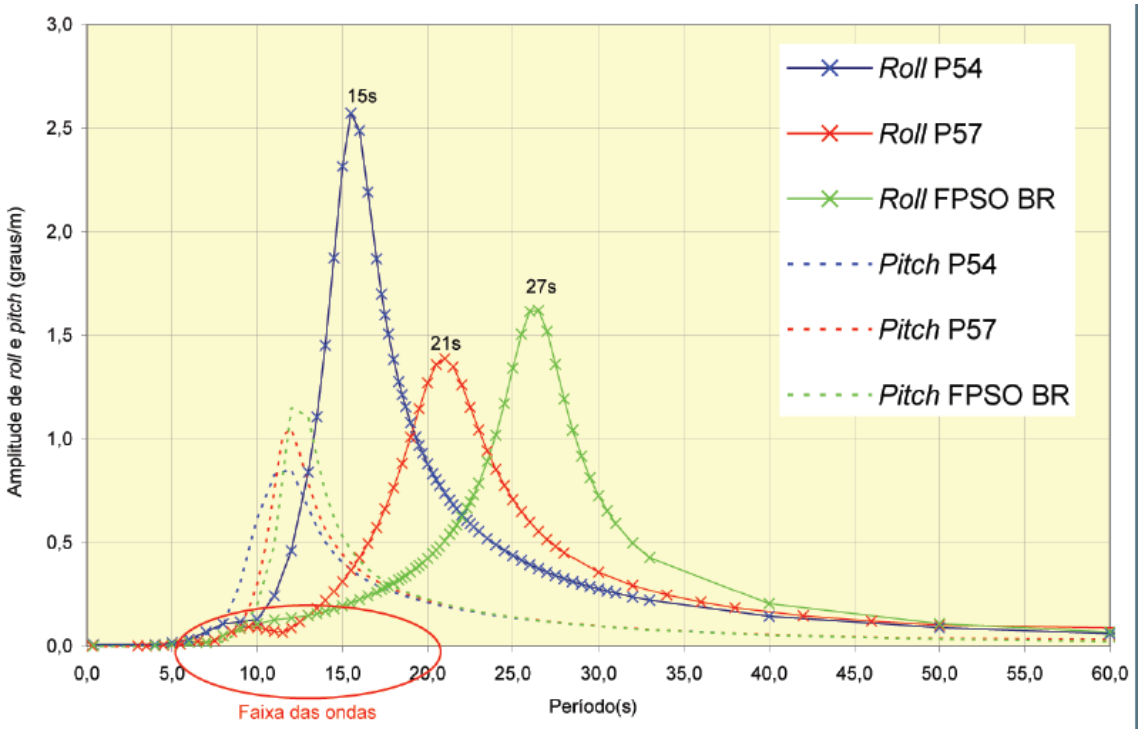


Fig. 16 RAO de *roll* e *pitch* para os cascos FPSO-BR MC, FPSO-BR P57 e FPSO convencional P54 (SENRA, 2011).

Entretanto, devido à complexidade de levantamento de informações, durante a fase do projeto, referente ao comportamento do casco que será utilizado para atender a determinado FPSO, simplificações em relação à definição dos fatores de alturas de onda devem ser feitas, conforme orienta a norma ASME B31.3 (2018) e a norma ABS – *Spectral-based fatigue analysis for* FPSO *installations* (2018). Portanto, na falta de funções de transferência específicas para determinação de tensões devido aos deslocamentos e acelerações do FPSO, considera-se a relação linear entre altura de onda e as tensões causadas pelas acelerações e deslocamentos.

Outro aspecto importante se refere ao deslocamento estático da embarcação. Conforme orienta a norma UKOOA – *FPSO Design Guidance Notes for UKCS Service* (2002), um fator de 0,6 deve ser aplicado aos valores de deslocamentos da viga navio informados pela equipe de estrutura metálica naval. Isso se deve à consideração do efeito da deformação estática que ocorre quando a embarcação se encontra em águas calmas, que geralmente corresponde a cerca de 40% da deformação total calculada pela equipe de estrutura naval.

3.1.3.1.1 Determinação dos Fatores de Altura de Onda

No intuito de determinar a distribuição dos danos a partir da quantidade de ciclos indicada no METOCEAN DATA foi realizado estudo com base nas curvas D e F3 da norma DNV RP C203, uma vez que, de acordo com a Equação 6 e a Tabela 1 apresentadas no Capítulo II desta dissertação, é possível determinar a quantidade de ciclos até a falha para determinada variação de tensão ($\Delta\sigma$).

Conforme já visto, o METOCEAN DATA reúne as informações de alturas e períodos de ondas levantadas em intervalos de 3 horas na região em que a plataforma irá operar, conforme mostrado na Tabela 18.

O número de ciclos de ondas N_n, para cada faixa de altura de onda n, pode ser obtido através da Equação 23:

$$N_n = \left(\frac{3600\,.\,3}{M_{Tp}}\right).\,\mathrm{Freq} \qquad \text{(EQ23)}$$

onde:

M_{Tp} – período médio associado à altura significativa de onda (Hs);

Freq – frequência (Hz).

Uma vez determinado o tempo total correspondente para a quantidade de ciclos obtidos com a Equação 23, é determinada a quantidade de ciclos de repetições das ondas para a vida útil do projeto que é de 25 anos. Para a onda centenária, a altura considerada nesta dissertação foi de 10,25 metros de altura.

Conforme comentado anteriormente a respeito da consideração da linearidade do fator de altura de onda, tanto para o apêndice W da ASME B31.3, quanto para a norma ABS – *Spectral-based fatigue analysis for* FPSO *installations* (2018), o fator de altura de onda deve ser considerado linear e pode ser determinado através da Equação 24.

$$F_n = \frac{H_n}{H_C} \qquad \text{(EQ. 24)}$$

onde:

n – índice n = 1,2,3...

Fn – Fator de altura de onda;

Hn –altura de onda máxima da faixa (n);

HC – altura da onda centenária (10,25 m).

No cálculo dos fatores de altura onda conforme a EQ24, optou-se por utilizar a altura de onda máxima da faixa, ao invés da altura média da faixa, uma vez que desta forma são

obtidos fatores mais elevados, o que favorece a segurança do projeto de tubulações. A Tabela 19 traz os resultados de número de ciclos encontrados para as diferentes alturas de ondas que vão ocorrer ao longo de toda a vida útil da unidade, com base nas informações disponibilizadas no *Metocean Data*, bem como os respectivos fatores de altura de onda.

Tabela 19 Determinação do fator de altura de onda para a Bacia de Santos.

Hs – Altura de onda		MHs – Altura Média por Faixa	Frequência	MTp (s)	Ciclos	Ciclos p/ 1 ano	Ciclos p/ 25 anos	Fator de Altura
0	0,5	0,25	8	8,24	10.485	404	10.110	0,05
0,5	1	0,75	1512	7,73	2.112.497	81.473	2.036.827	0,10
1	1,5	1,25	11842	7,7	16.609.558	640.584	16.014.605	0,15
1,5	2	1,75	24836	8,12	33.033.103	1.273.994	31.849.859	0,20
2	2,5	2,25	19121	8,74	23.627.780	911.257	22.781.434	0,24
2,5	3	2,75	10175	9,27	11.854.369	457.190	11.429.746	0,29
3	3,5	3,25	4608	9,82	5.067.862	195.453	4.886.331	0,34
3,5	4	3,75	1867	10,45	1.929.531	74.417	1.860.415	0,39
4	4,5	4,25	810	11,16	783.871	30.232	755.793	0,44
4,5	5	4,75	410	11,75	376.851	14.534	363.352	0,49
5	5,5	5,25	229	11,88	208.182	8.029	200.725	0,54
5,5	6	5,75	124	11,5	116.452	4.491	112.281	0,59
6	6,5	6,25	66	11,55	61.714	2.380	59.504	0,63
6,5	7	6,75	39	11,99	35.129	1.355	33.871	0,68
7	7,5	7,25	29	11,99	26.122	1.007	25.186	0,73
7,5	8	7,75	11	12,51	9.496	366	9.156	0,78
8	8,5	8,25	9	12,47	7.795	301	7.516	0,83
8,5	9	8,75	10	10,82	9.982	385	9.624	0,88
9	9,5	9,25	4	12,88	3.354	129	3.234	0,93
9,5	10	9,75	2	16,95	1.274	49	1.229	0,98
10	10,25	10,125	0	0	0	0	1	1,00

Fonte: (S/D).

De acordo com o Apêndice W da norma ASME B31.3 (2018), a variação de tensão é proporcional à maior altura de onda.

3.1.3.2 Distribuição do Dano por Fadiga em função da Altura de Onda

Para estudo da distribuição do dano por fadiga em função da altura de onda, determinadas variações de tensões máximas de 20 MPa, 40 MPa, 60 MPa, 80 MPa, 100 MPa e 120 MPa foram consideradas para avaliação da distribuição do dano por fadiga calculadas diretamente a partir das curvas D e F3. A partir destas tensões máximas, que correspondem a tensões hipotéticas na tubulação causadas pela onda de maior altura (H = 10,25 m), as tensões correspondentes às demais alturas de onda foram calculadas utilizando os fatores de altura de

onda da Tabela 19. O dano por fadiga foi calculado considerando o número de ciclos para cada faixa de altura de onda indicado na Tabela 19. O número de ciclos para falha por fadiga, correspondente às tensões de cada faixa de altura onda, foi então determinado a partir das curvas de fadiga D e F3, sendo o dano por fadiga calculado de acordo com a regra de *Palmgren-Miner*. Primeiramente, foram realizadas simulações com o objetivo de identificar o efeito das tensões e da curva de fadiga na distribuição de dano por faixa de altura de onda. A partir dos gráficos das Figuras 17 e 18, obtidos para ondas agrupadas em faixas de 0,5m, verifica-se que a amplitude de variação de tensão tem pouca influência na distribuição do dano para as curvas D e F3. Todos os resultados foram obtidos para curvas com o mesmo agrupamento de altura de onda 0,5 em 0,5 metros. As curvas correspondentes às tensões máximas de 100 e 120 MPa não foram apresentadas no gráfico da Figura 18 por implicarem em dano por fadiga muito superior a 1.

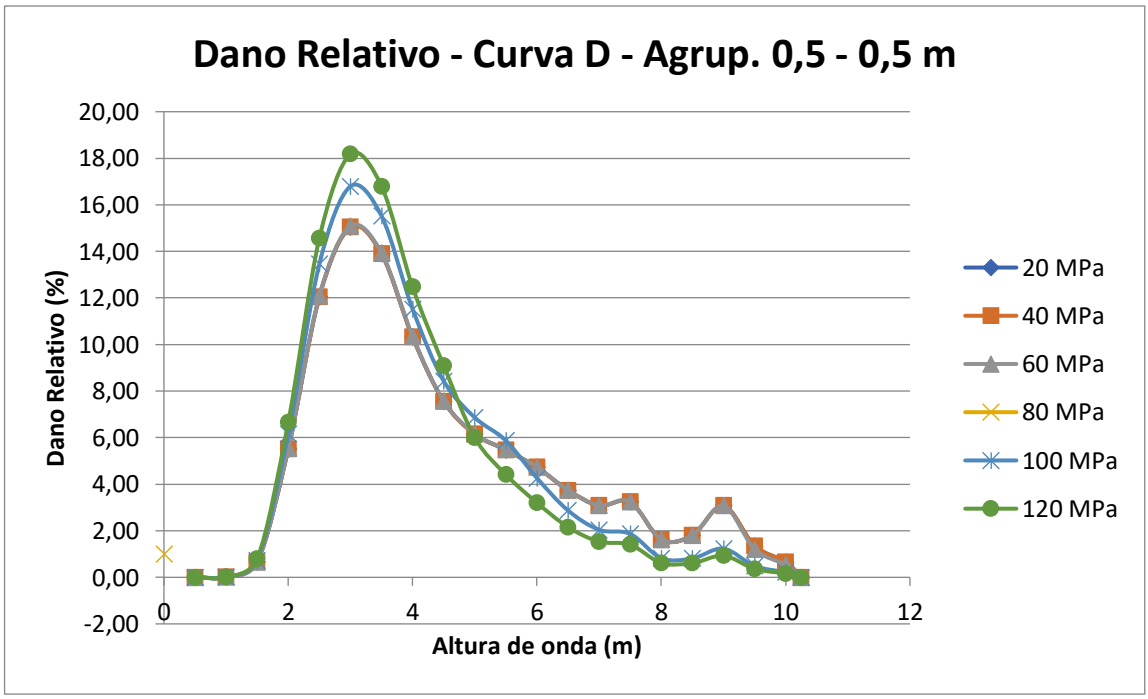


Fig. 17 Gráfico da distribuição do dano para diferentes variações de tensões da curva D.

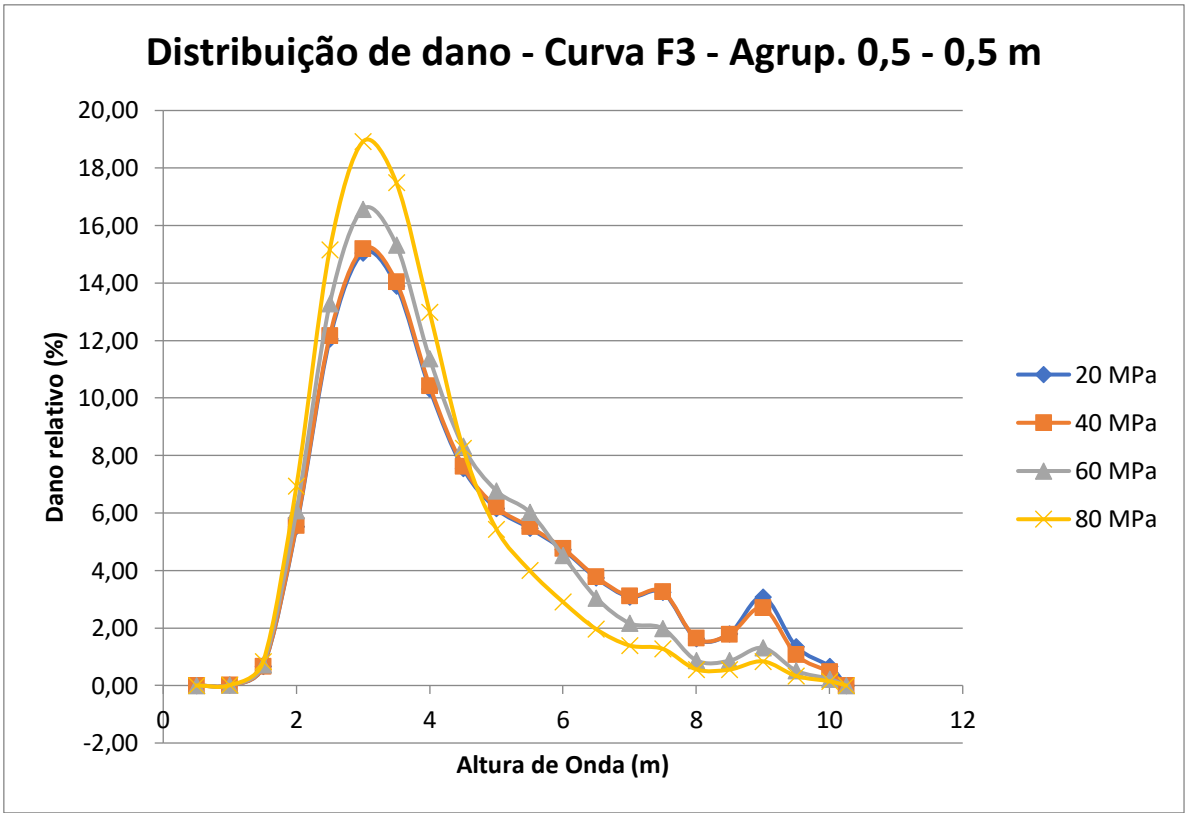


Fig. 18 Gráfico da distribuição do dano para diferentes variações de tensões da curva F3.

O estudo identificou também que a distribuição do dano é bastante semelhante para as curvas F3 e D. Abaixo, a Figura 19 demonstra a distribuição do dano referente às curvas F3 e D da norma DNV RP C203, quando considerado uma mesma variação de tensão máxima de 60 MPa.

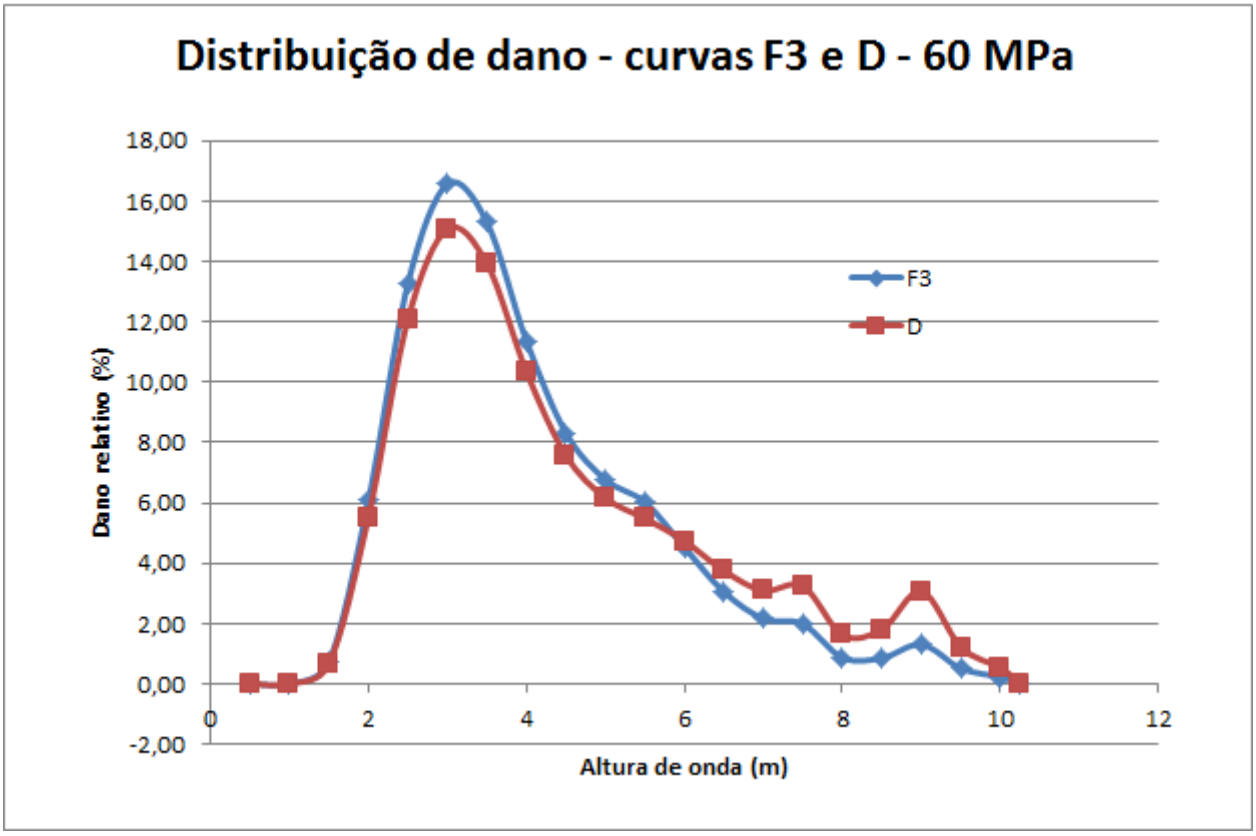


Fig. 19 Gráfico da distribuição do dano para diferentes curvas de fadiga (F3 e D) da DNV RP C-203 para $\Delta\sigma$ = 60 MPa.

De acordo com o gráfico da Figura 18, a maior concentração de dano ocorre nas faixas com alturas entre 2 e 5,0 metros com ciclos de repetições bastante significativos, conforme pode ser constatado na Tabela 19. Os estudos de caso apresentados no Capítulo V desta dissertação apresentam a distribuição do dano por faixa de altura de onda de variados sistemas de tubulações, nos quais os resultados encontrados confirmam o que foi obtido neste gráfico através de cálculos.

Um fator determinante em relação à distribuição do dano por fadiga é o agrupamento das faixas de altura de onda. Quanto maior a quantidade de faixa de menores intervalos de alturas, mais refinados serão os resultados obtidos. Na Figura 20, são apresentados resultados de distribuição de dano para diferentes agrupamentos de alturas de onda.

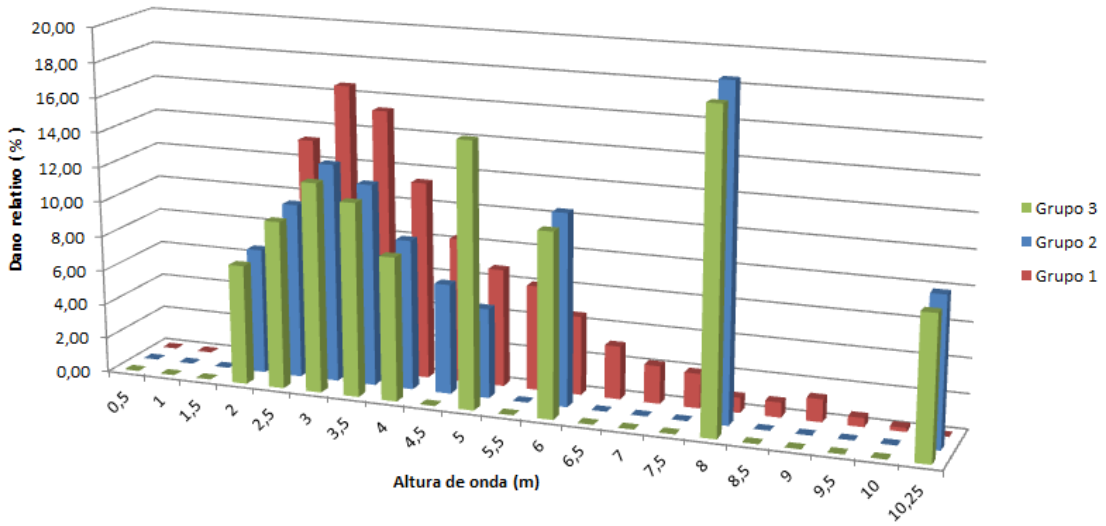


Fig. 20 Distribuição do dano para diferentes agrupamentos de alturas de onda.

As barras de cor vermelha na Figura 20 representam o agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metros, sendo este agrupamento o de maior refinamento quanto à identificação dos danos. Um menor agrupamento de alturas de ondas para as faixas de alturas mais elevadas (conforme representado pelas barras nas cores verde e azul a partir de 6 metros) acarreta em uma distribuição de dano bem divergente, se comparada à distribuição dada pelas barras vermelhas.

As Tabelas 20, 21 e 22 apresentam a distribuição do dano para os três diferentes agrupamentos de altura de onda em ordem do maior refinamento para o menor refinamento (Grupo 1, Grupo 2 e Grupo 3), demonstrados na Figura 20.

Tabela 20 Fator de altura de onda para o Grupo 1.

Hs – Altura de onda		MHs – Altura Média por Faixa	Ciclos	Fator de Altura	Dano Relativo (%)
0	0,5	0,25	10.485	0,05	0,00
0,5	1	0,75	2.112.497	0,10	0,01
1	1,5	1,25	16.609.558	0,15	0,66
1,5	2	1,75	33.033.103	0,20	5,52
2	2,5	2,25	23.627.780	0,24	12,05
2,5	3	2,75	11.854.369	0,29	15,04
3	3,5	3,25	5.067.862	0,34	13,90
3,5	4	3,75	1.929.531	0,39	10,32
4	4,5	4,25	783.871	0,44	7,55
4,5	5	4,75	376.851	0,49	6,15
5	5,5	5,25	208.182	0,54	5,47

Hs – Altura de onda		MHs – Altura Média por Faixa	Ciclos	Fator de Altura	Dano Relativo (%)
5,5	6	5,75	116.452	0,59	4,73
6	6,5	6,25	61.714	0,63	3,74
6,5	7	6,75	35.129	0,68	3,08
7	7,5	7,25	26.122	0,73	3,24
7,5	8	7,75	9.496	0,78	1,63
8	8,5	8,25	7.795	0,83	1,81
8,5	9	8,75	9.982	0,88	3,08
9	9,5	9,25	3.354	0,93	1,36
9,5	10	9,75	1.274	0,98	0,67
10	10,25	10,125	1	1,00	0,00

Tabela 21 Fator de altura de onda para o Grupo 2.

Hs – Altura de onda		MHs – Altura Média por Faixa	Ciclos	Fator de Altura	Dano Relativo (%)
0	2,0	1,0	49.911.401	0,20	7,0
2,0	2,5	2,25	22.781.434	0,24	9,8
2,5	3,0	2,75	11.429.746	0,29	12,3
3,0	3,5	3,25	4.886.331	0,34	11,3
3,5	4,0	3,75	1.860.415	0,39	8,4
4,0	4,5	4,25	755.793	0,44	6,2
4,5	5,0	4,75	363.352	0,49	5,0
5,0	6,0	5,5	313.006	0,59	10,7
6,0	8,0	7,0	127.717	0,78	18,5
8,0	10,25	9,12	21.603	1,00	10,8

Tabela 22 Fator de altura de onda para o Grupo 3.

Hs – Altura de onda		MHs – Altura Média por Faixa	Ciclos	Fator de Altura	Dano Relativo (%)
0	2,0	1,0	49.911.401	0,20	6,8
2,0	2,5	2,25	22.781.434	0,24	9,4
2,5	3,0	2,75	11.429.746	0,29	11,8
3,0	3,5	3,25	4.886.331	0,34	10,9
3,5	4,0	3,75	1.860.415	0,39	8,1
4	5,0	4,5	1.119.145	0,49	14,8
5	6,0	5,5	313.006	0,59	10,3
6	8,0	7,0	127.717	0,78	17,7
8	10,25	9,12	21.603	1,00	10,3

A Figura 21 demonstra o dano total obtido para cada um dos três agrupamentos informados anteriormente para a curva F3 da norma DNV RP C203. Observa-se que, de acordo com o grau de refinamento do agrupamento das alturas de ondas, os resultados obtidos de dano são mais precisos. O Grupo 1 representa o agrupamento mais refinado (de 0,5 em 0,5 metros), enquanto o Grupo 3 representa o agrupamento menos refinado. A variação do dano total encontrada entre estes dois agrupamentos é de 0,12 para uma variação de tensão de 80 MPa.

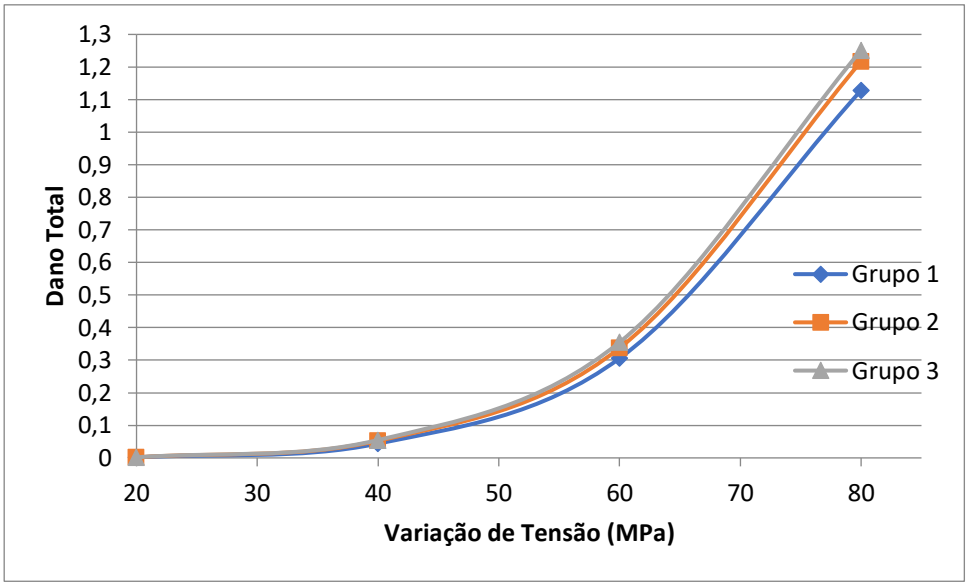


Fig. 21 Dano total para três diferentes agrupamentos de alturas de onda para a curva F3 da DNV RP C203, em função da tensão produzida pela onda centenária.

Para a curva D da norma DNV RP C203, a variação é menos significativa conforme demonstra a Figura 22 para os mesmos agrupamentos considerados no estudo anterior.

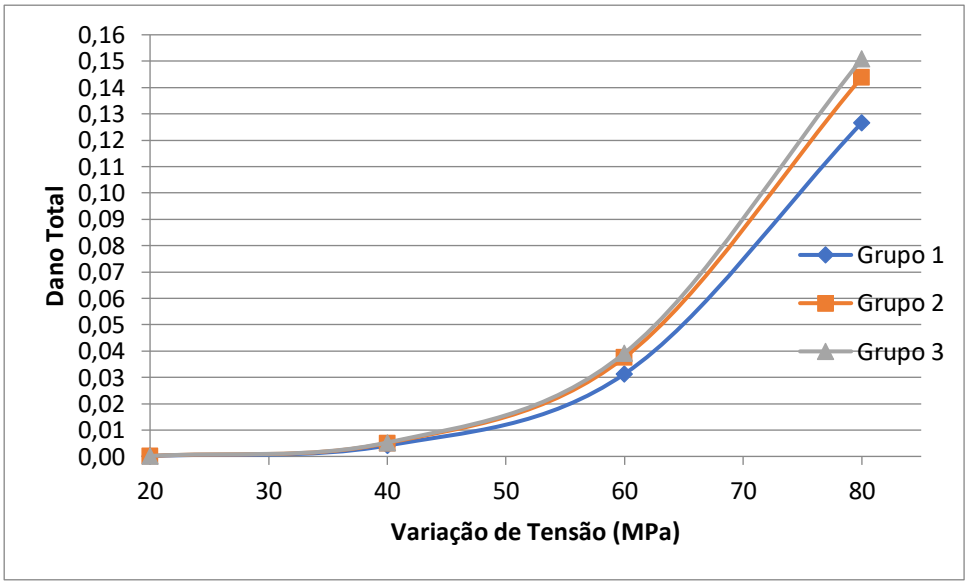


Fig. 22 Dano total para três diferentes agrupamentos para a curva D da DNV RP C203.

A Figura 23 demonstra um comparativo do dano previsto pelas curvas F3 e D em função da variação de tensão para o agrupamento mais refinado representado pelo Grupo 1 (de 0,5 em 0,5 metros).

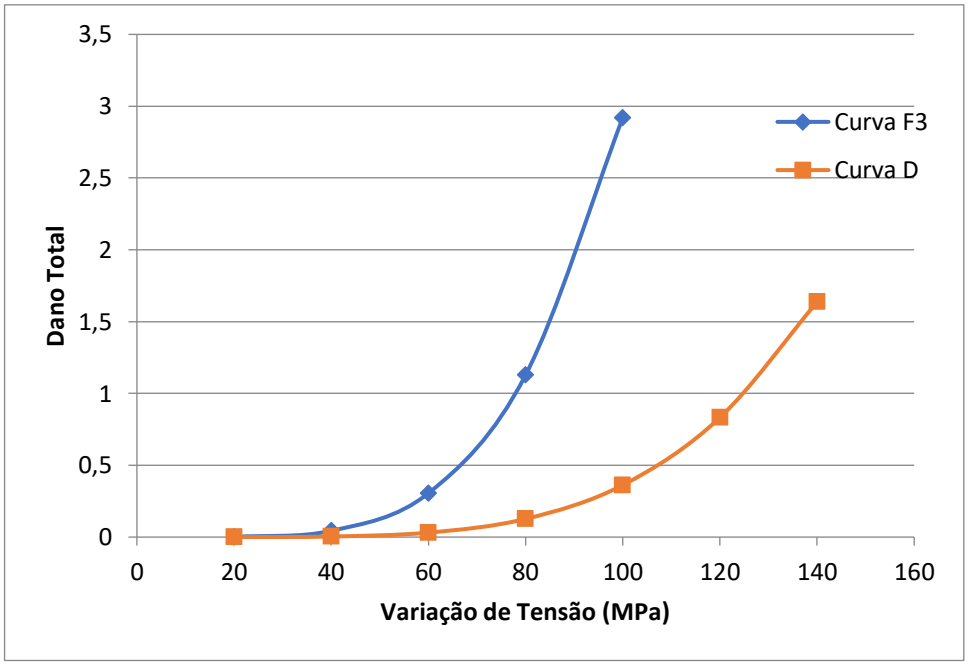


Fig. 23 Comparativo de dano total entre a curva F3 e D da DNV RP C203 para agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metros.

É notório que o acréscimo da quantidade de faixas de altura de ondas implica diretamente na quantidade de casos de carregamento a ser considerado na análise de flexibilidade, o que não é tão desejável. Entretanto, a obtenção de um resultado de dano superdimensionado, implicando em uma desnecessária alteração de arranjo da tubulação e, consequentemente, maiores custos e horas de projeto, bem como material e acréscimo de peso, é ainda menos desejável.

A partir dos estudos apresentados nesta seção, será proposto um agrupamento de alturas de ondas no Capítulo VI desta dissertação.

3.1.4 Tensões devido ao armazenamento e descarregamento da plataforma

Conforme informado no capítulo II desta dissertação, de acordo com o guia ABS *Spectral-Based Fatigue Analysis for FPSO Installations* (2018), plataformas *offshore* estão submetidas a fontes de carregamentos cíclicos que são as operações de carga e descarga

frequentes do óleo produzido para navios chamados aliviadores. Estas variações de carregamento podem induzir grandes faixas de tensão na viga navio e tensão secundária.

Apesar disto, concluiu-se que, devido à pouca repetibilidade destas operações, sendo de aproximadamente 10 ciclos por mês para as unidades de mais intensa produção localizadas nos campos do pré-sal, totalizando ao longo de toda a vida útil da plataforma a quantidade de 2400 ciclos, e, principalmente, devido à dificuldade de obtenção das informações do comportamento da viga navio para estas operações, esta fonte de fadiga não foi contemplada nos casos de carregamento da proposta de procedimento padrão de análise de fadiga, apresentada no Capítulo VI desta dissertação.

Entretanto, é importante uma investigação da disciplina de Naval nesse sentido para que esta fonte possa ser considerada no estudo de fadiga das tubulações *offshore*, obtendo desta forma, resultados mais precisos de dano por fadiga, com a possibilidade de redução de determinados conservadorismos contidos nos procedimentos de projeto, já que uma avaliação ainda mais detalhada está sendo executada.

CAPÍTULO IV

4.1 NOVOS FATORES DE FLEXIBILIDADE E INTENSIFICAÇÃO DE TENSÃO DA ASME B31.J

Para a avaliação das tensões e consideração da flexibilidade de acessórios de tubulações, tais como curvas e derivações, por exemplo, são considerados os fatores intensificadores de tensão e flexibilidade especificados pelos códigos de projeto. Os fatores intensificadores de tensão são denominados pela abreviatura “SIF” (s*tress intensification factor*), enquanto que os fatores de flexibilidade são denominados pela letra “k” (*flexibility factor*). A análise de sistemas de tubulações possui uma limitação da relação D/t, que deve ser respeitada conforme a seguir:

$$\frac{D}{t} \leq 100 \qquad \text{(EQ25)}$$

onde:

D – diâmetro do tubo;

t – espessura da parede do tubo.

Para relações maiores que esta, os fatores de intensificação de tensão e flexibilidade não são validados pelos códigos, sendo assim, é necessária uma análise mais refinada através de elementos finitos para a obtenção de resultados confiáveis. Entretanto, para projetos de unidades *offshore*, a relação D/t ≤ 100 dificilmente é superada.

A norma ASME B31.J publicada em 2017 traz uma revisão dos cálculos dos fatores intensificadores de tensões e de flexibilidade, com base em novos experimentos, os quais podem apresentar diferenças significativas em relação aos fatores do apêndice D da ASME B31.3.

Para acessórios tipo curva, não há alteração dos fatores de flexibilidade e intensificadores de tensão entre as normas ASME B31.3 e ASME B31.J, conforme pode ser observado na comparação entre as Figuras 24 e 25.

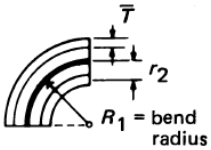
Description	Flexibility Factor, k	Stress Intensification Factor [Notes (1), (2)] Out-of-Plane, i_o	Stress Intensification Factor [Notes (1), (2)] In-Plane, i_i	Flexibility Characteristic, h	Sketch
Welding elbow or pipe bend [Notes (1), (3)–(6)]	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.75}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	

Fig. 24 Equações para obtenção dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade de uma curva forjada (ASME B31.3, 2018). Fonte: (S/D).

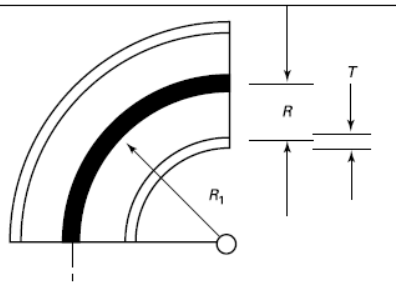
Term	Equation	Sketch
1.1 Pipe Bend or Welding Elbow Meeting ASME B16.9 [Notes (1), (2), (3), (4)]		
Flexibility characteristic, h	TR_1/R^2	
Flexibility factor in plane, k_i	$1.65/h$	
Flexibility factor out of plane, k_o	$1.65/h$	
SIF in plane, i_i	$0.9h^{2/3}$	
SIF out of plane, i_o	$0.75h^{2/3}$	
SIF torsional, i_t	1	

Fig. 25 Equações para obtenção dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade de uma curva forjada. Fonte: (ASME B31.J, 2017).

A orientação dos planos para as duas normas é igual e disposta para a curva conforme a Figura 26.

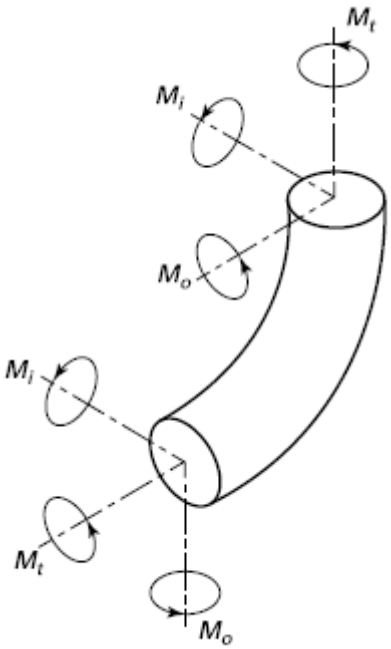


Fig. 26 Orientação dos planos para a curva. Fonte: (ASME B31.3, 2018).

A equação do SIF no plano (i_i) e SIF fora do plano (i_o) da ASME B31.J demonstrada na Figura 4.2 foi publicada de maneira incorreta. Este equívoco pôde ser constatado a partir do gráfico que relaciona estes fatores com o parâmetro “h” (flexibilidade característica) da conexão, conforme demonstrado na Figura 27.

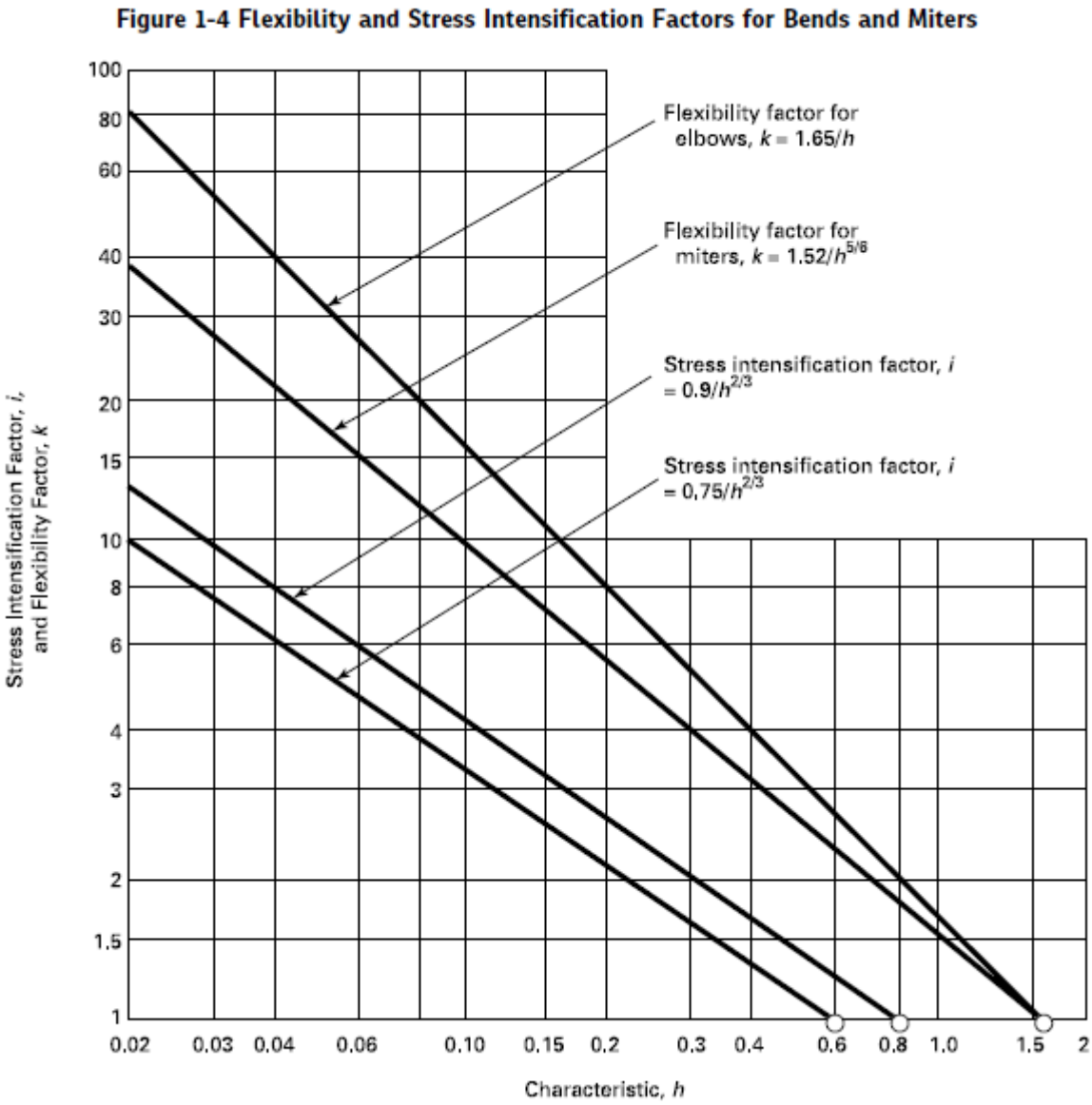


Fig. 27 Gráfico dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade. Fonte: (ASME B31.3, 2018).

Para fins de demonstração, é apresentado a seguir um comparativo de cálculo de fatores de flexibilidade e intensificação de tensões para a conexão do tipo "tê" forjado conforme a norma de fabricação ASME B16.9, segundo o apêndice D da ASME B31.3, e, segundo os novos fatores da norma ASME B31J. As dimensões da conexão estão informadas na Tabela 23.

Tabela 23 Dimensional da conexão.

Linha	Diâmetro	Espessura
Tronco	10"	9,27 mm
Derivação	10"	9,27 mm

De acordo com as Figuras 28 e 29, verifica-se a diferente abordagem trazida pelas duas normas em relação aos fatores da conexão tomada de exemplo. A ASME B31.3 não faz

distinção entre o tramo da linha tronco e da derivação. Entretanto, a nota (b) desta mesma norma faz uma ressalva de que, para cálculo dos fatores da derivação, a norma ASME B31.J deverá ser consultada.

(18) **Table D300 Flexibility Factor, *k*, and Stress Intensification Factor, *i***

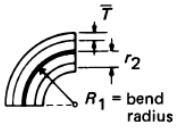
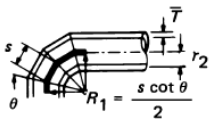
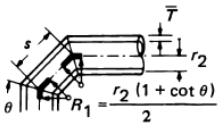
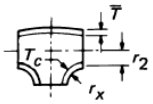
Description	Flexibility Factor, k	Stress Intensification Factor [Notes (1), (2)] Out-of-Plane, i_o	In-Plane, i_i	Flexibility Characteristic, h	Sketch
Welding elbow or pipe bend [Notes (1), (3)–(6)]	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.75}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	
Closely spaced miter bend $s < r_2\ (1 + \tan\theta)$ [Notes (1), (3), (4), (6)]	$\frac{1.52}{h^{5/6}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\cot\theta}{2}\left(\frac{s\bar{T}}{r_2^2}\right)$	
Single miter bend or widely spaced miter bend $s \geq r_2\ (1 + \tan\theta)$ [Notes (1), (3), (6)]	$\frac{1.52}{h^{5/6}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{1 + \cot\theta}{2}\left(\frac{\bar{T}}{r_2}\right)$	
Welding tee in accordance with ASME B16.9 [Notes (1), (3), (5), (7), (8)]	1	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{3}{4}i_o + \frac{1}{4}$	$3.1\frac{\bar{T}}{r_2}$	

Fig. 28 Equações para determinação dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade (ASME B31.3, 2018).

Table 1-1 Flexibility and Stress Intensification Factors (Cont'd)

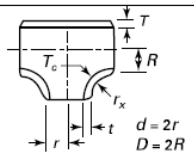
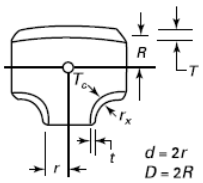
Term	Equation	Sketch
2.1 Welding Tee Meeting ASME B16.9 [Notes (1), (6), (7)]		
Run in-plane flexibility factor, k_{ir}	$0.18(R/T)^{0.8}\ (d/D)^{5}$	
Run out-of-plane flexibility factor, k_{or}	1	
Run torsional flexibility factor, k_{tr}	$0.08(R/T)^{0.91}\ (d/D)^{5.7}$	
Branch in-plane flexibility factor, k_{ib}	$[1.91(d/D) - 4.32(d/D)^2 + 2.7(d/D)^3](R/T)^{0.77}\ (d/D)^{0.47}\ (t/T)$	
Branch out-of-plane flexibility factor, k_{ob}	$[0.34(d/D) - 0.49(d/D)^2 + 0.18(d/D)^3](R/T)^{1.46}\ (t/T)$	
Branch torsional flexibility factor, k_{tb}	$[1.08(d/D) - 2.44(d/D)^2 + 1.52(d/D)^3](R/T)^{0.77}\ (d/D)^{1.61}\ (t/T)$	
Run SIF in plane, i_{ir}	$0.98(R/T)^{0.35}\ (d/D)^{0.72}\ (t/T)^{-0.52}$	
Run SIF out of plane, i_{or}	$0.61(R/T)^{0.29}\ (d/D)^{1.95}\ (t/T)^{-0.53}$	
Run SIF torsional, i_{tr}	$0.34(R/T)^{2/3}\ (d/D)(t/T)^{-0.5}$	
Branch SIF in plane, i_{ib}	$0.33(R/T)^{2/3}\ (d/D)^{0.18}\ (t/T)^{0.7}$	
Branch SIF out of plane, i_{ob}	$0.42(R/T)^{2/3}\ (d/D)^{0.37}\ (t/T)^{0.37}$	
Branch SIF torsional, i_{tb}	$0.42(R/T)^{2/3}\ (d/D)^{1.1}\ (t/T)^{1.1}$	

Fig. 29 Equações para determinação dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade. Fonte: (ASME B31.J, 2017).

De acordo com o a Figura 30 verifica-se os fatores encontrados baseados em cada norma e suas variações.

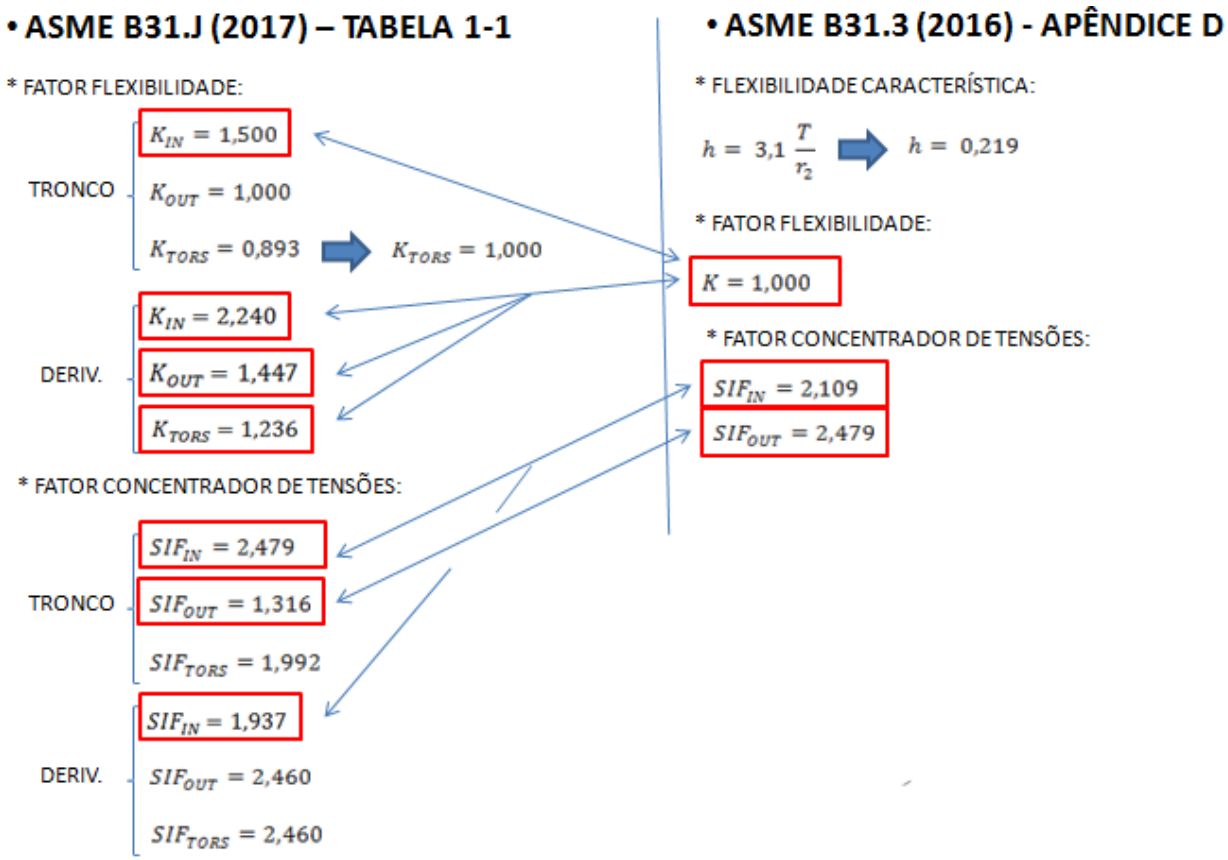


Fig. 30 Comparativo - Fatores intensificadores de tensões e flexibilidade (ASME B31.J x ASME B31.3).

Observa-se que para o componente avaliado, há uma alteração de resultados, tanto para o fator flexibilidade, quanto para o fator intensificador de tensões. Importante ressaltar que esta variação irá influenciar em maiores ou menores níveis de tensões nos sistemas de tubulações, o que consequentemente irá implicar em maiores ou menores danos devido ao processo de fadiga.

Segundo a ASME B31.3 (2018), o calculista pode usar os fatores de intensificação de tensão e os fatores de flexibilidade mais aplicáveis da norma ASME B31J em vez dos fatores mencionados no apêndice D da ASME B31.3 (2018), sendo incentivado a fazê-lo quando:

- $S_F > 0{,}5\ S_A$;
- ciclos significativos de tensão estiverem presentes no sistema avaliado.

Lembrando que:

$$S_F = S \cdot E \cdot W \qquad \text{(EQ26)}$$

onde:

S – tensão atuante;

E – fator de qualidade da junta soldada retirada da Tabela 2 ou 3 da ASME B31.3;

W – eficiência da junta conforme descrito no parágrafo 302.3.2 da ASME B31.3.

Este assunto está diretamente relacionado aos resultados do processo de fadiga presentes na tubulação. Um estudo de caso que aborda esta questão foi elaborado e é apresentado no Capítulo VI desta dissertação.

A fim de simplificar o retrabalho, a empresa detentora do software CAESAR II disponibiliza uma ferramenta que executa a conversão de todos os fatores intensificadores de tensão e de flexibilidade dados pelas normas ASME B31.3 e ASME B31J.

CAPÍTULO V

5.1. ESTUDOS DE CASOS DE PROJETOS À FADIGA DE TUBULAÇÕES *OFFSHORE*

Este capítulo tem como objetivos estudar detalhadamente os procedimentos de projeto à fadiga adotados por diferentes projetistas de tubulações, identificar a contribuição dos diferentes esforços no dano por fadiga de tubulações, bem como estudar os efeitos dos deslocamentos e acelerações do FPSO em sistemas de tubulações com diferentes configurações de *suportação* e arranjo. Também foram avaliados os resultados do emprego dos novos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade da ASME B31.J. Com base nos estudos de caso apresentados neste capítulo, serão propostos procedimentos de projeto com o objetivo de reduzir as tensões devido às acelerações e deslocamentos do FPSO. Os estudos realizados também contribuíram para definição dos casos de carregamento padrão para determinação do dano por fadiga. Deve-se ressaltar que os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de procedimentos e casos de carregamento aplicados por diferentes projetistas na execução do projeto de variados sistemas de tubulações.

5.1.1 Estudo de Caso 1

Este estudo de caso foi dividido em dois sistemas de tubulações, uma vez que trata de tubulações com características semelhantes, mas de diâmetros bem diferentes, onde uma série de comparações é realizada a fim de confrontar os resultados obtidos.

5.1.1.1 Linha do *Flare* (30”) ao longo do *pipe rack*

Este estudo de caso busca identificar isoladamente a magnitude das tensões provenientes das acelerações e dos deslocamentos geradas em sistemas de tubulações *offshore* de projetos de plataformas já executados. Para esta avaliação, foram selecionados arranjos mais solicitados quanto aos deslocamentos do navio e acelerações, percorrendo grandes extensões ao longo do *pipe rack*. A Figura 5.1 mostra o *header* de 30” de diâmetro, fabricado em aço inox A358 316L, com 7,92 mm de espessura de parede, e comprimento de 90 metros, responsável pelo sistema de *flare* da plataforma, ou seja, linha de envio para a queima de todos os gases eliminados em situações de anomalias. Os eixos x, y e z correspondem respectivamente às direções transversal (bombordo – boreste), vertical e longitudinal (popa-proa) do FPSO.

Importante ressaltar que este estudo de caso contempla somente um trecho da linha que se extende ao longo de toda a plataforma.

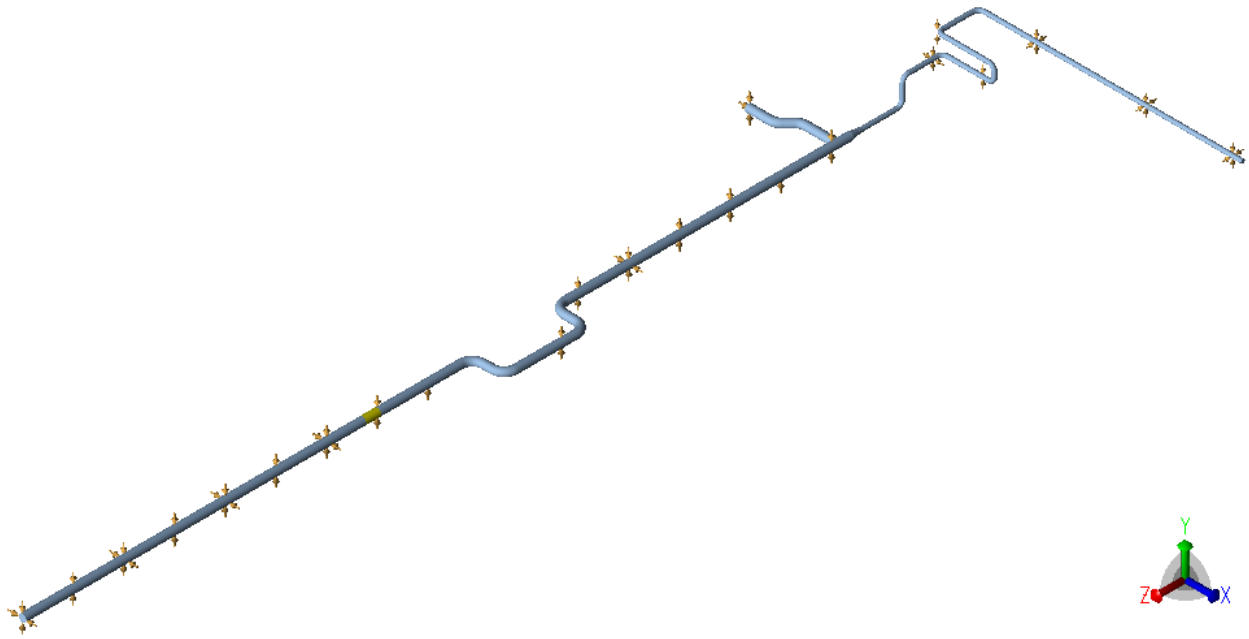


Fig. 31 Arranjo geral da linha do flare extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30". Fonte: (S/D).

Por ser um sistema de *flare*, a linha possui variação de temperatura de projeto da ordem de 310°C, sendo 210°C a temperatura máxima e -100°C de temperatura mínima. Em compensação a classe de pressão é de 150 libras.

A Tabela 24 apresenta os dados de acelerações contidos no *Acceleration Data* para a área/módulo no(s) qual(is) a linha objeto deste estudo se encontra, neste caso, o M-19 que corresponde ao *pipe rack* do FPSO. São informadas as magnitudes das acelerações de *roll*, *pitch* e *heave* da plataforma em termos da aceleração da gravidade.

Tabela 24 Acelerações inerciais para o pipe rack em DOC e DEC.

CONDIÇÃO	ACELERAÇÃO		
	X (g)	Y (g)	Z (g)
DOC	0,200	-0,170	0,075
DEC	0,385	-0,300	0,119

Em geral, a aplicação das acelerações no *software* de análise de flexibilidade ocorre através de vetores U1, U2 e U3, conforme visto no Capítulo III. Entretanto, neste projeto executado, os dados de acelerações foram aplicados pelos projetistas através do vetor U1 que

corresponde à composição das acelerações nos eixos X e Y, e do vetor U2 que corresponde à composição das acelerações nos eixos Y e Z, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 Composição de acelerações (DOC/DEC).

EIXO	VETOR U1 (DOC)	VETOR U2 (DOC)	VETOR U1 (DEC)	VETOR U2 (DEC)
X (g)	0,200	-	0,385	-
Y (g)	-0,170	-0,170	-0,300	-0,300
Z (g)	-	0,075	-	0,119

A íntegra dos casos de carregamento utilizados no projeto executado está apresentada no Apêndice 11.1.1 desta dissertação. Serão aqui comentados somente os casos de carregamento relacionados com os cálculos de dano por fadiga. No que se refere à avaliação da fadiga, foram aplicados fatores em sete faixas de altura de onda somente para os deslocamentos estruturais do FPSO. Os casos de carregamentos do projeto executado correspondentes a cada faixa de altura estão informados na última coluna da Tabela 26. Os casos de carregamentos indicados na última coluna correspondem aos casos de carregamento do Apêndice 11.1.1. A curva de fadiga considerada na análise foi a F3 da norma DNV RP C203.

Tabela 26 - Determinação dos fatores de altura de onda considerados no projeto executado.

FATORES DE ALTURAS CONSIDERADOS NO PROJETO					
FAIXA	**ALTURA DE ONDA MÍN.**	**ALTURA DE ONDA MÁX.**	**MH_S**	**FATOR $\frac{MH_S}{9,75}$**	**CASOS DE CARREGAMENTOS**
1	0,25	0,75	0,75	0,077	L176@L183
2	1,25	1,75	1,75	0,179	L184@L191
3	2,25	2,75	2,75	0,282	L192@L199
4	3,25	3,75	3,75	0,385	L200@L207
5	4,25	4,75	4,75	0,487	L208@L215
6	5,25	5,75	5,75	0,590	L216@L223
7	6,25	9,75	9,75	1,000	L224@L231

As acelerações consideradas foram somente para a condição DOC (*Design Operation Condition*). Além disso, foi adotada a premissa de que os deslocamentos de HOG correspondem a 50% dos deslocamentos de SAG, a qual pode ser confirmada na linha L13 dos casos de carregamentos utilizados no projeto executado, e apresentados no Apêndice 11.1.1 desta dissertação.

Com o objetivo de identificar as tensões isoladamente devido às acelerações e deslocamentos, bem como obter o dano devido somente aos deslocamentos estruturais para

cada faixa de altura de onda, conforme será apresentado na Tabela 31, os casos de carregamentos do projeto executado foram editados de acordo com a Tabela 27.

Tabela 27 Casos de carregamentos editados para determinação das tensões devido às acelerações e deslocamento isoladamente e dano devido somente aos deslocamentos estruturais – Dano à fadiga (Flare).

CASO DE CARREGAMENTO	COMBINAÇÃO	TIPO	Nº CICLOS	DESCRIÇÃO
L9	U1	SUS	-	VETOR ACELERAÇÃO 1
L10	U2	SUS	-	VETOR ACELERAÇÃO 2
L13	D2	EXP	-	DESLOCAMENTO ESTRUTURAL PARA SAG E HOG
L165	MÁX. EXP	EXP	-	MÁXIMA EXPANSÃO TÉRMICA
L167	0.53L13	EXP	-	FAIXAS DE ALTURA DE ONDA
L168	0.077L167	EXP	-	
L169	0.179L167	EXP	-	
L170	0.282L167	EXP	-	
L171	0.385L167	EXP	-	
L172	0.487L167	EXP	-	
L173	0.59L167	EXP	-	
L174	L165	FAT	7000	CICLOS TÉRMICOS
L175	L168	FAT	2046936	CASOS DE FADIGA PARA DETERMINAÇÃO DO DANO SOMENTE PARA OS DESLOCAMENTOS ESTRUTURAIS
L176	L169	FAT	47864464	
L177	L170	FAT	34211180	
L178	L171	FAT	6746746	
L179	L172	FAT	1119145	
L180	L173	FAT	313006	
L181	L167	FAT	149319	
L182	L9	FAT	23112700	CASOS DE FADIGA PARA DETERMINAÇÃO DO DANO SOMENTE PARA ACELERAÇÕES
L183	-L9	FAT	23112700	
L184	L10	FAT	23112700	
L185	-L10	FAT	23112700	

A Tabela 28, indica os níveis de tensões determinadas para cada fonte de fadiga. A última coluna desta tabela faz referência ao caso de carregamento da Tabela 27, considerado para obtenção do resultado encontrado.

Tabela 28 - Tensões devido às acelerações e deslocamentos (*Flare*).

FONTE DE FADIGA		TENSÃO (MPa)	NÓ	CASO DE CARREGAMENTO
ACELERAÇÕES	U1	15,6	17640	L247/L248
	U2	1,0		L249/L250
DESLOCAMENTOS	FAIXA 1	6,0	17640	L240

FONTE DE FADIGA		TENSÃO (MPa)	NÓ	CASO DE CARREGAMENTO
	FAIXA 2	13,9		L241
	FAIXA 3	21,9		L242
	FAIXA 4	29,9		L243
	FAIXA 5	37,8		L244
	FAIXA 6	45,9		L245
	FAIXA 7	77,7		L246

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os pontos nodais mais solicitados quanto às tensões identificadas na Tabela 5.5. O ponto de maior tensão para aceleração, devido principalmente ao movimento de *roll* acontece no nó 17680, em suporte de restrição lateral (tipo guia), nas proximidades do trecho menos restringido lateralmente devido à existência do *looping*, implementado para absorver os deslocamentos axiais ocorridos durante a expansão e contração da tubulação nas temperaturas de 210ºC e -110ºC consideradas no projeto. As tensões no nó 17680, causadas pelas acelerações provenientes do movimento de *roll*, são devido a grande inércia do longo trecho de tubulação que compreende o *looping*, que não possui restrição lateral para não reduzir a flexibilidade da tubulação.

Fig. 32 Destaque para o nó 17680 de maior tensionamento da tubulação para o movimento de *roll* extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30” - *Flare.* Fonte: (S/D).

O nó de maior tensão devido à aceleração *pitch*, ocorre na derivação da conexão tipo tê forjado de 30” x 30”. Isso se deve ao fato desta derivação se interligar perpendicularmente ao

header do *flare*, e estar posicionada a aproximadamente 80 metros da linha média do FPSO. Quanto maior a distância do centro do navio, maior a contribuição da aceleração, neste caso específico, devido principalmente ao movimento de *pitch* e *heave*.

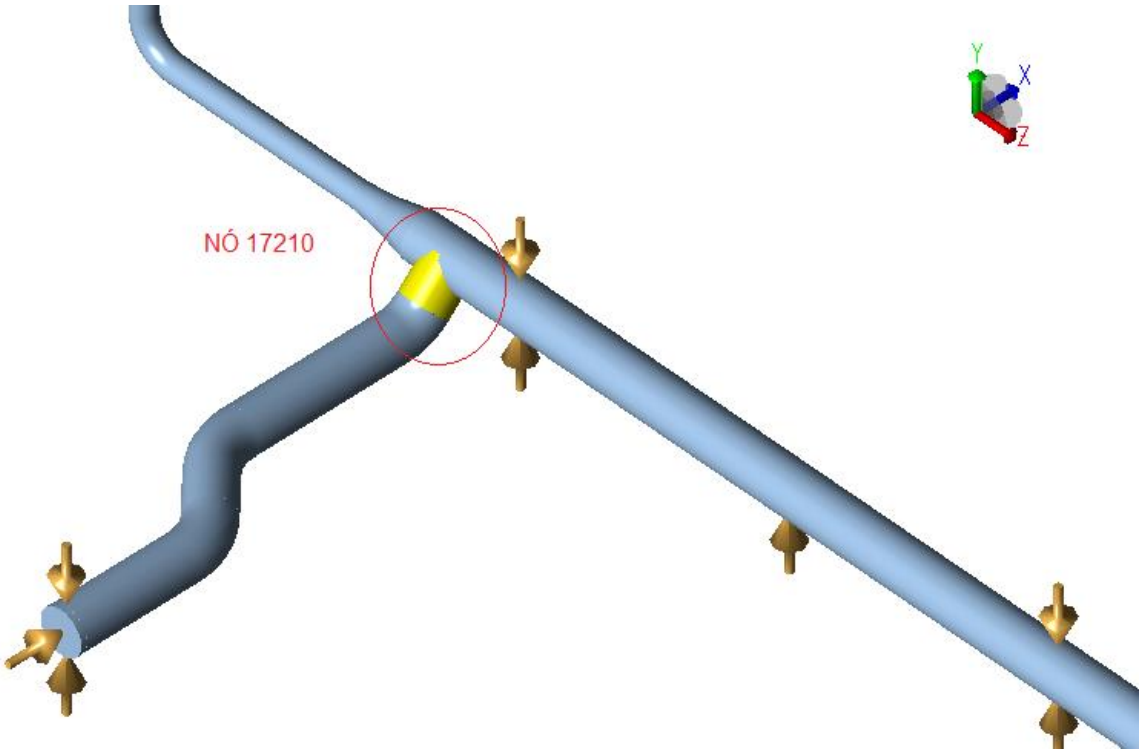


Fig. 33 Destaque para o nó 17210 de maior tensão da tubulação para o movimento de pitch extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30" - Flare. Fonte: (S/D).

A Figura 34 indica a distância aproximada do ponto da derivação, representada pelo nó 17210 na Figura 33, em relação à linha média do navio.

Fig. 34 Cota entre o ponto de derivação da linha do flare e a linha média do navio. Fonte: (S/D).

Para os deslocamentos considerados na análise, o ponto mais solicitado foi a curva do *looping*, considerado no arranjo devido ao fato de estar localizada próximo de trecho com orientações em mais de um eixo, e que nas proximidades há ausência de guias. Entretanto, é importante ressaltar que a ausência de guias ocorre devido à necessidade de não limitação dos deslocamentos da tubulação, uma vez que possui considerável diâmetro e pequeno *offset* (que corresponde ao trecho ortogonal da curva de expansão - *looping*).

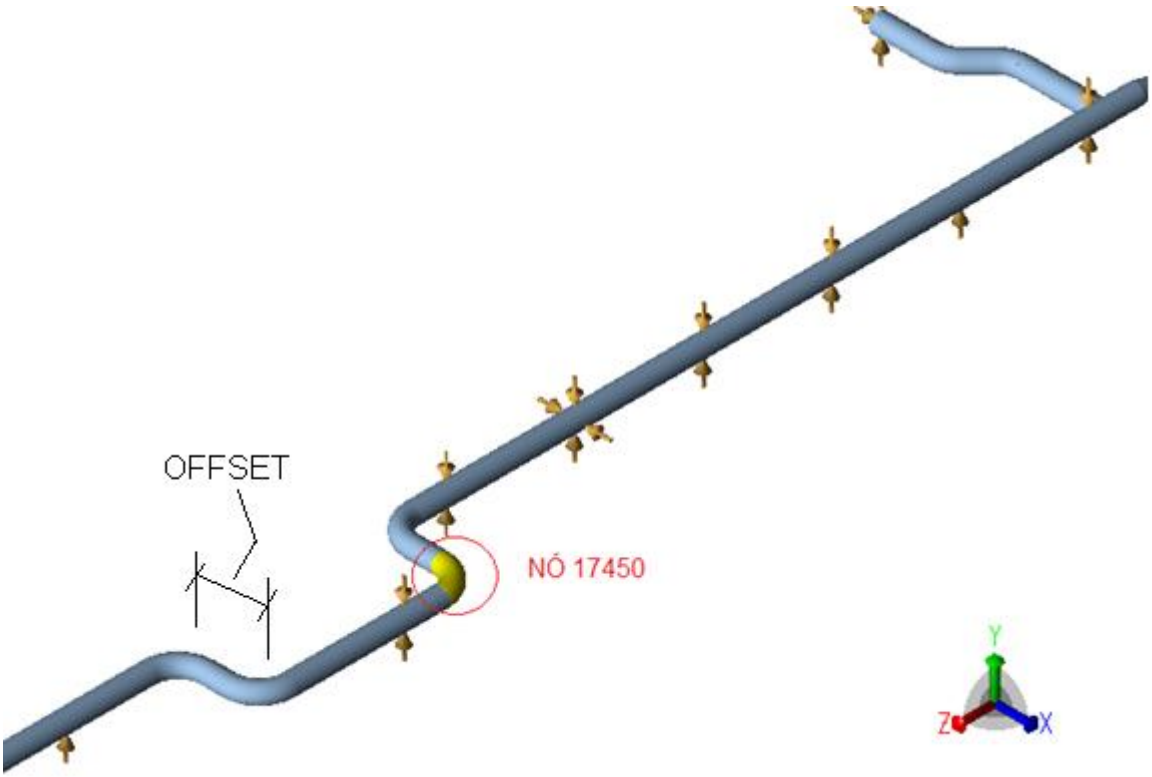


Fig. 35 Destaque para o nó 17450 de maior tensão da tubulação para os deslocamentos estruturais extraído do software CAESAR II – Tubulação de 30” - Flare. Fonte: (S/D).

De acordo com a simulação no *software*, o dano acumulado para as fontes de aceleração e deslocamento encontrado foi de 2,95, tendo ocorrido no nó 17450, conforme identificado na Figura 5.5. As distribuições do dano devido aos deslocamentos para as várias faixas de altura de onda encontram-se apresentadas na Tabela 30.

Importante registrar que neste estudo, a linha do *flare* foi considerada isoladamente. Sendo assim, os valores de danos encontrados neste estudo não representam o dano real determinado no projeto executado, uma vez que a tubulação apresentada possui uma variedade de linhas conectadas que irão influenciar na sua rigidez e no seu comportamento à fadiga. Entretanto, os resultados são válidos no sentido de identificar as maiores influências do processo de fadiga.

5.1.1.2 Linha de 4” ao longo do *pipe rack*

A fim de confrontar os resultados obtidos na seção anterior, novo estudo foi realizado para uma tubulação que também transporta gás com extensão aproximada a da linha do *flare* analisada anteriormente ao longo de todo o *pipe rack*, porém com diâmetro nominal de 4”, fabricada em aço carbono API 5L Grau B, com espessura de 6,02 mm, e comprimento de 125

metros. Os casos de carregamento considerados nesta análise (projeto executado e editado), todas as premissas de projeto, bem como a curva de fadiga considerada, são idênticas às do exemplo anterior. A linha possui temperatura de projeto de 70°C e classe de pressão de 150 libras.

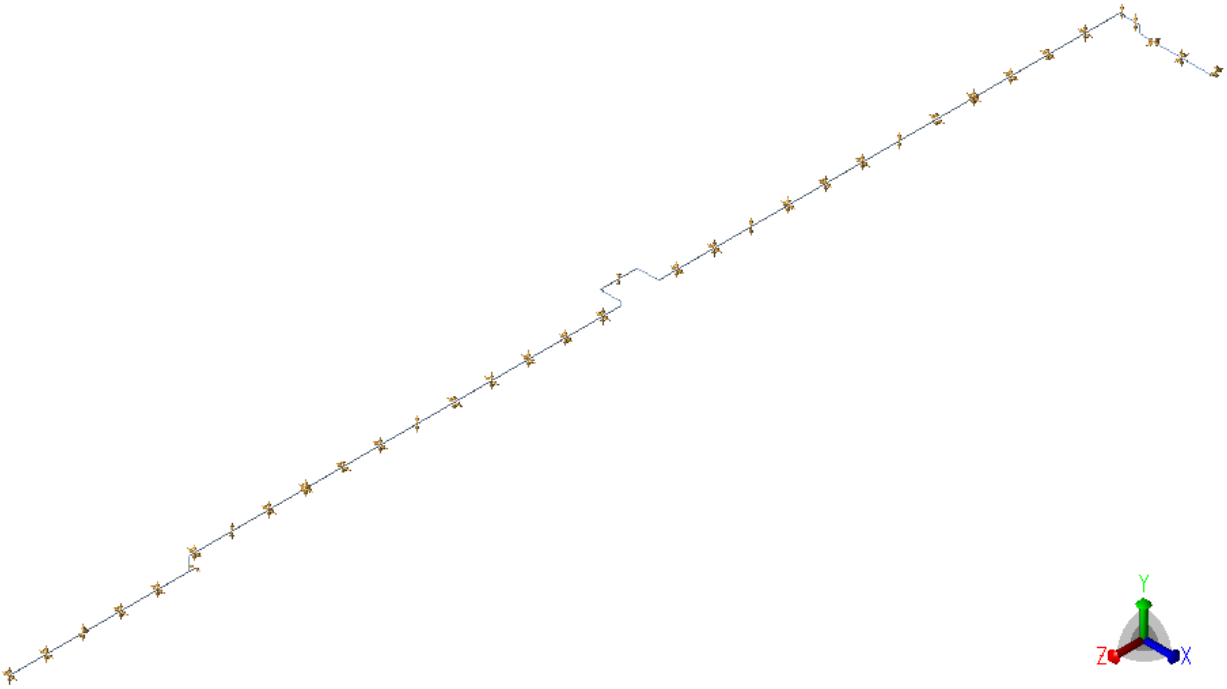


Fig. 36 Arranjo geral da análise extraído do software CAESAR II – Tubulação de 4". Fonte: (S/D).

As tensões identificadas isoladamente para as acelerações e deslocamentos estão informadas na Tabela 29. Os casos de carregamentos indicados na última coluna correspondem aos da Tabela 27.

Tabela 29 Separação das tensões entre acelerações e deslocamentos (Linha 4").

FONTE DE FADIGA		TENSÃO (Mpa)	NÓ	CASO DE CARREGAMENTO
ACELERAÇÕES	U1	9,1	2530	L247/L248
	U2	4,0		L249/L250
DESLOCAMENTOS	FAIXA 1	4,0	2525	L240
	FAIXA 2	9,2		L241
	FAIXA 3	14,5		L242
	FAIXA 4	19,9		L243
	FAIXA 5	25,2		L244
	FAIXA 6	30,5		L245
	FAIXA 7	51,6		L246

Assim como acontece no sistema de *flare* analisado anteriormente, as maiores tensões são encontradas próximo dos trechos desprovidos de guias, como ocorre novamente para o *looping*, e também nas proximidades de trechos de tubulações dispostos em outras direções.

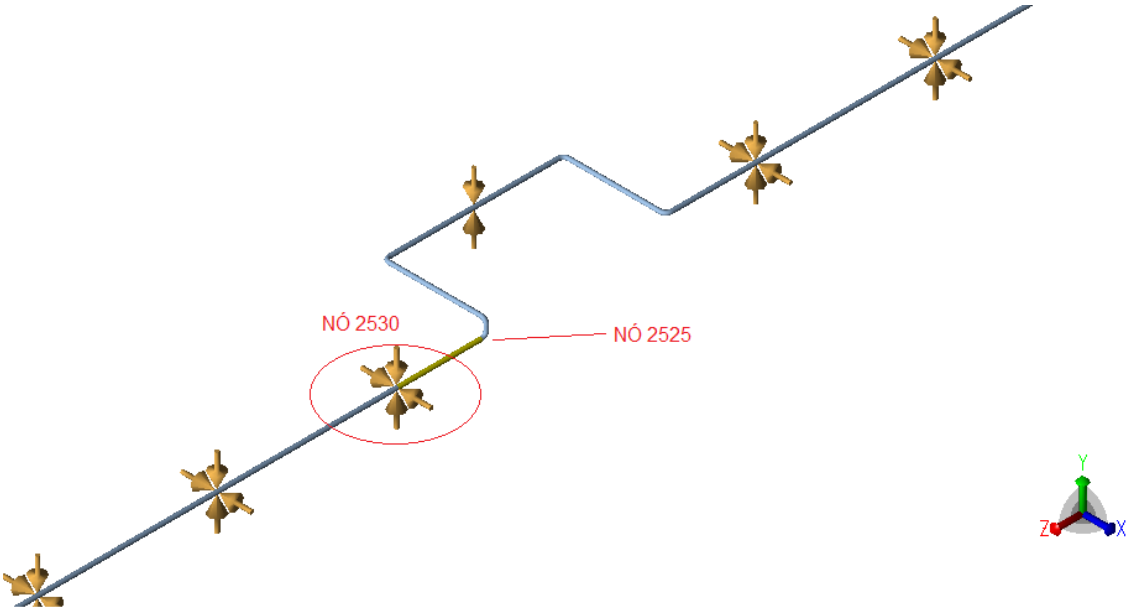


Fig. 37 Destaque para o nó 2525 e 2530 de maior tensionamento da tubulação para os casos de aceleração e deslocamentos estruturais, respectivamente – Tubulação de 4”. Fonte: (S/D).

Observou-se que os dois sistemas de tubulações analisados são mais solicitados para o vetor U1 de aceleração, o qual contempla a aceleração de *roll* do navio, sempre mais intensa do que a de *pitch*.

Além disso, verificou-se que os deslocamentos impostos às tubulações são responsáveis pelas maiores tensões. Como era esperado, observa-se de acordo com as Tabelas 28 e 29, que as tensões possuem maior magnitude quando o sistema é submetido aos deslocamentos gerados pelas maiores alturas de ondas.

Apesar das maiores tensões encontradas para as maiores faixas de altura, a quantidade de repetições destas é menor, o que leva a valores de danos não tão elevados. Na Tabela 30, foi realizado estudo de identificação do dano por faixa de altura de onda considerando as duas fontes de fadiga (aceleração e deslocamentos) combinadas para os dois estudos de caso apresentados anteriormente (linha do *flare* de 30” e linha de 4”). Os casos de carregamentos indicados na última coluna correspondem aos do Apêndice 11.1.2.

Tabela 30 Separação dos danos por faixa de altura de onda para acelerações e deslocamentos.

FAIXA	FATOR	Linha *Flare*		Linha 4”		CASO DE CARREGAMENTO
		DANO	%	DANO	%	
1	0,077	0,01	0,33	0,00	0,00	L176@L183
2	0,179	0,53	17,96	0,05	10,86	L184@L191
3	0,282	1,29	43,72	0,17	36,95	L192@L199
4	0,385	0,61	20,70	0,11	23,91	L200@L207
5	0,487	0,20	6,78	0,05	10,87	L208@L215
6	0,590	0,10	3,38	0,03	6,52	L216@L223
7	1,000	0,21	7,12	0,06	13,04	L224@L231
TOTAL		2,95	-	0,46	-	-

A Tabela 31 mostra os resultados de dano por faixa de altura de onda da simulação realizada no CAESAR II, somente para os deslocamentos. Os casos de carregamentos indicados na última coluna correspondem aos da Tabela 27.

Tabela 31 Separação dos danos por faixa de altura de onda somente devido aos deslocamentos.

FAIXA	FATOR	Linha *Flare*		Linha 4”		CASOS DE CARREGAMENTO
		DANO	%	DANO	%	
1	0,077	0,00	0,00	0,00	0,00	L176
2	0,179	0,07	4,93	0,00	0,00	L177
3	0,282	0,46	32,39	0,06	26,08	L178
4	0,385	0,43	30,28	0,06	26,08	L179
5	0,487	0,17	11,97	0,03	13,04	L180
6	0,590	0,09	6,33	0,02	8,69	L181
7	1,000	0,20	14,08	0,06	26,08	L182
TOTAL		1,42	-	0,23	-	-

Nos dois resultados de dano indicados nas Tabelas 30 e 31, o dano máximo encontrado para a linha de 4” acontece no nó 2525, indicado na Figura 37. Para a linha de *flare*, o dano máximo encontrado nas Tabelas 30 e 31 ocorreu no nó 17450, conforme indicado na Figura 35.

Com o objetivo de validar os resultados acima obtidos no CAESAR II, o cálculo do dano foi realizado com base na curva F3 da DNV RP C203. A partir do *range* de tensão ($\Delta\sigma$) encontrado na análise de flexibilidade para a faixa 7 de altura de onda da ordem de 77,7 MPa para o caso do *flare*, conforme apresentado na Tabela 27, é determinada a distribuição dos danos, supondo uma relação linear entre as tensões na tubulação e a altura de onda, conforme exposto no Capítulo 3 desta dissertação, para o mesmo agrupamento considerado na análise, de acordo com a Tabela 32.

Tabela 32 Cálculo com base na curva F3 para obtenção do dano devido aos deslocamentos – Linha do *flare.*

H_n (m)	Ciclos N_n	Fator Altura de Onda	Δσ (MPa)	Ciclos para falha F3 N	Dano por H_n N_n/ N	Dano por H_n (%)
0,25 a 0,75	2.046.936	0,077	5,99	48.919.935.906	0,00004	0,0
1,25 a 1,75	47.864.464	0,179	13,92	720.566.969	0,06643	4,7
2,25 a 2,75	34.211.180	0,282	21,93	74.249.574	0,46076	32,5
3,25 a 3,75	6.746.746	0,385	29,94	15.654.379	0,43098	30,4
4,25 a 4,75	1.119.145	0,487	37,87	6.471.081	0,17295	12,2
5 a 6	313.006	0,59	45,88	3.639.215	0,08601	6,1
6 a 9,75	149.319	1	77,77	747.418	0,19978	14,1
				TOTAL	1,41694	100,0

Na Figura 5.8, são apresentados resultados de distribuição de dano da linha do *flare* calculados diretamente a partir da curva F3 da DNV RP C203, supondo tensões proporcionais às alturas de onda e utilizando a regra de *Palmgren-Miner*, e para os dados obtidos a partir das simulações no CAESAR II. Observa-se que ao longo de todas as alturas de ondas que a distribuição do dano é a mesma para os dois cenários.

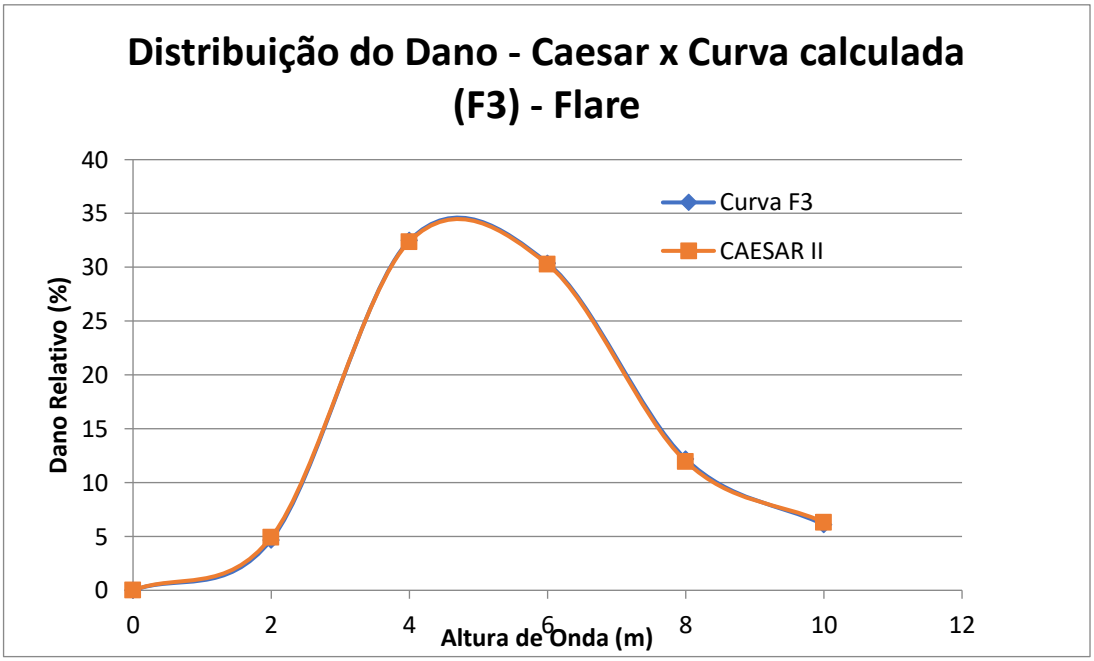


Fig. 38 Distribuição do dano para a linha do flare obtidas de acordo com o CAESAR II e calculada a paritr da curva S-N (F3).

Os resultados da Tabela 33 se referem à linha de 4” de diâmetro. O *range* de tensão de 51,6 MPa foi determinado através do *software* de análise de tensões e informado na Tabela 27.

Tabela 33 Cálculo com base na curva F3 para obtenção do dano devido aos deslocamentos – Linha de 4”.

H_n (m)	Ciclos N_n	Fator Altura de Onda	Δσ (MPa)	Ciclos para falha F3 N	Dano por H_n N_n/ N	Dano por H_n (%)
0,25 a 0,75	2.046.936	0,077	3,97	380.450.243.152	0,00001	0,0
1,25 a 1,75	47.864.464	0,179	9,24	5.603.847.872	0,00854	3,7
2,25 a 2,75	34.211.180	0,282	14,55	577.438.784	0,05925	25,4
3,25 a 3,75	6.746.746	0,385	19,87	121.744.078	0,05542	23,8
4,25 a 4,75	1.119.145	0,487	25,13	37.592.974	0,02977	12,8
5 a 6	313.006	0,59	30,44	14.404.276	0,02173	9,3
6 a 9,75	149.319	1	51,6	2.558.886	0,05835	25,0
				TOTAL	**0,23306**	100,0

Na Figura 39, também são apresentados resultados da distribuição de dano, agora para a linha de 4”, calculados com base na equação da curva S-N (F3), e também, para os dados obtidos no CAESAR II.

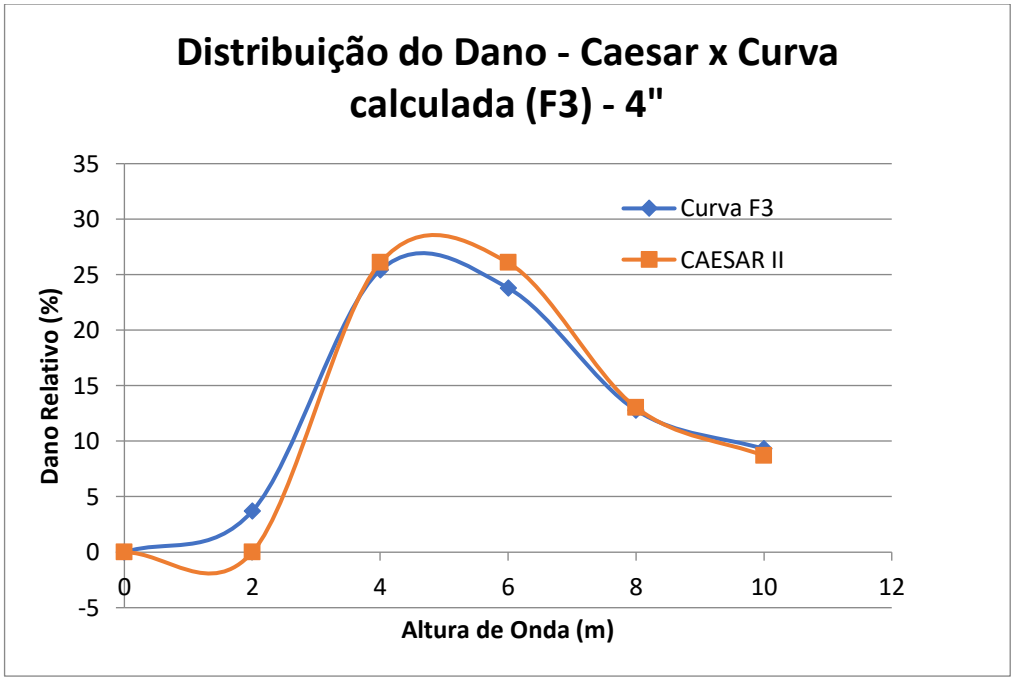


Fig. 39 Distribuição do dano para a linha de 4" obtidas de acordo com o CAESAR II e curva F3.

- Estudo do efeito das fontes de dano agindo isoladamente e combinadas:

Ao buscar a determinação do dano de forma isolada para a aceleração e deslocamentos, verificou-se que os resultados da soma dos danos encontrados quando essas fontes são analisadas isoladamente são muito menores do que os resultados dos danos gerados quando estas fontes estão combinadas. Isso se deve à relação exponencial da tensão com o dano por fadiga. A Tabela 34 apresenta os resultados de danos encontrados através da análise de flexibilidade pelo *software* CAESAR II.

Tabela 34 Resultados de danos isolados para aceleração e deslocamentos de acordo com o CAESAR II.

Fonte	DANO	
	Linha do *Flare*	Linha de 4"
Aceleração	0,11	0,00
Deslocamento	1,42	0,23
Somatório dos danos calculados isoladamente	1,53	0,23
Dano acumulado para as fontes combinadas	2,95	0,46

Conclui-se que, para os sistemas de tubulações deste estudo de caso, o dano isolado devido aos deslocamentos foi bem mais significativo do que o dano gerado pelas acelerações. Por exemplo, para a linha de 4”, o dano isolado encontrado para a fadiga devido ao deslocamento estrutural corresponde à metade do dano acumulado (com fontes de fadiga combinadas). Conclui-se que estes resultados se devem ao fato de ambas as linhas se estenderem por longas distâncias ao longo do FPSO, o que implica em maiores deslocamentos impostos às tubulações. Por outro lado, a suportação adequada da linha evita maiores tensões devido às acelerações.

- *Comparativos de tensões para acelerações DOC/DEC:*

As simulações realizadas para as linhas do *flare* e de 4” foram atualizadas para a condição de aceleração DEC (*Design Extreme Condition*) a fim de que sejam observadas as relações entre as tensões geradas para cada uma destas condições de análise (DOC e DEC), conforme a Tabela 35. Todas as simulações realizadas até então consideraram somente as acelerações de DOC.

Tabela 35 Comparativo de tensões para acelerações DOC e DEC para as linhas do flare e de 4”.

ANÁLISE	VETOR	TENSÃO (MPa)		RELAÇÃO (%)	NÓ CRÍTICO p/ DEC
		DOC	DEC		
Linha do *Flare*	U1	15,6	31,3	49,84	17210
	U2	10,8	17,8	60,67	17210
Linha de 4”	U1	9,1	17,1	53,21	2530
	U2	4,0	7,0	57,14	2530

Observa-se que a relação média para o resultado de tensões entre as acelerações de DOC e DEC é de aproximadamente 55%.

A Tabela 36 apresenta os resultados de dano para os dois cenários analisados com aceleração de DOC e DEC.

Tabela 36 Comparativo de resultados de dano para acelerações DOC e DEC para as linhas do flare e de 4”.

ANÁLISE	DANO		AUMENTO (%)
	DOC	DEC	
Linha do *Flare*	2,95	8,04	173
Linha de 4”	0,46	1,31	185

5.1.2 Estudo de Caso 2 – Linha de 12” (Gás)

Assim como nos estudos de casos apresentados até aqui, este também foi realizado com base em uma análise de flexibilidade de determinado projeto já executado, e contempla uma tubulação de 12” de diâmetro nominal, fabricada em aço carbono API 5L Grau B, com espessura de parede de 6,35 mm, e comprimento de, aproximadamente 70 metros, com escoamento de fluido na fase gasosa. A linha possui temperatura de projeto de 90°C e classe de pressão de 150 libras.

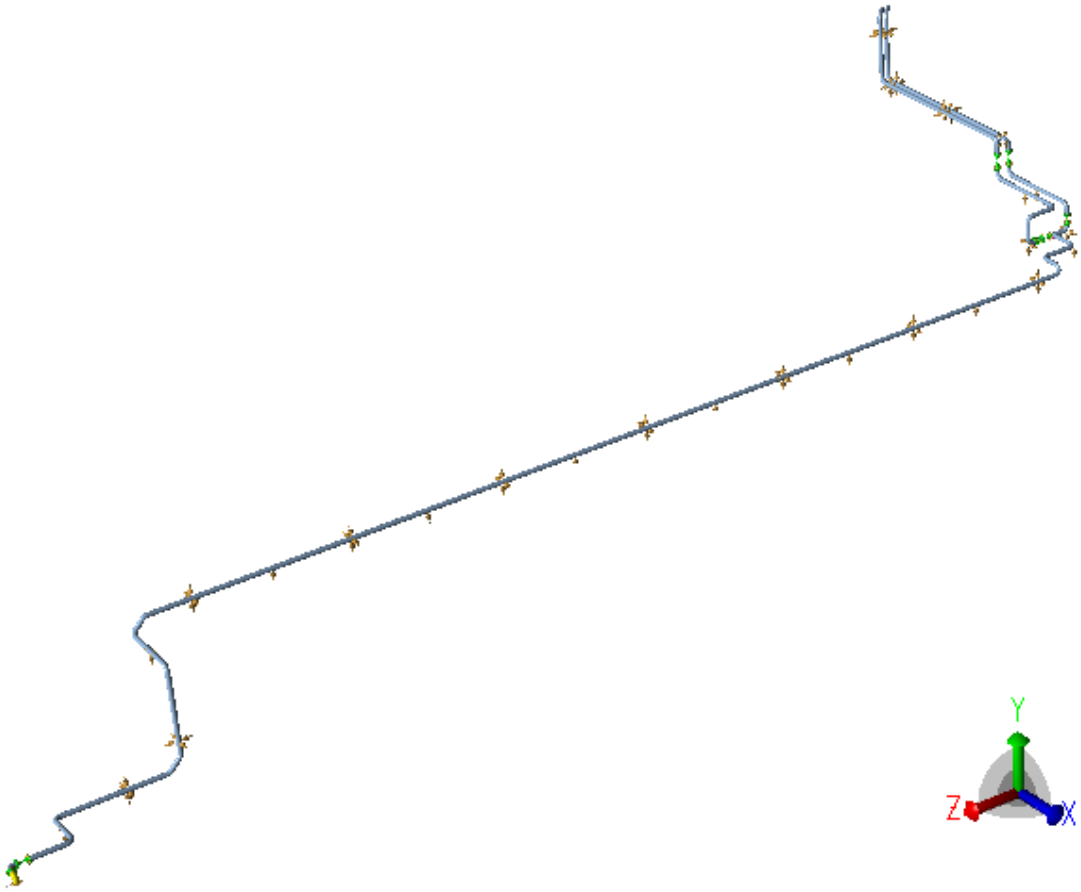


Fig. 40 Arranjo geral da análise extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D).

Este estudo de caso aborda as condições de DOC e DEC em um mesmo caso de carregamento, conforme também é proposto no procedimento padrão apresentado no Capítulo VI desta dissertação.

A Tabela 37 a seguir mostra os dados de acelerações contidos no *Acceleration Data* para a área/módulo no(s) qual(is) a linha está presente. Neste caso, o *pipe rack* representado

pelo M-18. São informadas as magnitudes das acelerações de *roll*, *pitch* e *heave* da plataforma em termos da aceleração da gravidade.

Tabela 37 Acelerações inerciais para o pipe rack em DOC e DEC.

CONDIÇÃO	ACELERAÇÃO		
	X (g)	Y (g)	Z (g)
DOC	0,19	0,18	0,02
DEC	0,40	0,27	0,12

Diferentemente do considerado no projeto do estudo de caso anterior, os vetores acelerações foram computados em todos os eixos como vetores unitários para que os vetores U1, U2 e U3 sejam contemplados aos casos de carregamentos da análise, conforme a Figura 41.

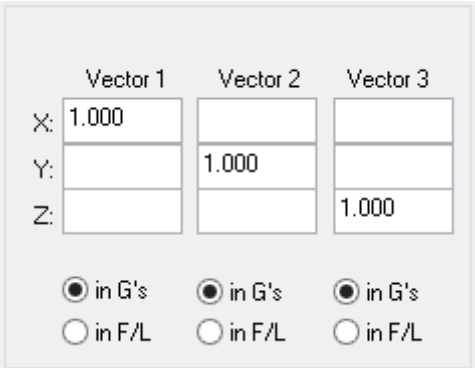


Fig. 41 *Input* de valores dos vetores das acelerações do software CAESAR II.

Os valores das acelerações para DOC e DEC informados na Tabela 37 foram multiplicados aos vetores correspondentes nos casos de carregamentos.

Tabela 38 Aplicação das acelerações aos casos de carregamentos para DOC e DEC.

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO
L1	WW+HP+H	HYD	-
L2	W+D1+T1+P1+H	OPE	-
L3	W+D1+T1+P1+H+0.4U1+0.27U2+0.12U3	OPE	ACELERAÇÕES COMBINADAS PARA DEC
L4	W+D1+T1+P1+H+0.4U1+0.27U2-0.12U3	OPE	
L5	W+D1+T1+P1+H+0.4U1-0.27U2+0.12U3	OPE	
L6	W+D1+T1+P1+H+0.4U1-0.27U2-0.12U3	OPE	
L7	W+D1+T1+P1+H-0.4U1+0.27U2+0.12U3	OPE	
L8	W+D1+T1+P1+H-0.4U1+0.27U2-0.12U3	OPE	
L9	W+D1+T1+P1+H-0.4U1-0.27U2+0.12U3	OPE	
L10	W+D1+T1+P1+H-0.4U1-0.27U2-0.12U3	OPE	
L11	W+D1+T1+P1+H+WIN1	OPE	-
L12	W+D1+T1+P1+H+WIN2	OPE	-

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO
L13	W+D1+D2+T1+P1+H	OPE	-
L14	W+D1+D3+T1+P1+H	OPE	-
L15	W+D1+T1+P1+H+0.19U1+0.18U2+0.02U3	OPE	ACELERAÇÕES COMBINADAS PARA DOC
L16	W+D1+T1+P1+H+0.19U1+0.18U2-0.02U3	OPE	
L17	W+D1+T1+P1+H+0.19U1-0.18U2+0.02U3	OPE	
L18	W+D1+T1+P1+H+0.19U1-0.18U2-0.02U3	OPE	
L19	W+D1+T1+P1+H-0.19U1+0.18U2+0.02U3	OPE	
L20	W+D1+T1+P1+H-0.19U1+0.18U2-0.02U3	OPE	
L21	W+D1+T1+P1+H-0.19U1-0.18U2+0.02U3	OPE	
L22	W+D1+T1+P1+H-0.19U1-0.18U2-0.02U3	OPE	

No que se refere à avaliação da fadiga, foram aplicados fatores de altura de onda em um total de 10 faixas, sendo 7 para a condição DOC, e 3 para a condição DEC. Os fatores de altura foram aplicados somente para os deslocamentos estruturais do FPSO. Os casos de carregamentos do projeto executado correspondentes a cada faixa de altura de onda estão informados na última coluna da Tabela 39, que por sua vez se encontram discriminados no Apêndice 11.1.2 desta dissertação. A curva de fadiga considerada na análise foi a F3 da norma DNV RP C203.

Tabela 39 Determinação dos fatores de altura de onda considerados no projeto executado.

FATORES DE ALTURAS CONSIDERADOS NO PROJETO					
CONDIÇÃO	**FAIXA**	**ALTURA DE ONDA MÍN.**	**ALTURA DE ONDA MÁX.**	**FATOR**	**CASOS DE CARREGAMENTOS**
DOC	1	0,25	2,00	0,05	L164@L171
	2	2,25	3,00	0,10	L156@163
	3	3,25	4,00	0,20	148@155
	4	4,25	5,00	0,30	140@147
	5	5,25	6,00	0,50	132@L139
	6	6,25	7,00	0,70	L124@L131
	7	7,25	8,00	1,00	L116@L123
DEC	8	8,25	9,00	0,60	L108@L115
	9	9,25	10,00	0,80	L100@L107
	10	10,25		1,00	L92@L99

Os casos de carregamento referentes à avaliação da fadiga considerados no projeto executado encontram-se resumidos na Tabela 5.17. Para identificação de todos os casos indicados, consultar o Apêndice 11.1.2.

Os casos L31 e L32, na coluna “Combinação”, correspondem aos casos de deslocamento estrutural para SAG e HOG, respectivamente, na condição DEC. Para a condição DOC, os casos de deslocamentos correspondentes aos movimentos de SAG e HOG são L89 e

L90, respectivamente. Os casos L49 ao L56 representam as 8 combinações das acelerações para a condição DEC. Para a condição DOC, as combinações são representadas pelos casos L57 ao L64. Os fatores da Tabela 39 foram multiplicados pela parcela dinâmica do deslocamento estrutural (0,6) tanto para SAG quanto para HOG.

Tabela 40 Resumo dos casos de carregamentos considerados para a determinação do dano à fadiga no projeto executado.

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	Nº CICLOS	DESCRIÇÃO
L91	L26	FAT	7000	TÉRMICA
L92	0.6L31-0.6L32+L49	FAT	1	Faixa 10 de altura de onda - Fator 1,0 - DEC
L93	0.6L31-0.6L32+L50	FAT	1	
L94	0.6L31-0.6L32+L51	FAT	1	
L95	0.6L31-0.6L32+L52	FAT	1	
L96	0.6L31-0.6L32+L53	FAT	1	
L97	0.6L31-0.6L32+L54	FAT	1	
L98	0.6L31-0.6L32+L55	FAT	1	
L99	0.6L31-0.6L32+L56	FAT	1	
L100	0.48L31-0.48L32+L49	FAT	909	Faixa 9 de altura de onda - Fator 0,8 - DEC
L101	0.48L31-0.48L32+L50	FAT	909	
L102	0.48L31-0.48L32+L51	FAT	909	
L103	0.48L31-0.48L32+L52	FAT	909	
L104	0.48L31-0.48L32+L53	FAT	909	
L105	0.48L31-0.48L32+L54	FAT	909	
L106	0.48L31-0.48L32+L55	FAT	909	
L107	0.48L31-0.48L32+L56	FAT	909	
L108	0.36L31-0.36L32+L49	FAT	2878	Faixa 8 de altura de onda - Fator 0,6 - DEC
L109	0.36L31-0.36L32+L50	FAT	2878	
L110	0.36L31-0.36L32+L51	FAT	2878	
L111	0.36L31-0.36L32+L52	FAT	2878	
L112	0.36L31-0.36L32+L53	FAT	2878	
L113	0.36L31-0.36L32+L54	FAT	2878	
L114	0.36L31-0.36L32+L55	FAT	2878	
L115	0.36L31-0.36L32+L56	FAT	2878	
L116	0.6L89-0.6L90+L57	FAT	6056	Faixa 7 de altura de onda - Fator 1.0 - DOC
L117	0.6L89-0.6L90+L58	FAT	6056	
L118	0.6L89-0.6L90+L59	FAT	6056	
L119	0.6L89-0.6L90+L60	FAT	6056	
L120	0.6L89-0.6L90+L61	FAT	6056	
L121	0.6L89-0.6L90+L62	FAT	6056	
L122	0.6L89-0.6L90+L63	FAT	6056	
L123	0.6L89-0.6L90+L64	FAT	6056	
L124	0.42L89-0.42L90+L57	FAT	15900	Faixa 6 de altura de onda - Fator 0,7 - DOC
L125	0.42L89-0.42L90+L58	FAT	15900	
L126	0.42L89-0.42L90+L59	FAT	15900	

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	Nº CICLOS	DESCRIÇÃO
L127	0.42L89-0.42L90+L60	FAT	15900	
L128	0.42L89-0.42L90+L61	FAT	15900	
L129	0.42L89-0.42L90+L62	FAT	15900	
L130	0.42L89-0.42L90+L63	FAT	15900	
L131	0.42L89-0.42L90+L64	FAT	15900	
L132	0.3L89-0.3L90+L57	FAT	53450	Faixa 5 de altura de onda - Fator 0,5 - DOC
L133	0.3L89-0.3L90+L58	FAT	53450	
L134	0.3L89-0.3L90+L59	FAT	53450	
L135	0.3L89-0.3L90+L60	FAT	53450	
L136	0.3L89-0.3L90+L61	FAT	53450	
L137	0.3L89-0.3L90+L62	FAT	53450	
L138	0.3L89-0.3L90+L63	FAT	53450	
L139	0.3L89-0.3L90+L64	FAT	53450	
L140	0.18L89-0.18L90+L57	FAT	184737	Faixa 4 de altura de onda - Fator 0,3 - DOC
L141	0.18L89-0.18L90+L58	FAT	184737	
L142	0.18L89-0.18L90+L59	FAT	184737	
L143	0.18L89-0.18L90+L60	FAT	184737	
L144	0.18L89-0.18L90+L61	FAT	184737	
L145	0.18L89-0.18L90+L62	FAT	184737	
L146	0.18L89-0.18L90+L63	FAT	184737	
L147	0.18L89-0.18L90+L64	FAT	184737	
L148	0.12L89-0.12L90+L57	FAT	980456	Faixa 3 de altura de onda - Fator 0,2 - DOC
L149	0.12L89-0.12L90+L58	FAT	980456	
L150	0.12L89-0.12L90+L59	FAT	980456	
L151	0.12L89-0.12L90+L60	FAT	980456	
L152	0.12L89-0.12L90+L61	FAT	980456	
L153	0.12L89-0.12L90+L62	FAT	980456	
L154	0.12L89-0.12L90+L63	FAT	980456	
L155	0.12L89-0.12L90+L64	FAT	980456	
L156	0.06L89-0.06L90+L57	FAT	4436056	Faixa 2 de altura de onda - Fator 0,1 - DOC
L157	0.06L89-0.06L90+L58	FAT	4436056	
L158	0.06L89-0.06L90+L59	FAT	4436056	
L159	0.06L89-0.06L90+L60	FAT	4436056	
L160	0.06L89-0.06L90+L61	FAT	4436056	
L161	0.06L89-0.06L90+L62	FAT	4436056	
L162	0.06L89-0.06L90+L63	FAT	4436056	
L163	0.06L89-0.06L90+L64	FAT	4436056	
L164	0.03L89-0.03L90+L57	FAT	5784015	Faixa 1 de altura de onda - Fator 0,05 - DOC
L165	0.03L89-0.03L90+L58	FAT	5784015	
L166	0.03L89-0.03L90+L59	FAT	5784015	
L167	0.03L89-0.03L90+L60	FAT	5784015	
L168	0.03L89-0.03L90+L61	FAT	5784015	
L169	0.03L89-0.03L90+L62	FAT	5784015	
L170	0.03L89-0.03L90+L63	FAT	5784015	

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	Nº CICLOS	DESCRIÇÃO
L171	0.03L89-0.03L90+L64	FAT	5784015	

A Tabela 41 apresenta os resultados de dano extraído do *software* CAESAR II por faixa de altura para a curva F3 da DNV RP C203 do projeto executado.

Tabela 41 - Separação dos danos por altura de onda devido às acelerações e deslocamentos.

CONDIÇÃO	FAIXA	ALTURA		FATOR	DANO	%	Variação de Tensão (MPa)	CASOS DE CARREGAMENTO
		MÍN.	MÁX.					
DOC	1	0	2	0,05	0,67	18,26	13,5 @ 27,1	L164@L171
	2	2	3	0,10	0,78	21,25	14,0 @ 30,4	L156@L163
	3	3	4	0,20	0,65	17,71	19,8 @ 43,4	L148@L155
	4	4	5	0,30	0,34	9,26	31,3 @ 57,0	L140@L147
	5	5	6	0,50	0,40	10,90	61,4 @ 84,7	L132@L139
	6	6	7	0,70	0,32	8,72	77,8 @ 112,8	L124@L131
	7	7	8	1,00	0,36	9,81	117,8 @ 155,0	L116@L123
DEC	8	8	9	0,60	0,09	2,45	75,4 @ 157,7	L108@L115
	9	9	10	0,80	0,06	1,63	101,9 @ 191,0	L100@L107
	10	10	10,25	1,00	0,00	0,00	128,5 @ 224,0	L92@L99
TOTAL					3,67			

O dano acumulado de 3,67 ocorre na conexão do tipo “tê” forjado de 12” x 12”, tendo sua intersecção representada pelo nó 440, conforme Figura 42.

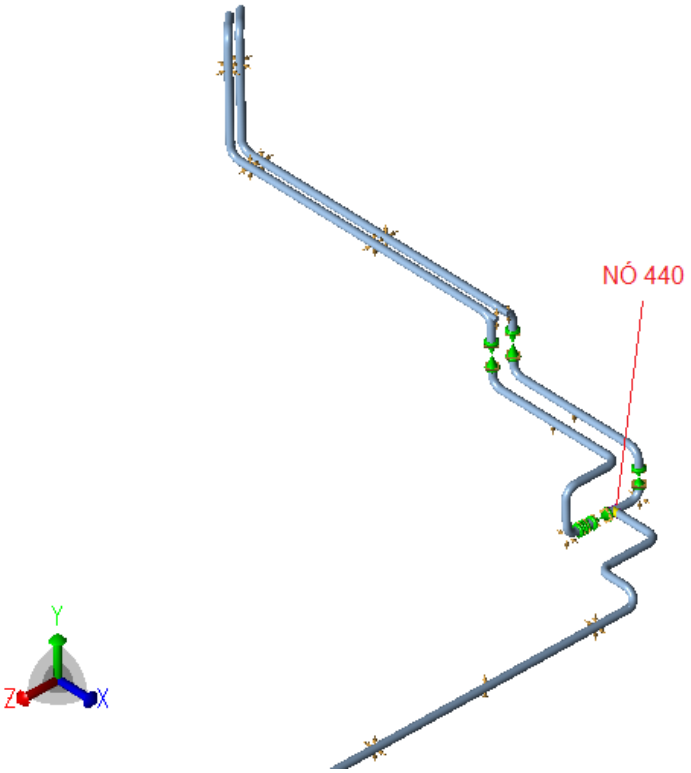


Fig. 42 Indicação da conexão tipo "tê" na qual foi encontrado o dano de 3,67 de acordo com o projeto executado. Fonte: (S/D).

Assim como verificado nos estudos de caso anteriores, se observa que o maior dano acontece em região na qual o arranjo da tubulação possui trechos em mais de uma orientação. Neste caso, é intensificado pelos acessórios presentes no arranjo que proporcionam uma maior rigidez ao sistema além da concentração de massa, conforme mostrado na Figura 43.

A Tabela 42 traz a contribuição do dano individual da fadiga térmica e da fadiga ocasionada pelos deslocamentos estruturais combinados às acelerações. Observa-se que a parcela do dano gerado pela fadiga térmica é bem reduzida.

Tabela 42 - Separação dos danos por fonte de fadiga.

Fonte de Fadiga	Dano	Distribuição do dano
Térmica	0,05	1,3 %
Acelerações e Deslocamentos	3,67	98,7 %
Total	3,72	

Para os casos de carregamento adotados neste projeto, não é possível a identificação da aceleração de maior contribuição para o dano na derivação do nó 440 devido à utilização de apenas uma resultante para os três vetores acelerações (U1, U2 e U3), diferentemente do que ocorre para os casos de carregamento dos estudos de caso apresentados nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

O dano devido às acelerações foi ligeiramente maior do que os danos causados pelos deslocamentos.

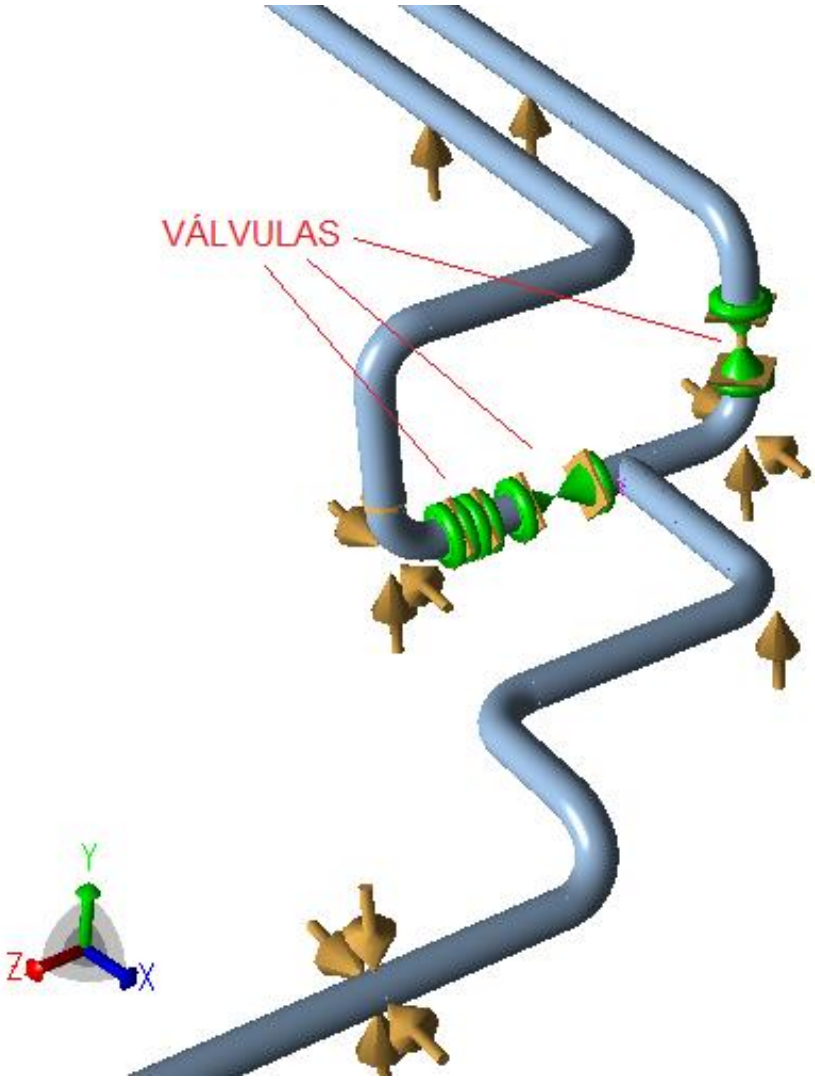


Fig. 43 Detalhe dos acessórios presentes no arranjo da tubulação. Fonte: (S/D).

A fim de atender ao dano máximo à fadiga de acordo o critério do projeto, limitado ao máximo de 1,0, foi assumida a premissa de que a linha que possui a conexão do tipo "tê", representada pelo nó 440 do CAESAR II, 100% radiografada. Desta forma, a nova curva de fadiga considerada na análise de flexibilidade deverá ser a curva D da norma BS PD5500, menos conservativa do que a curva F3 da DNV. Uma vez considerada esta nova curva, o dano acumulado foi reduzido para 0,95 na mesma conexão.

- **Fator de altura para deslocamentos e acelerações:**

Este estudo foi realizado com o objetivo de identificar o dano ao ser considerado o fator de altura de onda, não só para os deslocamentos conforme já obtido anteriormente, mas também para as acelerações de DOC e DEC. A Tabela 43 retrata este cenário. Observa-se uma redução de 49% do dano obtido originalmente que foi de 3,67. O ponto nodal de ocorrência do maior dano permaneceu sendo o nó 440, conforme identificado na Figura 42.

Tabela 43 Resultado do dano com fator de altura aplicado aos deslocamentos e acelerações.

CONDIÇÃO	FAIXA	ALTURA MÍN.	ALTURA MÁX.	FATOR	DANO	%	CASOS DE CARREGAMENTO
DOC	1	0	2	0,05	0,00	0,00	L228@L235
	2	2	3	0,10	0,05	0,03	L220@L227
	3	3	4	0,20	0,34	0,18	L212@L219
	4	4	5	0,30	0,29	0,15	L204@L211
	5	5	6	0,50	0,40	0,21	L196@L203
	6	6	7	0,70	0,32	0,17	L188@L195
	7	7	8	1,00	0,36	0,19	L180@L187
DEC	8	8	9	0,60	0,07	0,04	L172@L179
	9	9	10	0,80	0,05	0,03	L164@L171
	10	10	10,25	1,00	0,00	0,03	L156@L163
			TOTAL		1,89		

Através do *software* CAESAR II, um estudo com maior agrupamento das alturas de ondas foi realizado. Neste, as alturas de onda foram agrupadas de 1 em 1 metro conforme a Tabela 44. O dano encontrado através da simulação apresenta um expressivo aumento. Para identificação dos casos de carregamento considerados neste estudo, ver Apêndice V.

Tabela 44 Separação dos danos para acelerações e deslocamentos com agrupamento de 1 em 1 metro.

CONDIÇÃO	FAIXA	FATOR	DANO	%	CASOS DE CARREGAMENTO
DOC	1	0,091	0,00	0,00	L298@L305
	2	0,182	1,31	0,13	L306@L313

CONDIÇÃO	FAIXA	FATOR	DANO	%	CASOS DE CARREGAMENTO
	3	0,273	5,09	0,49	L324@L321
	4	0,364	2,41	0,23	L322@L329
	5	0,455	0,78	0,07	L330@L337
	6	0,545	0,37	0,04	L338@L345
	7	0,636	0,18	0,02	L346@L353
	8	0,727	0,10	0,01	L354@L361
DEC	9	0,818	0,14	0,01	L273@L280
	10	0,909	0,05	0,00	L281@L288
	11	1	0,00	0,00	L289@L296
	TOTAL		10,42		

A grande divergência de resultados de dano, onde foi obtido o dano de 3,67 para o agrupamento do projeto executado e 10,42 para o agrupamento de 1 em 1 metro ocorre pela variação dos fatores de altura de onda considerados nos dois cenários. Os fatores de altura de onda das Tabelas 43 e 44 não são proporcionais às alturas de onda.

Este é um ponto muito importante a ser avaliado, principalmente para a elaboração do procedimento padrão de fadiga que será apresentado no Capítulo VI desta dissertação.

Conforme um dos objetivos deste trabalho, busca-se um comparativo entre as diversas considerações adotadas nos casos de carregamentos de projetos já executados.

Na Tabela 45, estão apresentados os variados fatores de altura de ondas de diferentes projetos. Além dos fatores considerados nos estudos de caso apresentados até aqui, foram levantados os fatores de mais um projeto, totalizando um comparativo entre três projetos já executados, além do estudo com fatores para agrupamento de 1 em 1 metro de altura de onda.

Tabela 45 Comparativo entre fatores de altura de variados projetos e para o agrup. de 1 em 1 metro.

COND.	FAIXA	ALTURA (m)	FATOR Projeto 1	FATOR Projeto 2	FATOR Projeto 3	FATOR p/ AGRP. 1 em 1m	CICLOS Projeto 1	CICLOS Projeto 2	CICLOS Projeto 3	CICLOS p/ AGRP. 1 em 1m
DOC	**1**	**0 a 1**	0,05	0,08	0,077	0,091	46.272.120	1.841.288	2.046.937	2.046.937
	2	**1 a 2**		0,17	0,179	0,182		44.430.816	47.864.464	47.864.464
	3	**2 a 3**	0,1	0,25	0,282	0,273	35.488.448	35.488.440	34.211.180	34.211.180
	4	**3 a 4**	0,2	0,34	0,385	0,364	7.843.648	7.843.648	6.746.746	6.746.746
	5	**4 a 5**	0,3	0,43	0,487	0,455	1.477.896	1.477.872	1.119.145	1.119.145
	6	**5 a 6**	0,5	0,51	0,590	0,545	427.600	427.608	313.006	313.006
	7	**6 a 7**	0,7	0,60	1	0,636	127.200	127.192	149.319	93.375
	8	**7 a 8**	1	0,69		0,727	48.448	48.448		34.342
DEC	**9**	**8 a 9**	0,6	0,77		0,818	23.024	23.016		17.139
	10	**9 a 10**	0,8	0,86		0,909	7.272	7.264		4.463
	11	**10 a 11**	1	1		1	1	1		1

Observa-se, de acordo com a variação do resultado de dano encontrado, que para as faixas de maiores ciclos de ondas, correspondentes às faixas 1, 2, 3 e 4 da Tabela 45, responsáveis pela maior parcela do dano gerado no sistema de tubulações, a pequena variação do fator de altura de onda toma grandes proporções no resultado do dano. Note os fatores de altura de onda do Projeto 1, que são menores que os fatores dos demais projetos na faixa de altura de onda de 0 a 6 metros. Isto implica numa redução significativa no cálculo do dano por fadiga.

5.1.3 Estudo de Caso 3 – Fadiga Térmica x Fadiga devido às acelerações e deslocamentos

Este estudo de caso busca avaliar a contribuição da fadiga gerada pelos ciclos térmicos no dano total de três sistemas de tubulações que integram as linhas de produção de óleo e injeção de gás para aumento da pressão interna dos poços. Estes sistemas, assim como os demais estudados até aqui, pertencem a um projeto já concluído.

Em todos estes três sistemas, a temperatura de projeto é de 70°C, as demais características especificadas de cada arranjo estão descritas nos itens a seguir. A fadiga proveniente dos deslocamentos de *SAG*/*HOG* e das acelerações foi considerada no cálculo somente para a condição DEC (*Design Extreme Condition*). Além disso, foram consideradas as ondas máximas, tanto para o cálculo das acelerações quanto para os deslocamentos. Os casos de carregamentos deste estudo de caso estão presentes no Apêndice 11.1.3 desta dissertação.

5.1.3.1 Arranjo 1 com Ø8”:

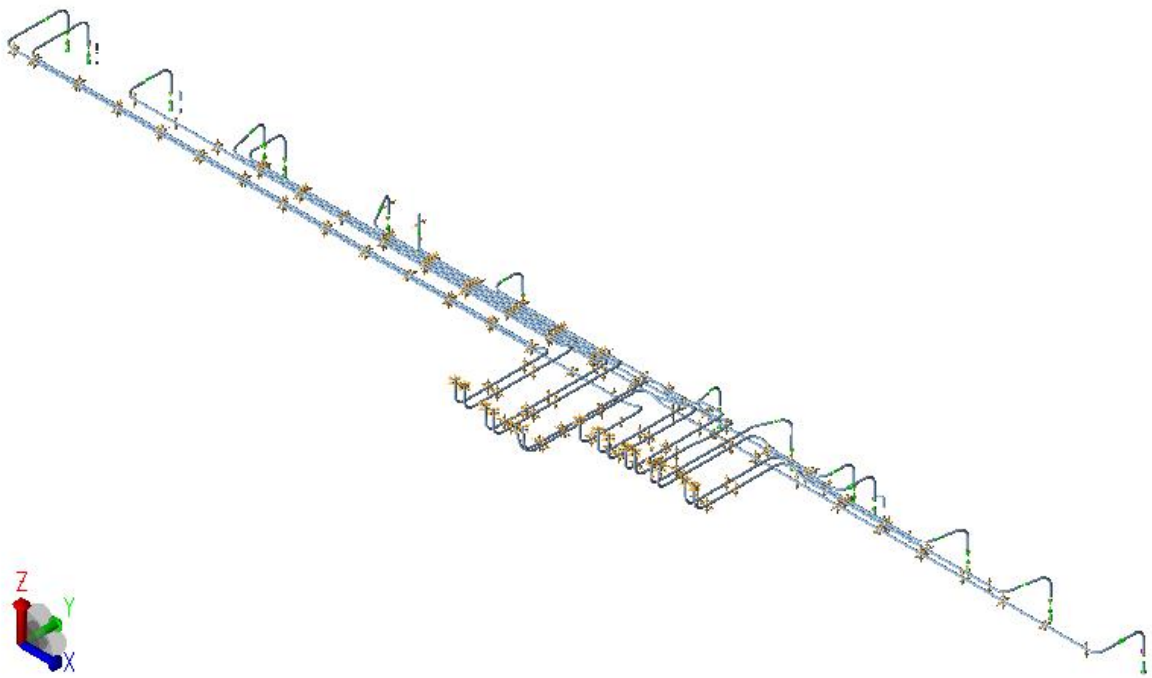


Fig. 44 Arranjo geral da análise do arranjo 1 extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D).

O sistema de tubulações é de 8” de diâmetro nominal, fabricado em aço carbono API 5L Grau X65, com espessura de parede de 29,97 mm, e comprimento de, aproximadamente, 120 metros, escoando ora óleo, ora gás.

As Tabelas 46, 47 e 48 apresentam os casos de carregamento e os resultados de dano para as duas fontes de fadiga, sendo um total de 7000 ciclos para a fonte de fadiga térmica e 144 milhões de ciclos para a fonte de fadiga devido às acelerações e deslocamentos. Para identificação dos demais casos de carregamentos não informados nestas tabelas, consultar o Apêndice 11.1.3.

Tabela 46 Dano obtido para a fadiga térmica e combinação das acelerações e deslocamentos.

CASO		DESCRIÇÃO	Nº CICLOS	DANO
L82	L5	W+D1+T1+P1	7.000	0,00
L83	L6+L36-L7-L51	D8+(+U1+U2+U3)-D9-(-U1-U2-U3)	18.000.000	0,80
L84	L6+L37-L7-L50	D8+(+U1-U2+U3)-D9-(-U1+U2-U3)	18.000.000	
L85	L6+L38-L7-L49	D8+(+U1+U2-U3)-D9-(-U1-U2+U3)	18.000.000	
L86	L6+L39-L7-L48	D8+(+U1-U2-U3)-D9-(-U1+U2+U3	18.000.000	
L87	L6+L40-L7-L47	D8+(-U1+U2+U3)-D9-(+U1-U2-U3)	18.000.000	
L88	L6+L41-L7-L46	D8+(-U1-U2+U3)-D9-(+U1+U2-U3)	18.000.000	

L89	L6+L42-L7-L45	D8+(-U1+U2-U3)-D9-(+U1-U2+U3)	18.000.000	
L90	L6+L43-L7-L44	D8+(-U1-U2-U3)-D9-(+U1+U2+U3)	18.000.000	
			TOTAL	0,80

onde:

D8 – deslocamento estrutural de SAGGING;

D9 – deslocamento estrutural de HOGGING;

U1 – aceleração no eixo x;

U2 – aceleração no eixo y;

U3 – aceleração no eixo z.

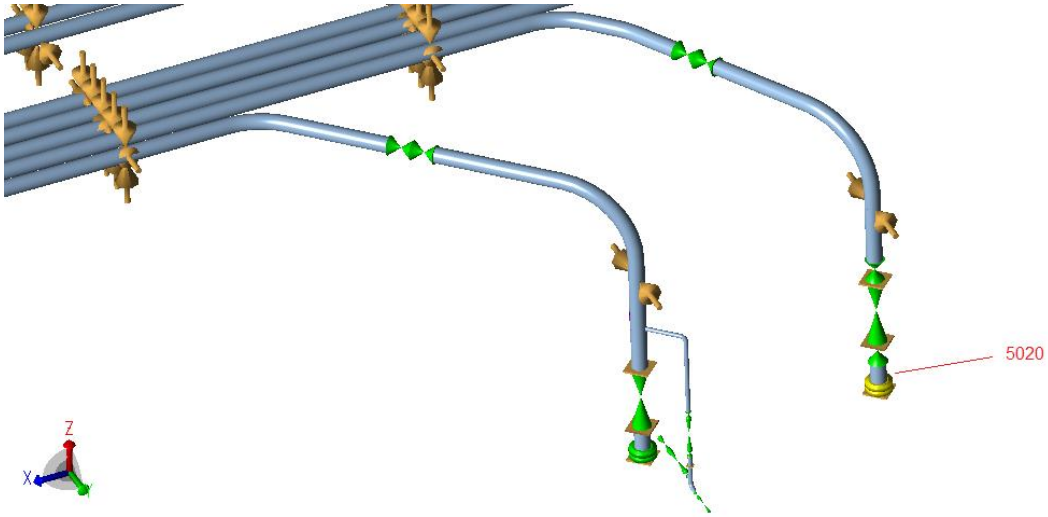


Fig. 45 Detalhe para o ponto nodal 5020 de ocorrência do dano de 0,80. Fonte: (S/D).

5.1.3.2 Arranjo 2 com Ø8”:

Este sistema de tubulações é composto por linhas de 8” de diâmetro nominal, fabricado em aço carbono API 5L Grau X65, com espessura de parede de 15,09 mm, e comprimento de, aproximadamente, 120 metros, escoando ora óleo, ora gás.

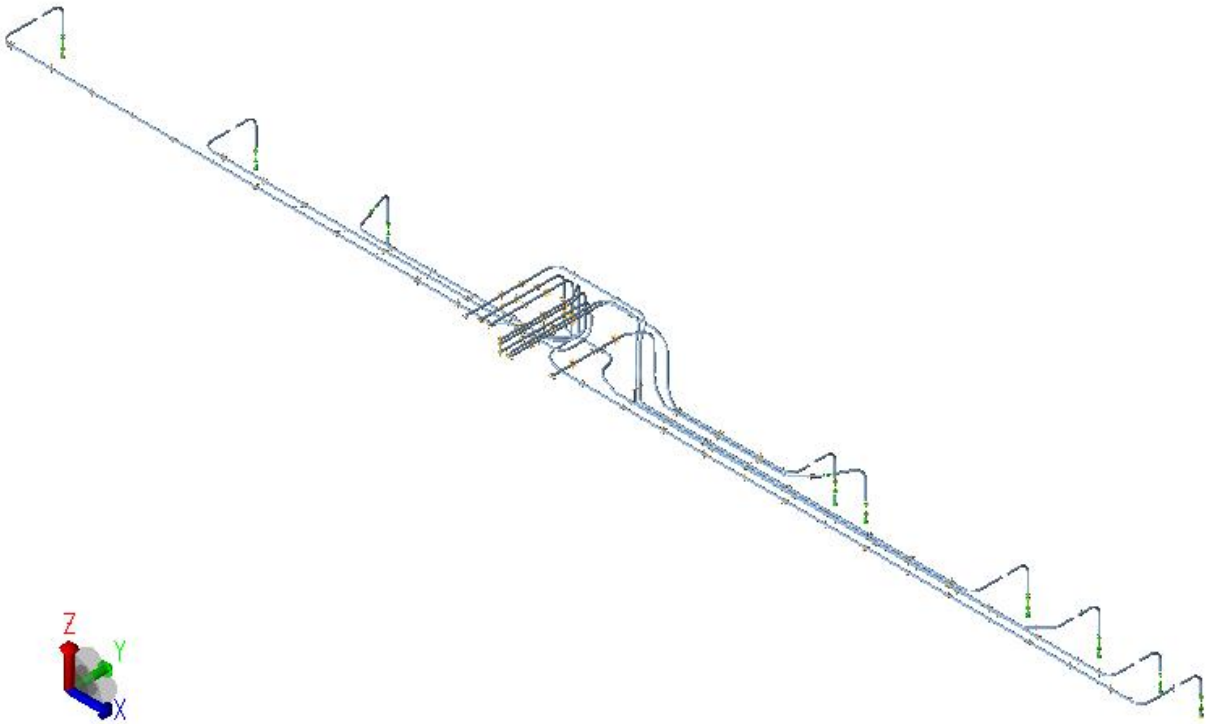


Fig. 46 Arranjo geral da análise do arranjo 2 extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D).

Tabela 47 Dano obtido para a fadiga térmica e combinação das acelerações e deslocamentos.

CASO		DESCRIÇÃO	Nº CICLOS	DANO
L82	L5	W+D1+T1+P1	7.000	0,00
L83	L6+L36-L7-L51	D8+(+U1+U2+U3)-D9-(-U1-U2-U3)	18.000.000	0,77
L84	L6+L37-L7-L50	D8+(+U1-U2+U3)-D9-(-U1+U2-U3)	18.000.000	
L85	L6+L38-L7-L49	D8+(+U1+U2-U3)-D9-(-U1-U2+U3)	18.000.000	
L86	L6+L39-L7-L48	D8+(+U1-U2-U3)-D9-(-U1+U2+U3	18.000.000	
L87	L6+L40-L7-L47	D8+(-U1+U2+U3)-D9-(+U1-U2-U3)	18.000.000	
L88	L6+L41-L7-L46	D8+(-U1-U2+U3)-D9-(+U1+U2-U3)	18.000.000	
L89	L6+L42-L7-L45	D8+(-U1+U2-U3)-D9-(+U1-U2+U3)	18.000.000	
L90	L6+L43-L7-L44	D8+(-U1-U2-U3)-D9-(+U1+U2+U3)	18.000.000	
			TOTAL	0,77

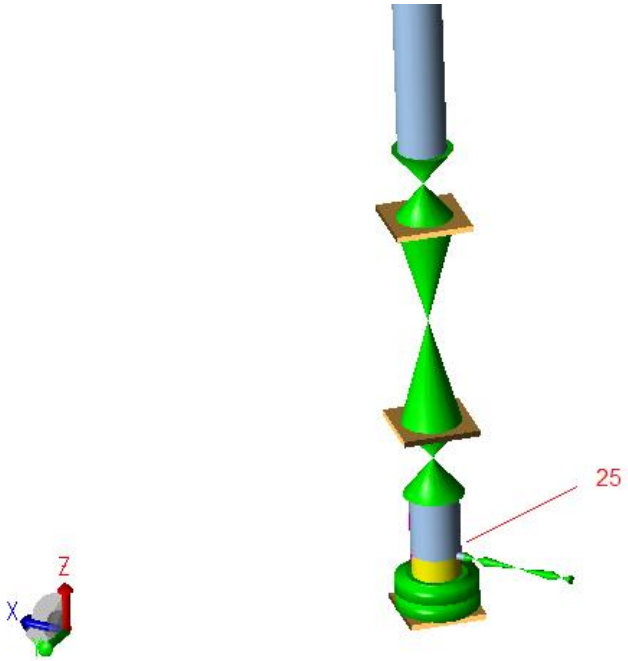


Fig. 47 Detalhe para o ponto nodal 25 de ocorrência do dano de 0,77. Fonte: (S/D).

5.1.3.3 Arranjo 3 com Ø8” e Ø20”:

Este sistema de tubulações é composto por linhas de 8” e 20” de diâmetro nominal, fabricadas em aço carbono API 5L Grau X65, com espessuras de parede de 15,09 mm e 38,10, respectivamente. O sistema possui comprimento de, aproximadamente, 135 metros, escoando ora óleo, ora gás.

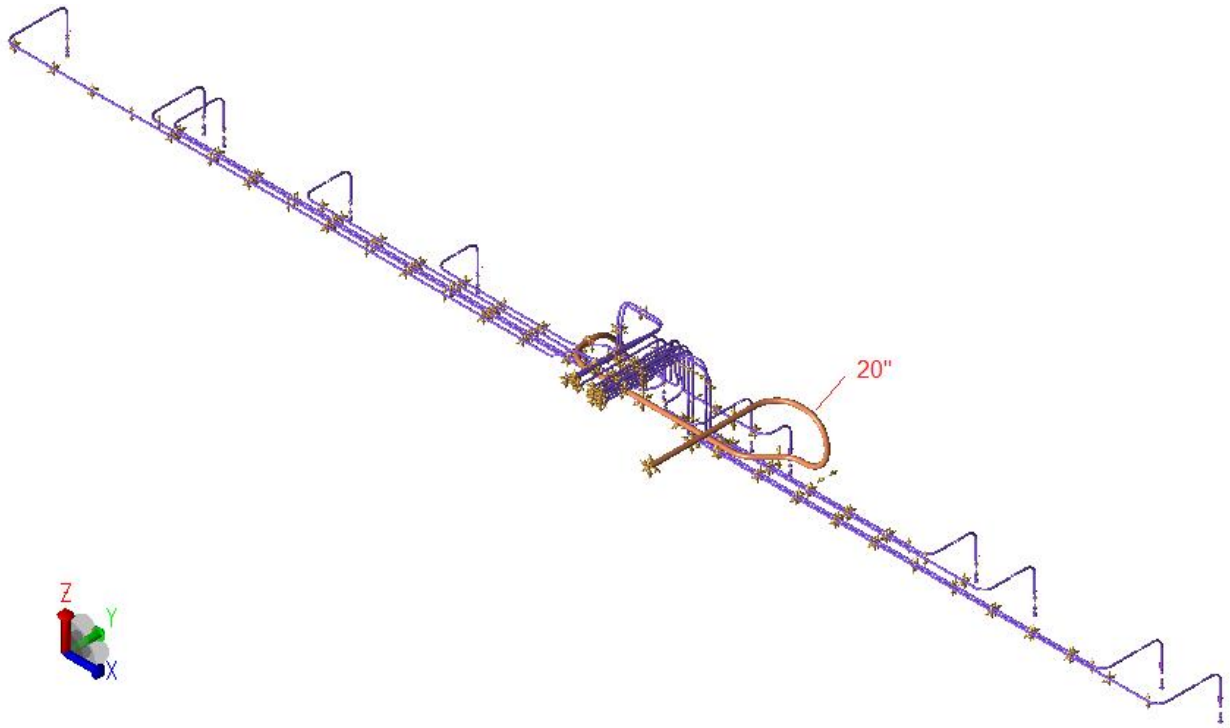


Fig. 48 Arranjo geral da análise do arranjo 3, com detalhe para a linha de Ø20", extraído do *software* CAESAR II. Fonte: (S/D).

Tabela 48 - Dano obtido para a fadiga térmica e combinação das acelerações e deslocamentos.

CASO		DESCRIÇÃO	Nº CICLOS	DANO
L82	L5	W+D1+T1+P1	7.000	0,00
L83	L6+L36-L7-L51	D8+(+U1+U2+U3)-D9-(-U1-U2-U3)	18.000.000	0,71
L84	L6+L37-L7-L50	D8+(+U1-U2+U3)-D9-(-U1+U2-U3)	18.000.000	
L85	L6+L38-L7-L49	D8+(+U1+U2-U3)-D9-(-U1-U2+U3)	18.000.000	
L86	L6+L39-L7-L48	D8+(+U1-U2-U3)-D9-(-U1+U2+U3	18.000.000	
L87	L6+L40-L7-L47	D8+(-U1+U2+U3)-D9-(+U1-U2-U3)	18.000.000	
L88	L6+L41-L7-L46	D8+(-U1-U2+U3)-D9-(+U1+U2-U3)	18.000.000	
L89	L6+L42-L7-L45	D8+(-U1+U2-U3)-D9-(+U1-U2+U3)	18.000.000	
L90	L6+L43-L7-L44	D8+(-U1-U2-U3)-D9-(+U1+U2+U3)	18.000.000	
			TOTAL	0,71

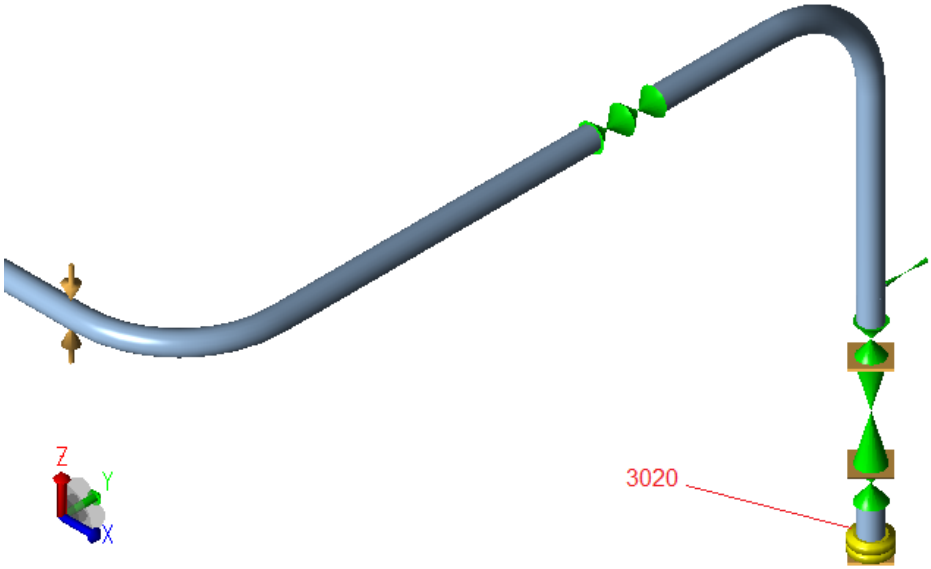


Fig. 49 Detalhe para o ponto nodal 3020 de ocorrência do dano de 0,71. Fonte: (S/D).

Observa-se a partir dos resultados de danos mostrados nas Tabelas 46, 47 e 48 que os três sistemas de tubulações apresentam vida infinita à fadiga térmica devido a temperatura de operação de apenas 70 °C, e o traçado e suportação das linhas que lhes confere um boa flexibilidade.

5.1.4 Avaliação de Dano por Faixa de Altura de Ondas

Este estudo de caso busca identificar as parcelas de danos nas várias faixas de alturas de onda a partir da consideração de fatores lineares para cálculo dos deslocamentos de *sag* e *hog* em função da altura de onda.

Os resultados de dano foram levantados para três diferentes sistemas analisados de um mesmo projeto de engenharia, ou seja, os casos de carregamento e os próprios fatores de altura utilizados nas três análises apresentadas são comuns.

As duas primeiras análises correspondem aos estudos apresentados nesta dissertação nos itens 5.1.1.1 e 5.1.1.2, respectivamente. A terceira corresponde ao sistema de injeção de água e remoção de sulfato dos poços de produção, composto por linhas de 8” de diâmetro nominal, fabricadas em aço carbono API 5L Grau X65, com espessura de 15,09 mm, conforme demonstrado na Figura 50.

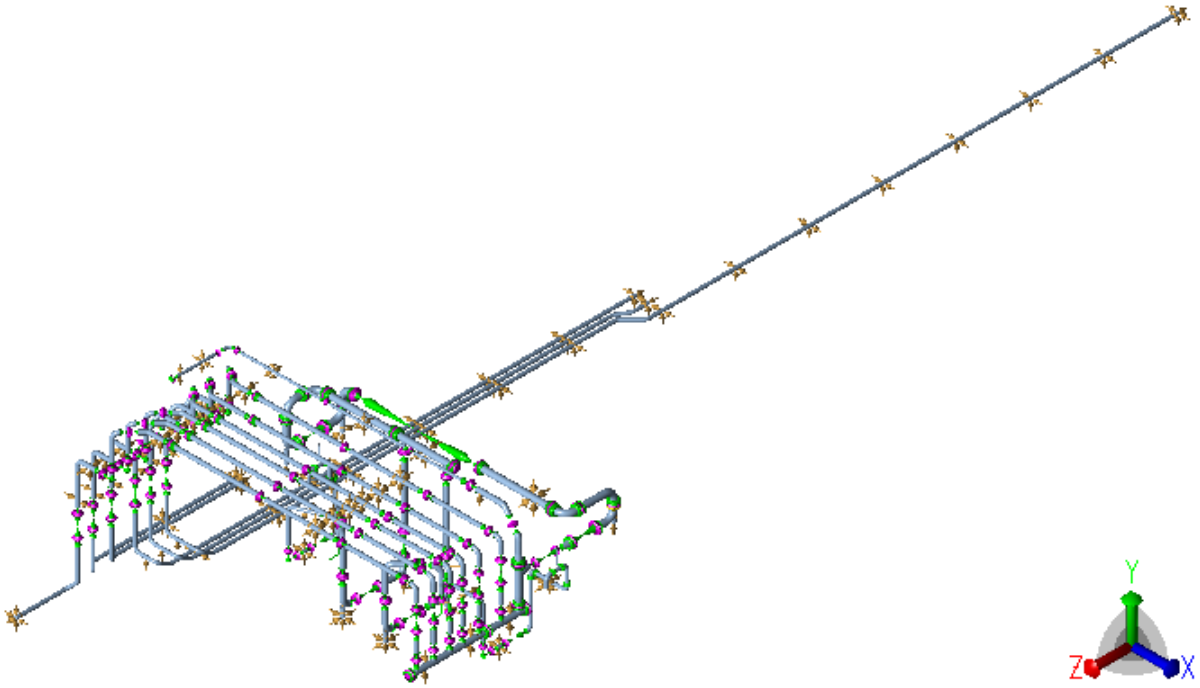


Fig. 50 Vista isométrica da Análise 3 de injeção de água e remoção de sulfato. Fonte: (S/D).

Conforme comentado anteriormente, os fatores de altura de onda estão relacionados somente com a altura da onda, não levando em consideração o período de incidência da mesma. Para identificação dos casos de carregamento das três análises indicadas na Tabela 49, consultar o Apêndice 11.1.1 desta dissertação.

Tabela 49 Separação de dano por faixa de altura e número de ciclos.

ALTURA DE ONDA	DANO ANÁLISE 1	DANO ANÁLISE 2	DANO ANÁLISE 3	ALT. MÉDIA POR FAIXA	CICLOS DE REPETIÇÕES	% MÉDIO DISTRIBUIÇÃO DO DANO	CASOS DE CARREGAMENTOS
FAIXA 1	0,01	0,00	0,02	0,5 m	2.046.937	1	L176@L183
FAIXA 2	0,53	0,05	0,46	1,5 m	47.864.464	27	L184@L191
FAIXA 3	1,29	0,17	0,33	2,5 m	34.211.180	39	L192@L199
FAIXA 4	0,61	0,11	0,06	3,5 m	6.746.746	17	L200@L207
FAIXA 5	0,20	0,05	0,01	4,5 m	1.119.145	6	L208@L215
FAIXA 6	0,10	0,03	0,00	5,5 m	313.006	3	L216@L223
FAIXA 7	0,21	0,06	0,00	8,5 m	149.320	7	L224@L231
TOTAL	2,95	0,46	0,88				

5.1.5 Aceleração Crítica

Este estudo de caso tem como objetivo avaliar uma metodologia simplificada para o cálculo de dano devido às acelerações, baseada no emprego do maior caso de carregamento dentre as combinações das acelerações. Busca-se identificar o resultado do dano encontrado ao se utilizar a metodologia do caso de carregamento crítico. A Tabela 50 apresenta os vinte primeiros casos de carregamento considerados na análise do sistema de alimentação de água de determinado módulo de um projeto de engenharia já concluído, apresentado na Fig. 51. Este sistema foi escolhido por ter características que o tornam mais suscetível ao dano por fadiga devido às acelerações, como possuir grandes massas concentradas devido à presença de várias válvulas.

Este sistema de tubulações é composto por linhas que transportam água de 8”, 12” e 18” de diâmetro nominal, fabricadas em aço carbono API 5L Grau B, com espessuras de parede de 6,35mm para todos os diâmetros.

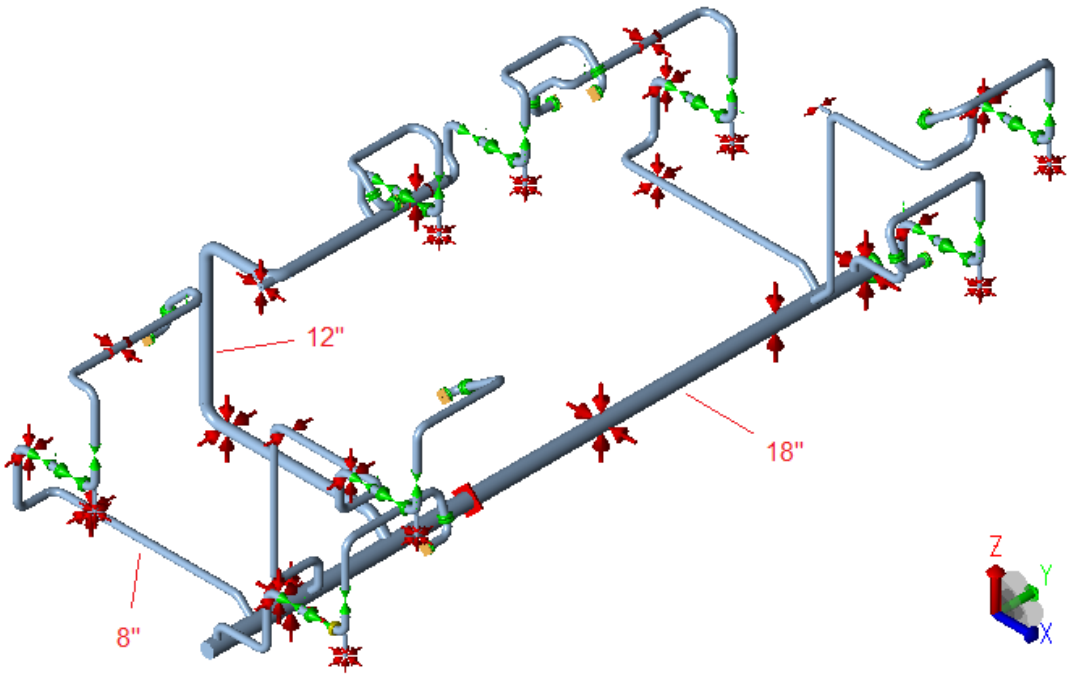


Fig. 51 Vista isométrica do sistema de alimentação de água. As tubulações sem indicação possuem diâmetro nominal de 8”. Fonte: (S/D).

Geralmente, são considerados oito casos de combinações algébricas dos vetores acelerações U1, U2 e U3, conforme demonstrado nos casos L12 ao L19.

Tabela 50 Casos de carregamentos – Aceleração crítica.

LINHA	TIPO	CASO DE CARREGAMENTO	COMBINAÇÃO
L1	HYD	WW+HP	-
L2	OPE	W+D1+T1+P1	-
L3	OPE	W+D2+T2+P2	-
L4	SUS	W+P1	-
L5	SUS	WIN1	-
L6	SUS	WIN2	-
L7	SUS	U1	-
L8	SUS	U2	-
L9	SUS	U3	-
L10	EXP	L2-L4	ALGÉBRICO
L11	EXP	L3-L4	ALGÉBRICO
L12	SUS	L7+L8+L9	ALGÉBRICO
L13	SUS	L7+L8-L9	ALGÉBRICO
L14	SUS	L7-L8+L9	ALGÉBRICO
L15	SUS	L7-L8-L9	ALGÉBRICO
L16	SUS	-L7+L8+L9	ALGÉBRICO
L17	SUS	-L7+L8-L9	ALGÉBRICO
L18	SUS	-L7-L8+L9	ALGÉBRICO
L19	SUS	-L7-L8-L9	ALGÉBRICO
L20	SUS	L7+L8+L9	SRSS

Cumprindo um dos objetivos desta dissertação que é o de avaliar os procedimentos de análise de projetos de engenharia já executados, e como já abordado no item 3.1.2 deste trabalho, verifica-se que a ordenação dos casos de carregamento desta análise foi desenvolvida sem a atenção necessária para o efeito das não linearidades, conforme exposto nas linhas L7, L8 e L9 da Tabela 50, onde os vetores das acelerações foram considerados isoladamente ao invés de serem combinados primeiramente com o caso de operação, para que, posteriormente, estes fossem subtraídos em uma combinação algébrica, conforme indicado na Tabela 51.

Tabela 51 - Casos de carregamentos – Aceleração crítica.

LINHA	TIPO	CASO DE CARREGAMENTO	COMBINAÇÃO/DESCRIÇÃO
L1	HYD	WW+HP	-
L2	OPE	W+D1+T1+P1	-
L3	OPE	W+D2+T2+P2	-
L4	SUS	W+P1	-
L5	SUS	WIN1	-
L6	SUS	WIN2	-
L7	SUS	W+D1+T1+P1+U1	-
L8	SUS	W+D1+T1+P1+U2	-
L9	SUS	W+D1+T1+P1+U3	-
L10	SUS	W+D2+T2+P2+U1	-
L11	SUS	W+D2+T2+P2+U2	-
L12	SUS	W+D2+T2+P2+U3	-

LINHA	TIPO	CASO DE CARREGAMENTO	COMBINAÇÃO/DESCRIÇÃO
L13	SUS	L7-L2	+U1
L14	SUS	L8-L2	+U2
L15	SUS	L9-L2	+U3
L16	SUS	L10-L2	+U1
L17	SUS	L11-L2	+U2
L18	SUS	L12-L2	+U3
L19	EXP	L2-L4	ALGÉBRICO
L20	EXP	L3-L4	ALGÉBRICO
L21	SUS	+L13+L14+L15	ALGÉBRICO
L22	SUS	+L13+L14-L15	ALGÉBRICO
L23	SUS	+L13-L14+L15	ALGÉBRICO
L24	SUS	+L13-L14-L15	ALGÉBRICO
L25	SUS	-L13+L14+L15	ALGÉBRICO
L26	SUS	-L13+L14-L15	ALGÉBRICO
L27	SUS	-L13-L14+L15	ALGÉBRICO
L28	SUS	-L13-L14-L15	ALGÉBRICO
L29	SUS	+L16+L17+L18	ALGÉBRICO
L30	SUS	+L16+L17-L18	ALGÉBRICO
L31	SUS	+L16-L17+L18	ALGÉBRICO
L32	SUS	+L16-L17-L18	ALGÉBRICO
L33	SUS	-L16+L17+L18	ALGÉBRICO
L34	SUS	-L16+L17-L18	ALGÉBRICO
L35	SUS	-L16-L17+L18	ALGÉBRICO
L36	SUS	-L16-L17-L18	ALGÉBRICO
L37	OCC	L21	SRSS
L38	OCC	L29	SRSS

Representam fatores de não linearidades na análise do sistema de tubulações apresentado na Figura 51:

- fator de atrito entre o suporte da tubulação e a estrutura;

- consideração de restrições em apenas um sentido, como por exemplo, apenas uma restrição vertical “+Y”, ao invés de uma restrição “+/-Y”;

- perda de apoio da tubulação - ocorre quando, devido à proximidade com um trecho vertical e à temperatura, a tubulação acaba não tendo contato com o suporte mais próximo.

Vale ressaltar, entretanto que, em atendimento ao apêndice G da norma DNV RP D-101 no sentido de que o resultado da raiz quadrada do somatório dos quadrados das tensões originadas pelas acelerações (SRSS – *Square Root Sum of Squares*) deve ser levado em consideração. A linha L20 da Tabela 50 demonstra esse caso. Diferentemente do que recomenda esta mesma norma, o resultado de tensão foi comparado à tensão admissível na

temperatura de projeto do material da tubulação (S_H), enquanto que a norma ASME B31.3 permite um acréscimo de 1,33 a esta tensão, por abordar este caso como ocasional.

A Tabela 52 traz os resultados de tensões encontrados para os casos das acelerações combinadas. Os casos listados na primeira coluna fazem referência à Tabela 50. Observa-se que os casos L14 e L17 apresentaram maiores níveis de tensões para o nó 1469, indicado na Figura 5.22.

Tabela 52 Resultados de tensões para as acelerações combinadas.

CASO	TENSÃO (KPa)	NÓ
L12	48505,0	2689
L13	47763,1	2689
L14	49232,4	1469
L15	49099,8	1469
L16	49099,8	1469
L17	49232,4	1469
L18	47763,1	2689
L19	48505,0	2689

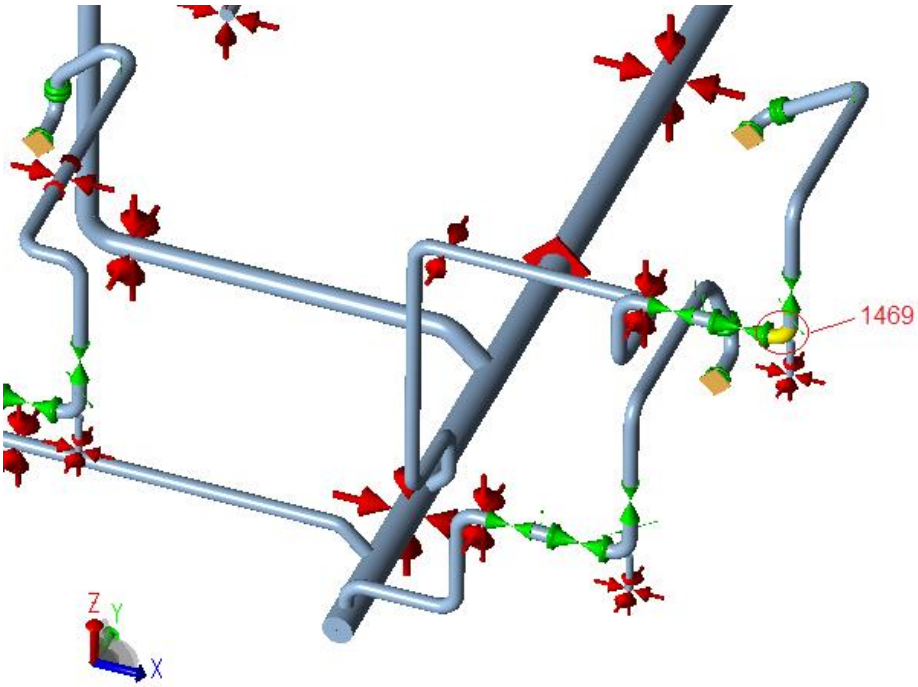


Fig. 52 Detalhe para o nó 1469, correspondente ao ponto médio da curva. Fonte: (S/D).

Os casos de fadiga para as acelerações combinadas são dispostos conforme a Tabela 53. Os casos de carregamento listados na terceira coluna fazem referência à Tabela 50. Um total de

18 milhões de ciclos para cada uma das 8 combinações de acelerações são considerados, totalizando 144 milhões de ciclos.

Tabela 53 -Casos de carregamentos de fadiga para as acelerações combinadas.

LINHA	TIPO	CASO DE CARREGAMENTO	COMBINAÇÃO	Nº CICLOS
L59	FAT	L2	ALGÉBRICO	7.000
L60	FAT	L12	ALGÉBRICO	18.000.000
L61	FAT	L13	ALGÉBRICO	18.000.000
L62	FAT	L14	ALGÉBRICO	18.000.000
L63	FAT	L15	ALGÉBRICO	18.000.000
L64	FAT	L16	ALGÉBRICO	18.000.000
L65	FAT	L17	ALGÉBRICO	18.000.000
L66	FAT	L18	ALGÉBRICO	18.000.000
L67	FAT	L19	ALGÉBRICO	18.000.000
L68	FAT	L20	ALGÉBRICO	18.000.000

O recurso de combinação máxima (MAX) do *software* identifica o caso de maior tensão entre os casos das acelerações combinadas (L12 ao L19). Dessa forma, todos os ciclos de repetições que o sistema estará submetido deverão estar atrelados a este caso máximo, conforme demonstrado na Tabela 54.

Tabela 54 - Caso de carregamento – Aceleração crítica.

LINHA	TIPO	CASO DE CARREGAMENTO	COMBINAÇÃO	Nº CICLOS
L59	FAT	L2	ALGÉBRICO	7.000
L60	FAT	L12,L13,L14,L15,L16,L17,L18,L19	MÁX	144.000.000

A consideração do caso crítico de aceleração para o procedimento simplificado de análise de fadiga é mais conservativa, conforme observado na Tabela 55, e reduz o número de casos de carregamentos em aproximadamente 110 linhas.

Tabela 55 Comparativo de resultados dos danos.

CASO	DANO	NÓ
8 COMBINAÇÕES	0,15	1469
$L_{CRÍTICO}$	0,20	1469

5.1.6 Arranjo com curva 1,5D X curva 5D

Neste estudo de caso buscou-se identificar a relação entre as variações do raio de uma conexão do tipo curva com o dano acumulado. Originalmente, o sistema de tubulações do estudo de caso aqui abordado adota curvas de raio longo, ou seja, igual a 1,5 vezes o seu diâmetro nominal, mais comumente utilizado em arranjos de tubulação.

Curvas com raio de curvatura de 5D são bastante utilizadas em sistemas pigáveis devido ao fato destas oferecerem menores restrições à passagem de elementos de limpeza ou inspeção na tubulação. O valor do raio destas curvas corresponde a 5 vezes o diâmetro nominal da tubulação. A Figura 53 mostra o sistema de tubulações original composto por linhas que transportam água com, principalmente, 4” de diâmetro nominal, fabricadas em aço carbono API 5L Grau B, com espessuras de parede de 6,02 mm.

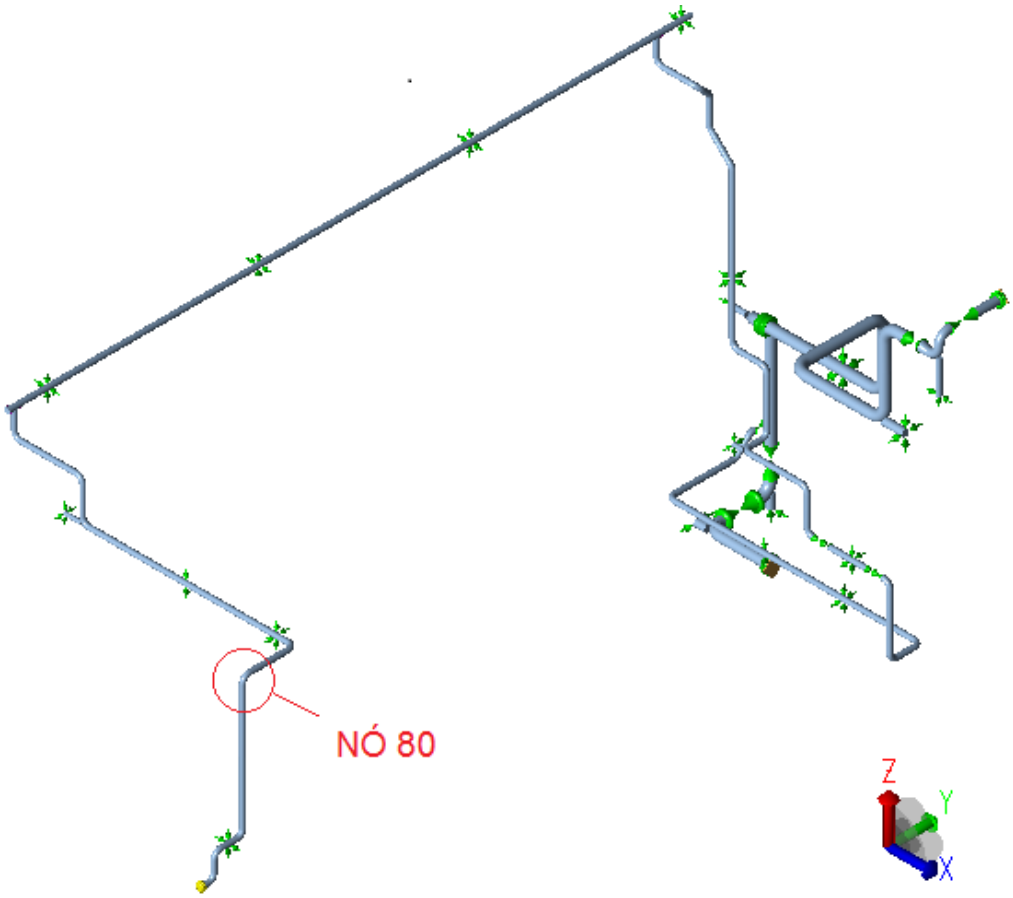


Fig. 53 Imagem isométrica do arranjo geral do sistema analisado. Detalhe para a curva do nó 80 de 4” de diâmetro nominal abordada neste estudo de caso. Fonte: (S/D).

A Figura 54 apresenta a aplicação da curva com 5 vezes o diâmetro com a modificação da curva no nó 80.

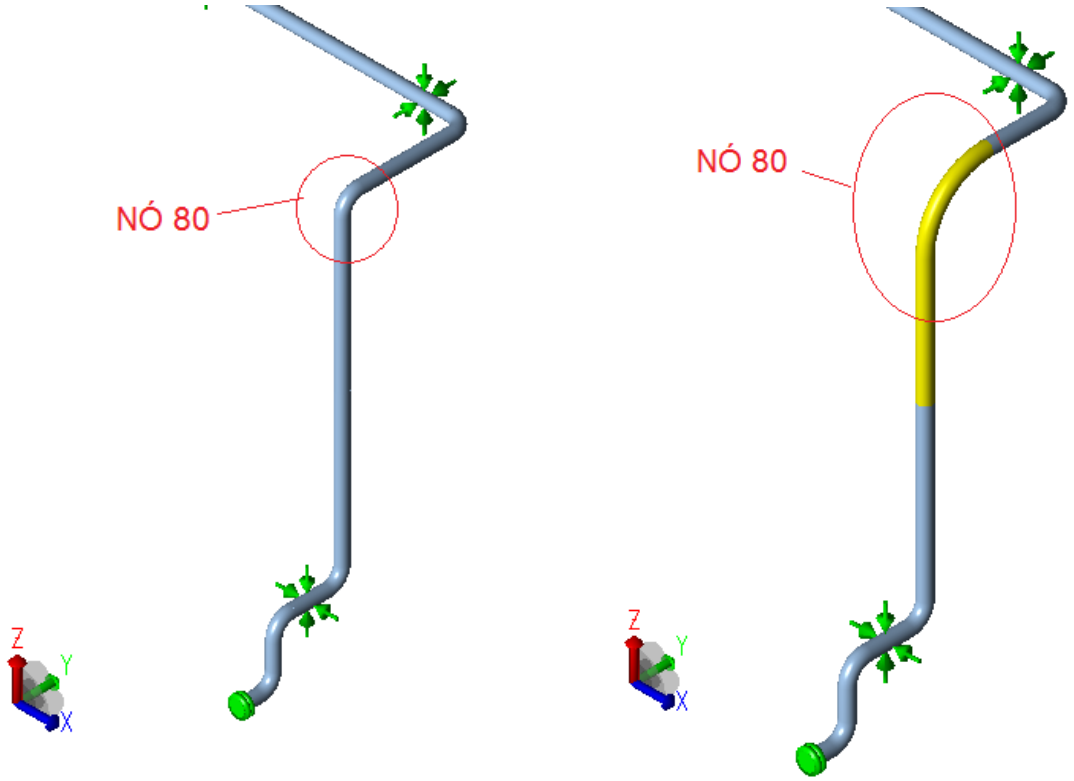


Fig. 54 Detalhe da diferença de raio de curvatura entre a curva de raio longo (à esquerda) e a curva 5D (à direita) representada no nó 80 da análise de flexibilidade para a linha com 4" de diâmetro nominal. Fonte: (S/D).

5.1.6.1 Determinação dos fatores SIF e K das curvas

Importante ressaltar que não há variação na determinação dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade entre as normas ASME B31.3 e ASME B31.J para a conexão do tipo curva forjada. A variação destes fatores depende exclusivamente do dimensionamento da curva.

De acordo com o apêndice D da norma ASME B31.3 de 2018, os fatores intensificadores de tensões e flexibilidade de uma curva forjada podem ser calculados a partir das seguintes equações.

Table D300 Flexibility Factor, *k*, and Stress Intensification Factor, *i*

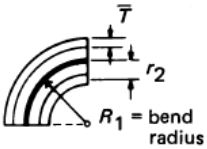
Description	Flexibility Factor, k	Stress Intensification Factor [Notes (1), (2)] Out-of-Plane, i_o	In-Plane, i_i	Flexibility Characteristic, h	Sketch
Welding elbow or pipe bend [Notes (1), (3)–(6)]	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.75}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	

Fig. 55 Equações para obtenção dos fatores intensificadores de tensão e flexibilidade de uma curva forjada (ASME B31.3, 2018). Fonte: S/D).

Tabela 56 Determinação dos fatores de flexibilidade e intensificação de tensões (SIF) para curva forjada.

FATOR	CURVA	
	1,5D	5D
K	5,27	1,58
SIF IN	1,95	1,0
SIF OUT	1,62	1,0

Fonte: (ASME B31.3, 2018).

Quanto maior o raio da curva, menor será a flexibilidade, e também, menor será a intensificação de tensões. De acordo com a norma ASME B31.3, o menor fator, seja ele qual for, deverá ser 1,0.

5.1.6.2 Resultados

Observa-se pelos resultados encontrados na Fig. 56 que, ao ser aumentado o raio de curvatura deste componente, este se torna mais rígido e o processo de fadiga é significativamente minimizado, devido à redução dos fatores de flexibilidade e intensificadores de tensões dentro e fora do plano da curva.

Apesar dos resultados, é importante ressaltar que uma menor flexibilidade gera maiores carregamentos, que serão transmitidos aos suportes e aos bocais dos equipamentos, os quais devem ser avaliados.

```
CAESAR II  CUMULATIVE USAGE

                                        From  Allow. Usage     To  Allow. Usage
Load Case                         Cycles  Node  Cycles Ratio   Node  Cycles Ratio

        ****      CUMULATIVE USAGE EVALUATION PASSED

        HIGHEST USAGE RATIO IS    0.08 AT NODE     79
        MINIMUM ALLOWABLE CYCLES IS   828737472

 CAESAR II  CUMULATIVE USAGE

                                        From  Allow. Usage     To  Allow. Usage
Load Case                         Cycles  Node  Cycles Ratio   Node  Cycles Ratio
CASE 64 (FAT) L64=L16          18000000    70 INFINTY   0.00     78 INFINTY   0.00
CASE 65 (FAT) L65=L17          18000000    70 INFINTY   0.00     78 INFINTY   0.00
CASE 66 (FAT) L66=L18          18000000    70 INFINTY   0.00     78 INFINTY   0.00
CASE 67 (FAT) L67=L19          18000000    70 INFINTY   0.00     78 INFINTY   0.00
CASE 68 (FAT) L68=L20          18000000    70 INFINTY   0.00     78 INFINTY   0.00
  TOTAL:                                   70            0.00     78           0.00

CASE 60 (FAT) L60=L2               7000    78********   0.00     79********   0.00
CASE 61 (FAT) L61=L13          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 62 (FAT) L62=L14          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 63 (FAT) L63=L15          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 64 (FAT) L64=L16          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 65 (FAT) L65=L17          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 66 (FAT) L66=L18          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 67 (FAT) L67=L19          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
CASE 68 (FAT) L68=L20          18000000    78 INFINTY   0.00     79 INFINTY   0.00
  TOTAL:                                   78            0.00     79           0.00
```

Fig. 56 Comparativo de resultados de dano acumulado extraído do software de análise de tensões CAESAR II. Fonte: (S/D).

Importante atentar também para a variação nos resultados de frequência natural do sistema. Como observado anteriormente, a curva de maior raio proporciona maior rigidez, logo, a frequência natural do sistema será aumentada, já que temos menores amplitudes de vibrações. A Tabela 57 resume as variações de resultados de dano acumulado e frequência natural de vibração.

Tabela 57 Comparativo de resultados – Curva 1,5D x 5D.

Raio de Curvatura	Nó	Dano Acumulado	Frequência Natural (Hz)
1,5D	79	0,08	4,03
5D	79	0,00 (vida infinita)	5,10

5.1.7 Comparativo entre configurações de *suportação* de sistemas de tubulações

A *suportação* das linhas é um aspecto que influencia diretamente a vida à fadiga de um sistema de tubulações. Quanto mais adequadamente suportado se encontrar o arranjo de tubulações, menores serão os efeitos causados pelas acelerações devido aos movimentos do FPSO e menores também serão as amplitudes de vibrações e, consequentemente, maior a frequência natural daquele sistema. Assim, neste estudo de caso, foi realizado um comparativo de danos do mesmo sistema de tubulações de distribuição de água apresentado no estudo de

caso 5.1.5, conforme mostra a Fig. 57, sendo considerado ora com *suportação* adequada, ora com *suportação* inadequada.

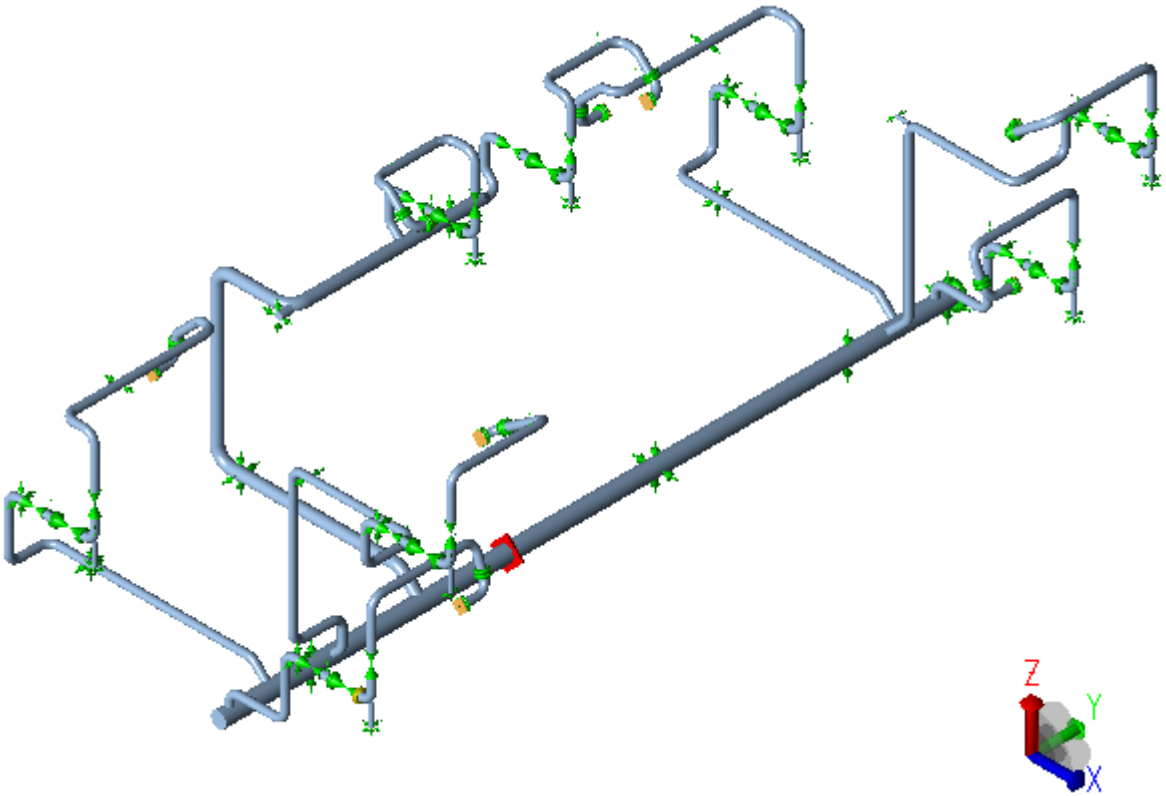


Fig. 57 Vista isométrica do arranjo geral do sistema de tubulações extraído do *software* CAESAR II. Fonte: (S/D).

A Figura 58 a seguir apresenta o arranjo adequadamente suportado, incluindo a indicação dos suportes originalmente considerados no arranjo de tubulações. Verifica-se de acordo com a Tabela 58 que o dano acumulado do sistema atende ao critério de análise de fadiga do projeto, cujo valor máximo é de 1,0.

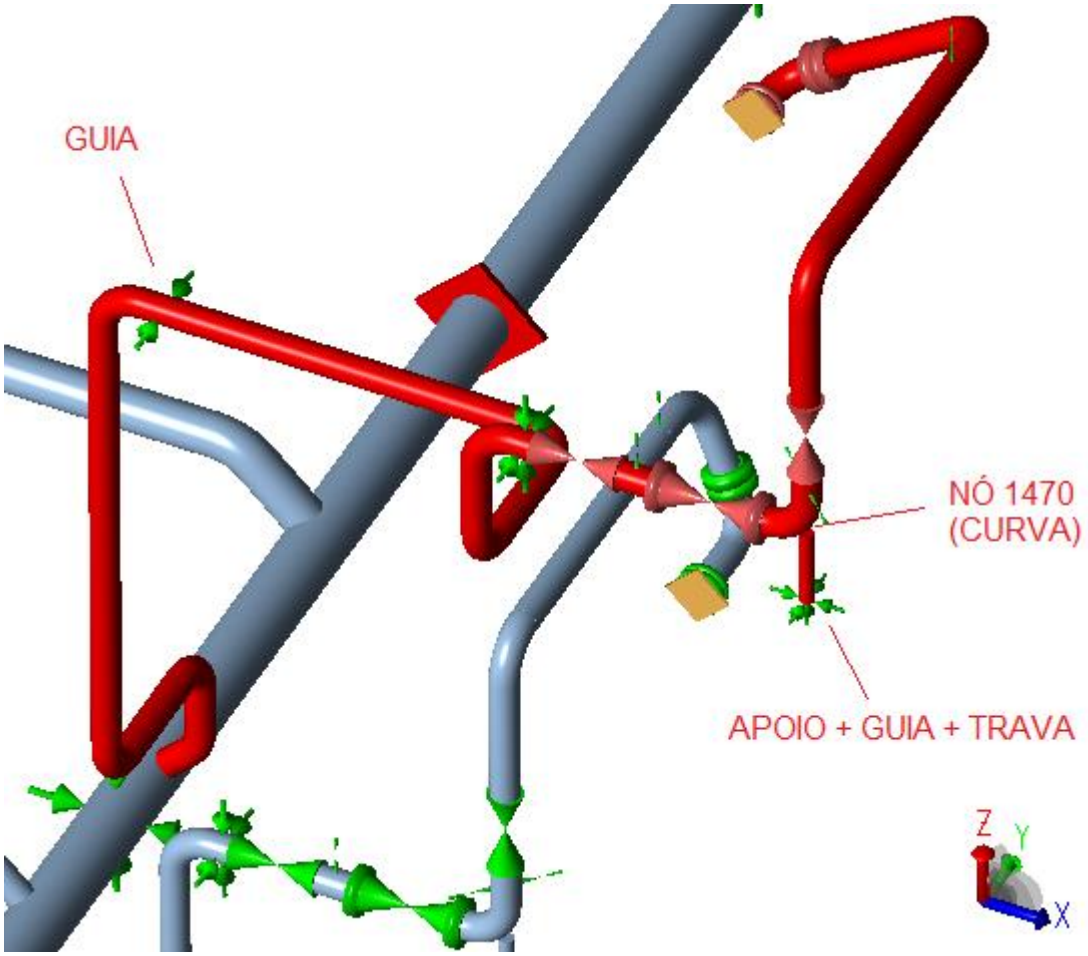


Fig. 58 Detalhe da tomada adequadamente suportada – Cenário 1. Fonte: (S/D).

Na Figura 59 é demonstrado um segundo cenário de análise, no qual é removida a trava localizada no "*trunnion*" soldado à curva forjada representada pelo nó 1470.

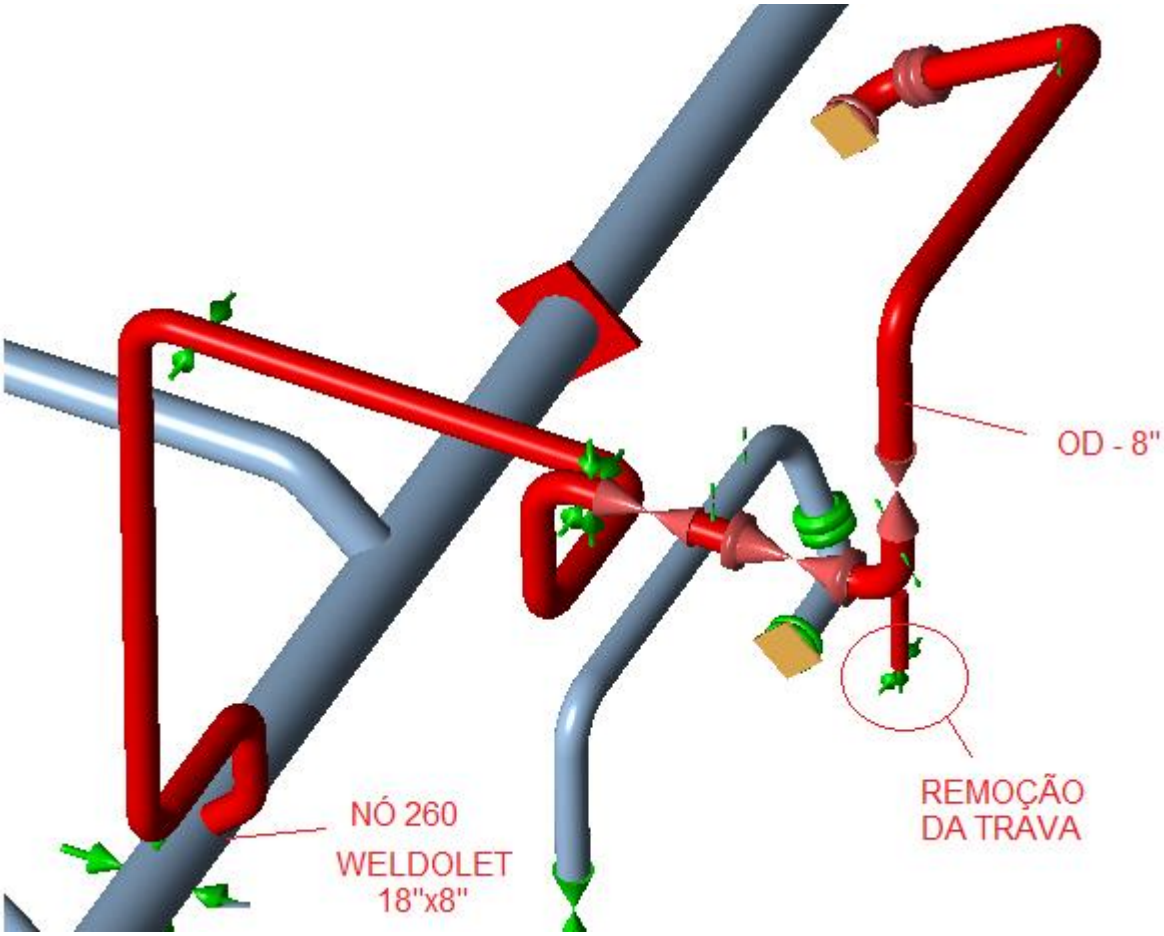


Fig. 59 Suporte tipo trava removido do trunnion soldado à curva forjada – Cenário 2. Fonte: (S/D).

Um terceiro cenário foi avaliado, agora contemplando além da remoção da trava do cenário 2, a remoção da guia próximo ao trecho vertical do arranjo, logo na interligação com a linha tronco, conforme pode ser observado na Figura 60.

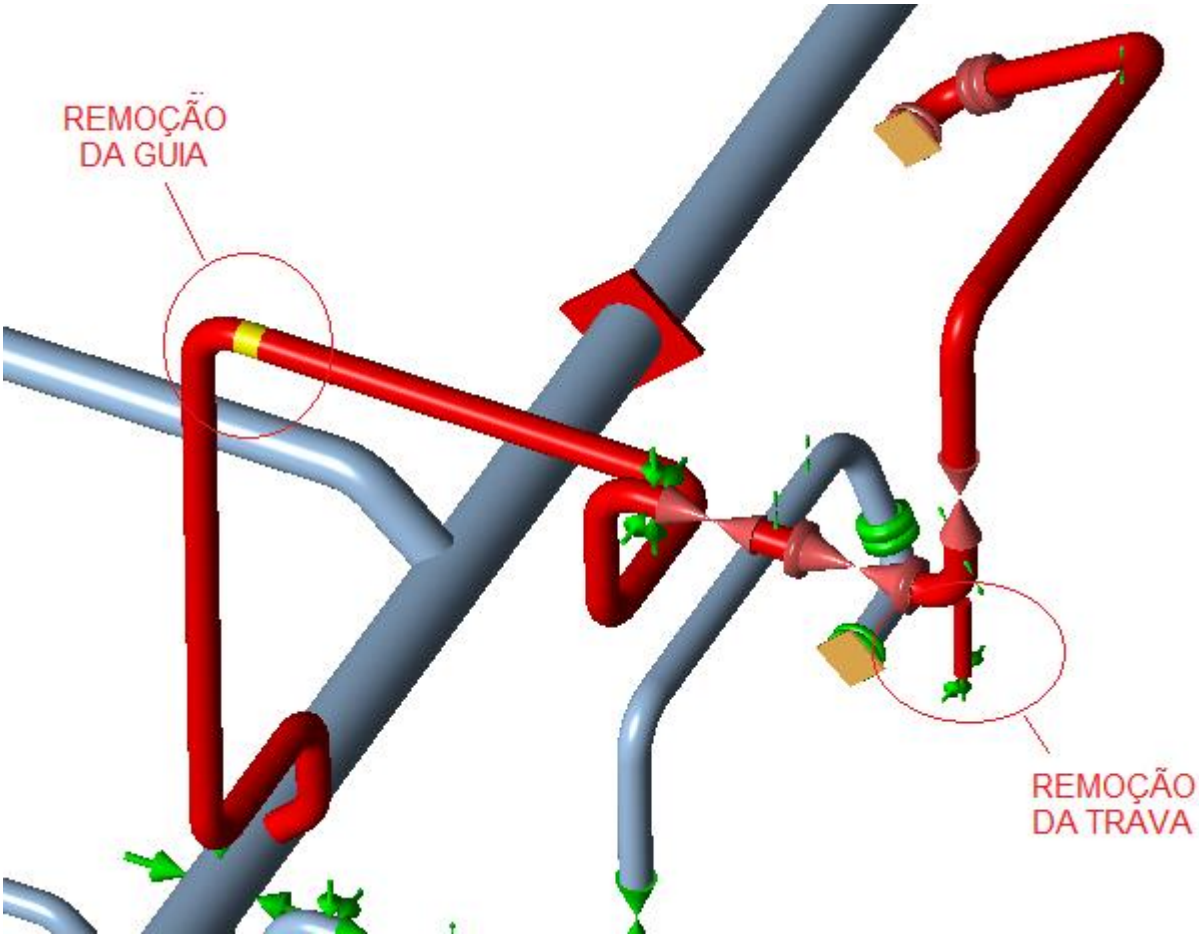


Fig. 60 Suporte tipo trava e guia removidos da tomada de água – Cenário 3. Fonte: (S/D).

Com as alterações contempladas nos cenários 2 e 3, o dano acumulado máximo deixou de ocorrer na curva que contém o *trunnion* soldado (nó 1469). Nestes casos, o componente mais solicitado à fadiga passou a ser a conexão do tipo *weldolet*, entre a linha tronco de 18” e a derivação de 8”. Observa-se que, de um cenário para o outro, o aumento do dano foi da ordem de 50%. Apesar disso, a frequência natural para o primeiro modo de vibração do sistema, não apresentou alteração. As Figuras 61 e 62 demonstram o aumento do dano entre estes cenários, bem como a indicação da conexão mais exigida.

```
CAESAR II  CUMULATIVE USAGE

                                        From  Allow. Usage     To  Allow. Usage
Load Case                         Cycles  Node  Cycles Ratio   Node  Cycles Ratio

        ****       CUMULATIVE USAGE EVALUATION PASSED

        HIGHEST USAGE RATIO IS     0.29 AT NODE    260
        MINIMUM ALLOWABLE CYCLES IS    51795028
```

```
CAESAR II  CUMULATIVE USAGE

                                        From  Allow. Usage     To  Allow. Usage
Load Case                         Cycles  Node  Cycles Ratio   Node  Cycles Ratio

          ****       CUMULATIVE USAGE EVALUATION PASSED

          HIGHEST USAGE RATIO IS    0.44 AT NODE    260
          MINIMUM ALLOWABLE CYCLES IS    51795028
```

Fig. 61 Na parte superior da figura, observa-se o dano acumulado para o Cenário 2, enquanto que a parte inferior refere-se ao Cenário 3. Fonte: (S/D).

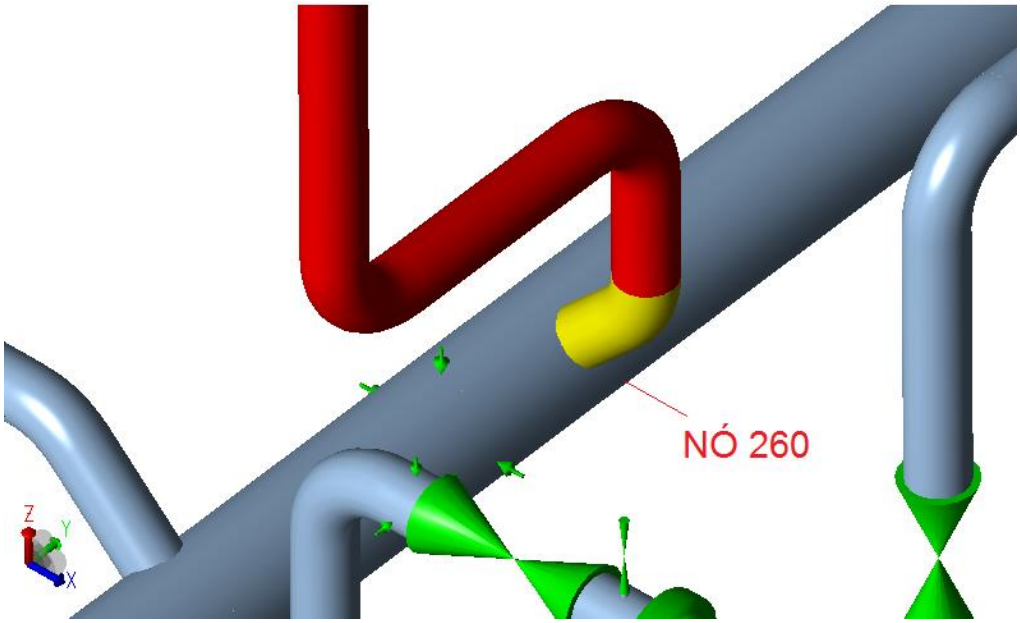


Fig. 62 Detalhe da conexão entre o header e a derivação. Fonte: (S/D).

A Tabela 58 traz um resumo dos resultados dos danos acumulados, bem como a contribuição do dano de cada fonte de fadiga, além das frequências naturais de vibração de todos os cenários apresentados. Observa-se que o sistema possui vida infinita quanto à fadiga térmica.

Tabela 58 Comparativo de resultados dos cenários estudados.

Suportação do Sistema	Nó	Fonte de Fadiga	Dano	Dano Acumulado	Frequência Natural (Hz)
Cenário 1	-	Térmica	0,00	0,15	5,20
	1469	Aceleração	0,15		
Cenário 2	-	Térmica	0,00	0,29	1,73
	260	Aceleração	0,29		
Cenário 3	-	Térmica	0,00	0,43	1,73
	260	Aceleração	0,43		

5.1.8 Sistema com peso da válvula triplicado

Conforme já conhecido, massas suspensas correspondem a pontos críticos no processo de fadiga. Assim, este estudo de caso busca avaliar a influência da massa dos acessórios da tubulação na intensificação da fadiga, ou seja, avaliar o efeito de grandes massas concentradas em sistemas de tubulações submetido a acelerações.

O sistema avaliado neste estudo de caso é o mesmo do estudo de caso 5.1.3. Corresponde às tubulações que se conectam aos *risers* de produção, que são linhas rígidas ou flexíveis que transportam hidrocarbonetos ou fluidos de injeção desde o poço até a plataforma, e vice-versa.

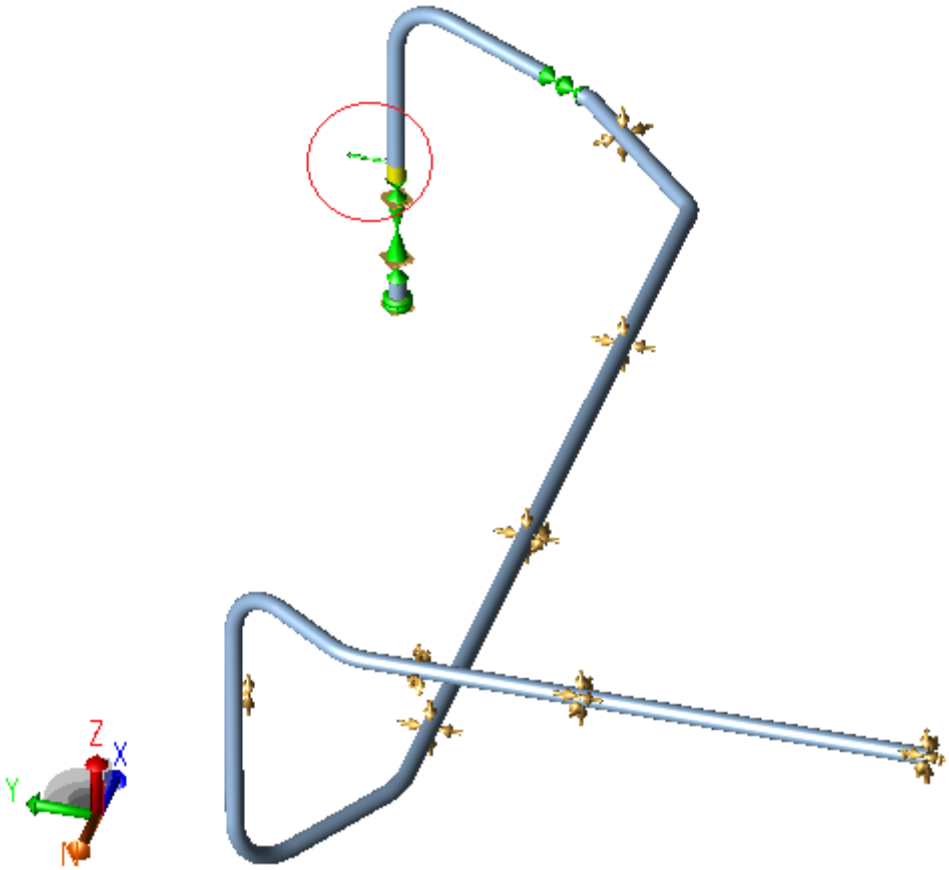


Fig. 63 Arranjo geral do sistema analisado extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D).

Conforme destacado na Figura 63, tomadas de instrumentação são necessárias para permitir a operação do sistema. Neste caso, a tomada possui diâmetro nominal de 1”, derivando de uma linha tronco de 8”.

Na Figura 64, observa-se o nó de ocorrência do maior dano identificado para a análise com o peso da válvula de 1” corretamente considerado. Verifica-se que o local mais solicitado quanto à fadiga é a solda do flange, no nó 3020 previamente indicado.

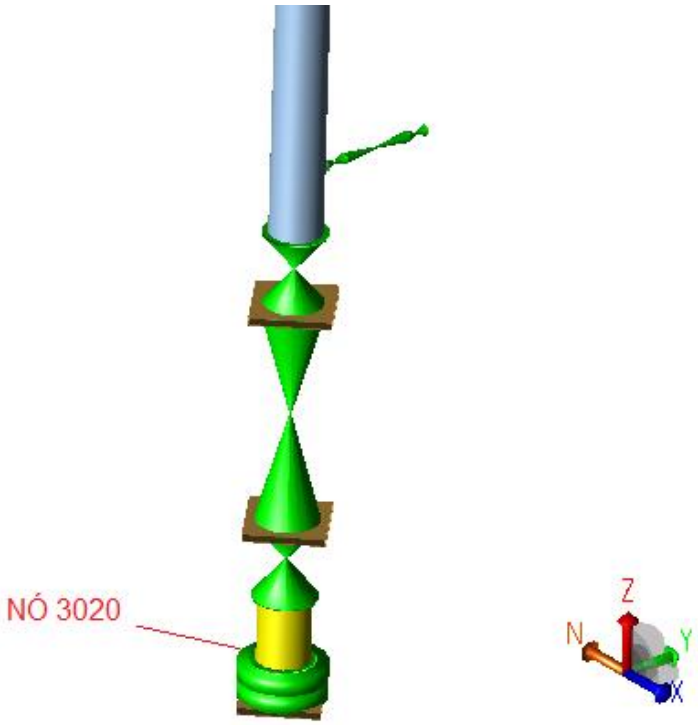


Fig. 64 Destaque para o nó 3020, ponto de ocorrência do maior dano da análise. Fonte: (S/D).

Para grandes variações entre os diâmetros entre a linha tronco e a derivação, é comum serem utilizadas conexões do tipo *weldolet* soldadas. Primeiramente, o tubo tronco é cortado de acordo com o dimensional da conexão que é posicionada e ponteada no local. Em seguida, o *weldolet* é soldado em toda a sua volta com penetração total e, finalmente, um cordão de solda de recobrimento é realizado, conforme recomenda a norma ASME B31.3.

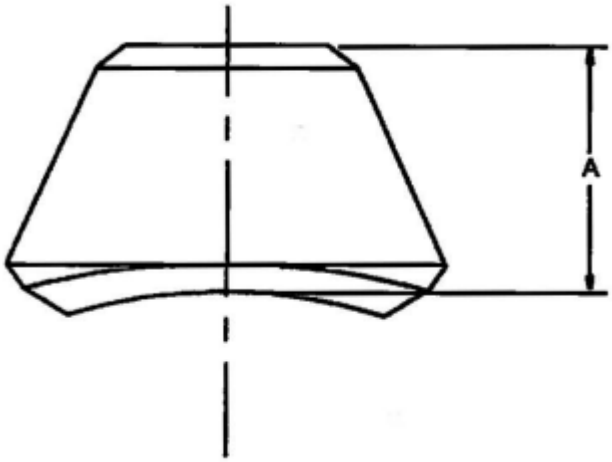


Fig. 65 Conexão tipo weldolet soldada (MSS_SP_97, 2012). Fonte: (S/D).

O peso da válvula destacada em amarelo na Figura 66 foi aumentado em três vezes. Além disso, a figura traz a indicação do nó 3065 do *weldolet* soldado à linha tronco.

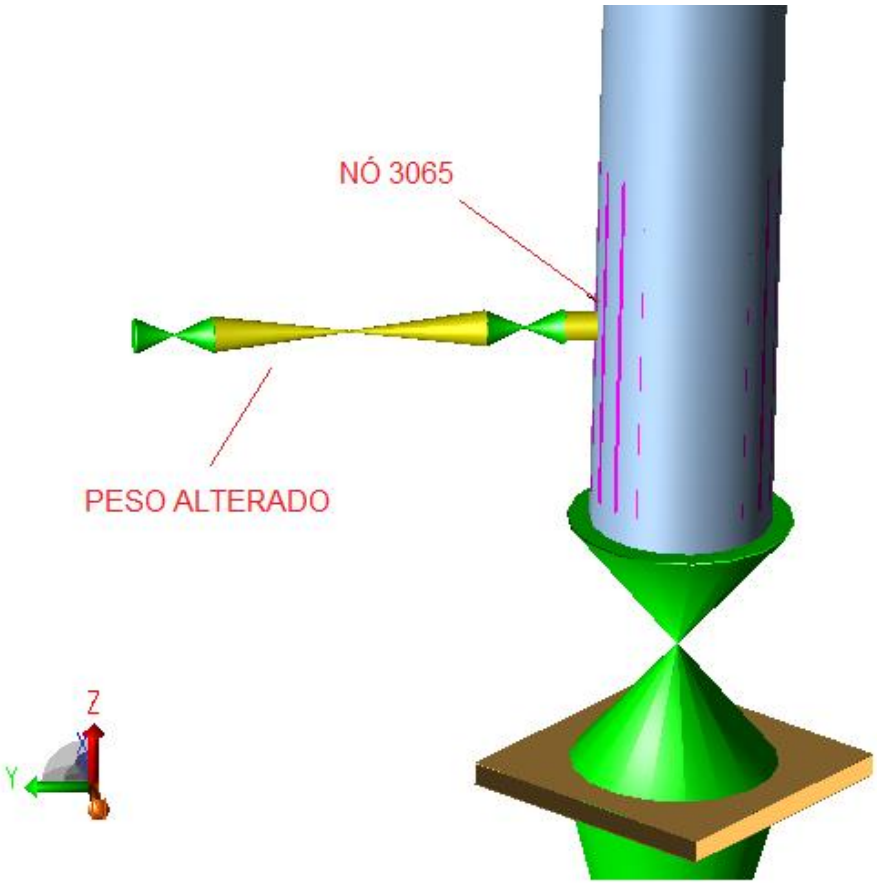


Fig. 66 Detalhe da tomada para a instrumentação de 1" derivando da linha tronco de 8". Fonte: (S/D).

A Tabela 5.35 apresenta um resumo dos resultados encontrados entre os dois cenários avaliados neste estudo de caso. Verifica-se um aumento significativo do dano que passou a ocorrer exatamente no *weldolet* da tomada de 1”. Além disso, observa-se a diminuição da frequência natural de vibração.

5.1.8.1 - Comparativos de Resultados

A Tabela 59 apresenta os resultados de dano acumulado para os dois casos analisados.

Tabela 59 Comparativo de resultados analisados.

Suportação do Sistema	Nó	Dano Acumulado	Frequência Natural (Hz)
Peso Válvula Normal	3020	0,48	8,33 – 1º modo (derivação)
Peso Válvula multiplicado por 3	3065	0,80	7,14 – 1º modo (derivação)

Normalmente existe uma preocupação em evitar a fadiga de pequenas derivações causadas pelo fenômeno de ressonância, em que a vibração da linha tronco normalmente excita o primeiro modo natural de vibração da derivação em frequências bem mais elevadas do que a frequência das ondas do mar. Este estudo de caso mostra que pequenas derivações podem estar sujeitas a fadiga de alto ciclo e baixa frequência, causadas simplesmente pelo movimento do FPSO.

5.1.9 Sistema conforme norma ASME B31.3 e norma ASME B31.J

Este estudo de caso busca comparar os resultados de danos de um acessório do tipo “tê de redução”, fabricado conforme norma ASME B16.9, com a utilização de fatores intensificadores de tensões segundo as normas ASME B31.3 e ASME B31.J, com o objetivo de analisar os efeitos dos novos fatores da ASME B31.J. Assim como apresentado no estudo de caso 5.1.5, este sistema de tubulações é responsável pela distribuição de água no módulo.

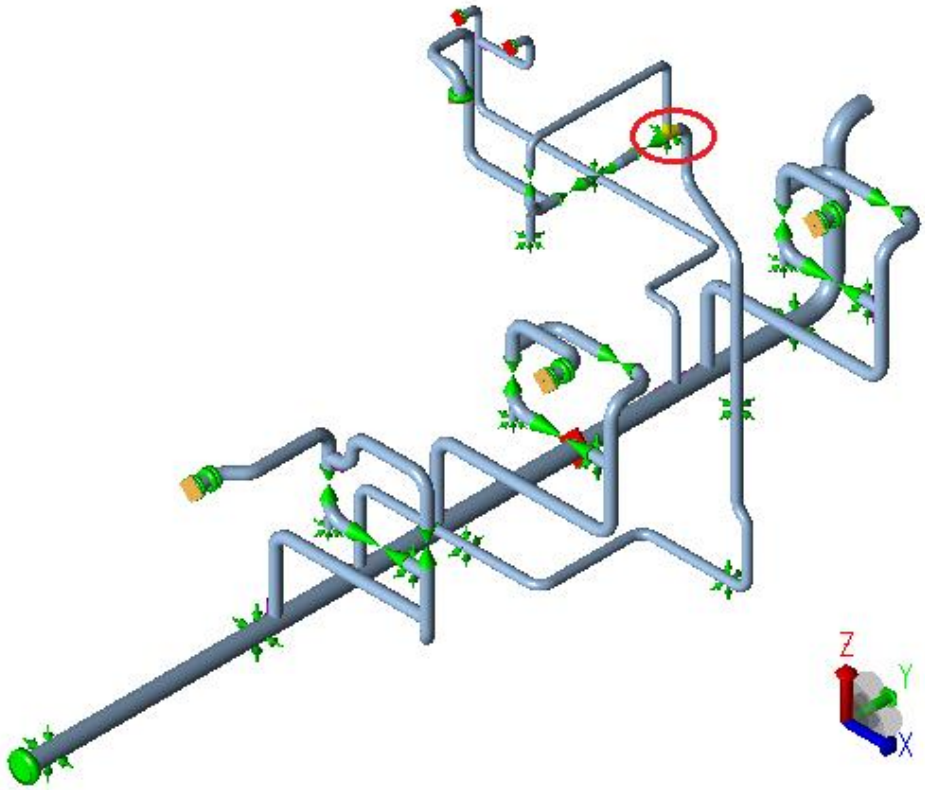


Fig. 67 Vista isométrica do arranjo geral do sistema de tubulações extraído do software CAESAR II. Fonte: (S/D).

O dimensional da conexão tipo “tê” de redução representado na análise de flexibilidade pelo nó 540 está informado na Tabela 60.

Tabela 60 Dimensional da conexão.

Linha	Diâmetro	Espessura
Tronco	8”	6,35 mm
Derivação	6”	7,11 mm

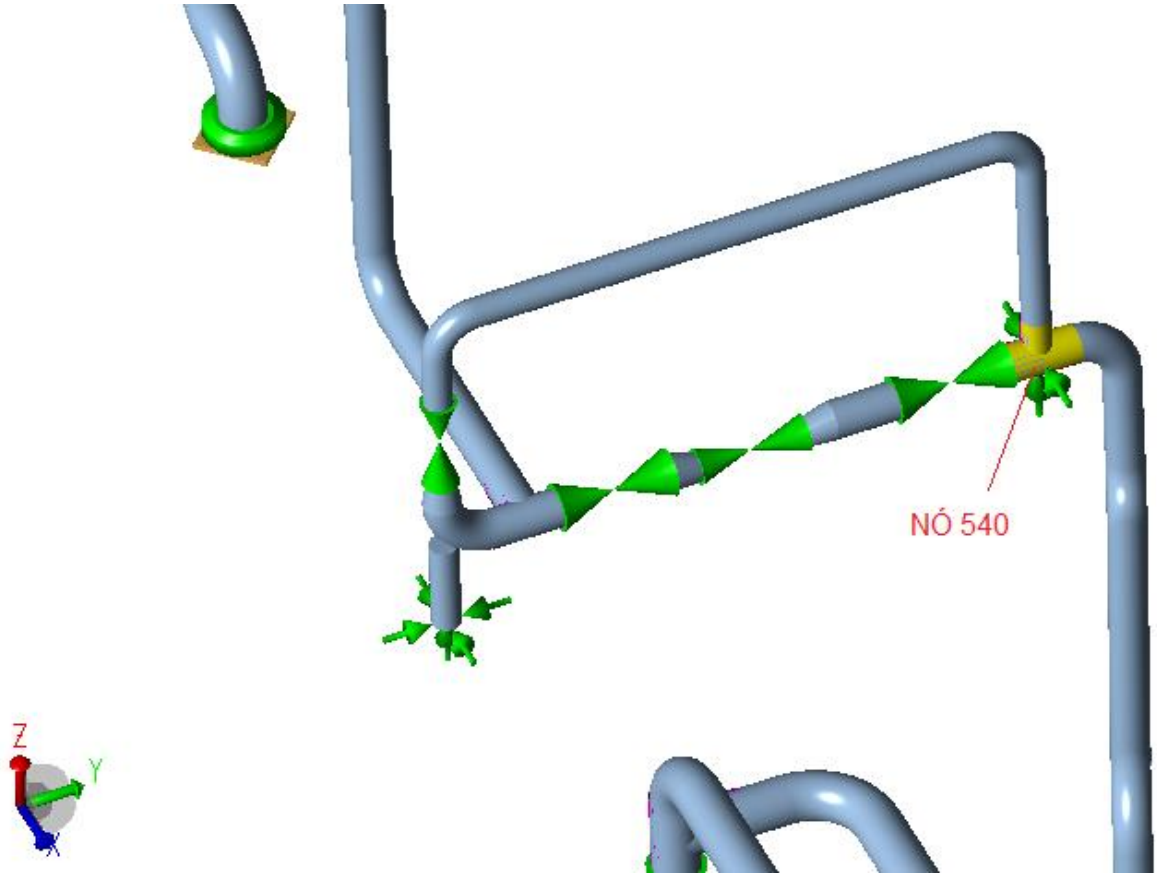


Fig. 68 Detalhe do "tê" de redução de 8"x 6" indicado em amarelo e representado pelo nó 540 da análise de flexibilidade (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D).

O maior dano da análise, considerando os fatores intensificadores de tensões do "tê" de redução conforme a norma ASME B31.3, ocorreu próximo a um *by-pass* vertical desprovido de *suportação* no trecho mais elevado da tubulação, o que propicia o processo de fadiga.

5.1.9.1 - Determinação dos fatores conforme ASME B31.3.

A Figura 69 foi extraída do *output* do *software* CAESAR II e traz os fatores intensificadores de tensões considerados pelo programa, conforme o código ASME B31.3. Observa-se que de acordo com esta norma, os fatores são os mesmos tanto para a linha tronco quanto para a derivação.

Miscellaneous REPORT, Miscellaneous Data Items

TEE	TYPE	HEADER SIFo (these values per Code)	HEADER SIFi	Eff BRANCH THICK mm.	BRANCH SIFo	BRANCH SIFi
50	3	4.22223	3.41667	6.35000	4.22223	3.41667
70	3	4.22223	3.41667	6.35000	4.22223	3.41667
80	3	4.22223	3.41667	6.35000	4.22223	3.41667
110	5	4.04986	4.04986	6.35000	4.04986	4.04986
120	3	4.22223	3.41667	6.35000	4.22223	3.41667
200	3	3.22216	2.66662	0.00000	3.22216	2.66662
260	3	3.22216	2.66662	0.00000	3.22216	2.66662
540	3	2.77126	2.32845	6.35000	2.77126	2.32845
660	3	2.77126	2.32845	0.00000	2.77126	2.32845
770	3	3.22216	2.66662	0.00000	3.22216	2.66662

Fig. 69 Detalhe dos fatores SIF's considerados para a linha tronco e derivação pelo software CAESAR II, conforme a norma ASME B31.3. Fonte: (S/D).

5.1.9.2 - Determinação dos SIF's conforme ASME B31.J

A fim de avaliar possíveis divergências entre resultados de fatores intensificadores de tensões, estes foram calculados conforme novas equações contempladas nas normas ASME B31.J. Na Tabela 61 é apresentado um comparativo dos resultados de fatores intensificadores de tensões obtidos para a norma ASME B31.3 e ASME B31.J.

Tabela 61 Comparativo entre SIF's (ASME B31.3 x ASME B31.J).

Fator	ASME B31.3	ASME B31.J
Tronco - SIF $_{IN}$	2,32	2,03
Tronco - SIF $_{OUT}$	2,77	1,00
Derivação - SIF $_{IN}$	2,32	2,22
Derivação - SIF $_{OUT}$	2,77	2,59

5.1.9.3 - Aplicação dos fatores determinados de acordo com a ASME B31.J

Por se tratar de um "tê" de redução, os valores de SIF de cada diâmetro devem ser computados no *software* de forma individual. Na Figura 70 são mostrados os valores de *SIF* para a linha tronco, enquanto a Figura 71 traz os valores de *SIF* computados para a derivação.

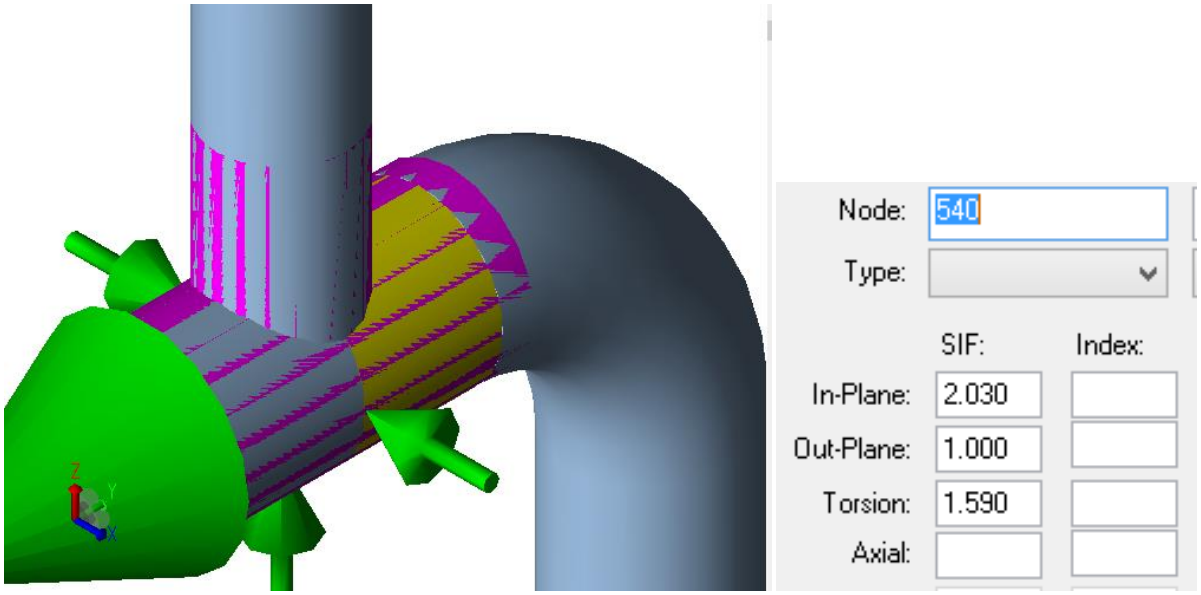


Fig. 70 Input de fatores no software conforme ASME B31.J para a linha tronco (CAESAR II, 2014).

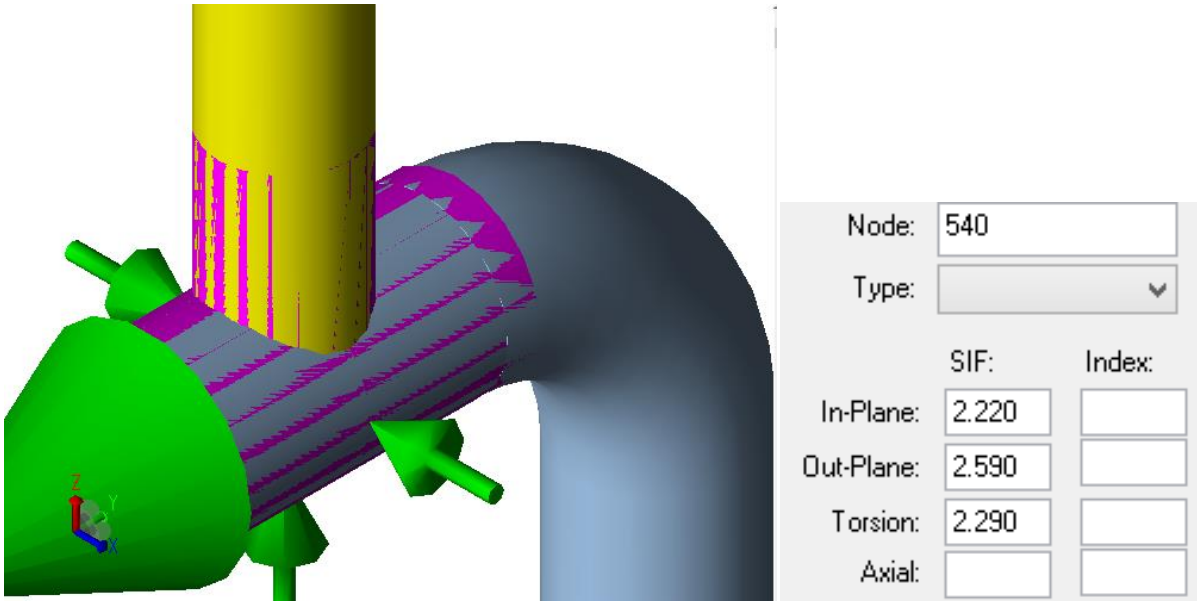


Fig. 71 Input de fatores no *software* conforme ASME B31.J para a derivação (CAESAR II, 2014).

5.1.9.4 - Comparativos entre danos por fadiga

Conforme mostra a Tabela 62, conclui-se que a atualização do fator intensificador de tensão conforme a norma ASME B31.J levou a uma redução do resultado do dano acumulado na conexão representada pelo nó 540 da análise de flexibilidade, indicando que este componente não terá problemas de fadiga ao longo da vida útil do projeto.

Tabela 62 Comparativo de resultados analisados.

Suportação do Sistema	Nó	Dano Acumulado
ASME B31.3	540	0,12
ASME B31.J	540	0,00 – Vida Infinita

Importante ressaltar que a alteração demonstrada neste estudo de caso pode parecer um conservadorismo da norma ASME B31.3, devido à obtenção de SIF's maiores do que os da ASME B31.J. Entretanto, a alteração identificada poderia ter ocorrido no sentido de aumentar o fator SIF, e, consequentemente, o dano à fadiga, o que leva à necessidade de que esta atualização seja realizada em todos os sistemas de tubulações suscetíveis a muitos ciclos de carregamentos, como é o caso das tubulações *offshore*.

5.1.10 Combinações de Casos de Carregamento – Acelerações (efeito da não linearidade)

Este estudo de caso busca identificar a variação de resultados de tensões encontradas em diferentes combinações de casos de carregamentos devido aos efeitos de não linearidades. Uma vez combinados de maneira inadequada, a ordenação dos casos de carregamentos influencia o resultado de tensões de uma análise de flexibilidade. Alguns exemplos de efeitos não lineares correspondem a:

- fator de atrito entre o suporte da tubulação e a estrutura;

- consideração de folga (*gap*) que permitem a tubulação um determinado deslocamento até tocar o suporte;

- consideração de restrições em apenas um sentido, como por exemplo, uma restrição vertical +Y, ao invés de uma restrição +/-Y;

- perda de apoio da tubulação - ocorre quando, devido à proximidade com um trecho vertical e a temperatura, a tubulação acaba não tendo contato com o suporte mais próximo.

Um exemplo de ordenação inadequada de casos de carregamento é descrito na Tabela 63.

Tabela 63 Caso de carregamento suscetível ao efeito de não linearidades.

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L1	WW+HP	HYD	-	HYDROSTATIC TEST
L2	W+T1+P1	OPE	-	DESIGN CONDITION
L3	W+T2+P2	OPE	-	OPERATION CONTION
L4	W+P1	SUS	-	SUSTAINED LOADS
L5	W+P2	SUS	-	SUSTAINED LOADS
L6	WIN1	SUS	-	WIND CONDITION 1

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L7	WIN2	SUS	-	WIND CONDITION 2
L8	U1	SUS	-	ACCELERATION IN DIRECTION X
L9	U2	SUS	-	ACCELERATION IN DIRECTION Y
L10	U3	SUS	-	ACCELERATION IN DIRECTION Z
L11	L2-L4	EXP	-	THERMICAL DESIGN CONDITION
L12	L3-L5	EXP	-	THERMICAL OPERATION CONDITION
L13	L11-L12	EXP	-	FULL STRESS RANGE
L14	L8+L9+L10	SUS	-	COMBINED ACCELERATIONS
L15	L8+L9-L10	SUS	-	
L16	L8-L9+L10	SUS	-	
L17	L8-L9-L10	SUS	-	
L18	-L8+L9+L10	SUS	-	
L19	-L8+L9-L10	SUS	-	
L20	-L8-L9+L10	SUS	-	
L21	-L8-L9-L10	SUS	-	
L22	L8+L9+L10	SUS	-	COMBINED ACCELERATIONS (SRSS METHOD)
L23	L2+L6	OPE	-	DESIGN LOADS FOR RESTRAINT AND EQUIPMENT NOZZLES, COMBINATION: WEIGHT, PRESSURE, TEMPERATURE, NOZZLE DISPLACEMENTS AND WIND.
L24	L3+L6	OPE	-	
L25	L2+L7	OPE	-	
L26	L3+L7	OPE	-	
L27	L23+L14	OPE	-	DESIGN LOADS FOR RESTRAINT AND EQUIPMENT NOZZLES, COMBINATION: WEIGHT, PRESSURE, TEMPERATURE, NOZZLE DISPLACEMENTS, WIND AND ACCELERATIONS
L28	L23+L15	OPE	-	
L29	L23+L16	OPE	-	
L30	L23+L17	OPE	-	
L31	L23+L18	OPE	-	
L32	L23+L19	OPE	-	
L33	L23+L20	OPE	-	
L34	L23+L21	OPE	-	
L35	L24+L14	OPE	-	
L36	L24+L15	OPE	-	
L37	L24+L16	OPE	-	
L38	L24+L17	OPE	-	
L39	L24+L18	OPE	-	
L40	L24+L19	OPE	-	
L41	L24+L20	OPE	-	
L42	L24+L21	OPE	-	
L43	L25+L14	OPE	-	
L44	L25+L15	OPE	-	
L45	L25+L16	OPE	-	
L46	L25+L17	OPE	-	
L47	L25+L18	OPE	-	
L48	L25+L19	OPE	-	
L49	L25+L20	OPE	-	
L50	L25+L21	OPE	-	
L51	L26+L14	OPE	-	
L52	L26+L15	OPE	-	
L53	L26+L16	OPE	-	
L54	L26+L17	OPE	-	
L55	L26+L18	OPE	-	
L56	L26+L19	OPE	-	
L57	L26+L20	OPE	-	
L58	L26+L21	OPE	-	
L59	L4+L22+L6	OCC	-	WEIGHT, PRESSURE, ACCELERATIONS AND WIND IN CONDITION 1
L60	L4+L22+L7	OCC	-	WEIGHT, PRESSURE, ACCELERATIONS AND WIND IN CONDITION 2

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L61	L2	FAT	7000	CASES FOR ACCUMULATIVE FATIGUE CHECK
L62	L14	FAT	18000000	
L63	L15	FAT	18000000	
L64	L16	FAT	18000000	
L65	L17	FAT	18000000	
L66	L18	FAT	18000000	
L67	L19	FAT	18000000	
L68	L20	FAT	18000000	
L69	L21	FAT	18000000	
L70	L27,L28,L29,L30,L31,L32,L33,L34,L35, L36,L37,L38,L39,L40,L41, L42,L43	OPE	-	MAXIMUM OF THE COMBINED LOAD CASES
L71	L44,L45,L46,L47,L48,L49,L50,L51,L52, L53,L54,L55,L56,L57,L58	OPE	-	

Observa-se que os vetores das acelerações foram considerados isoladamente nos casos L8, L9 e L10, e, posteriormente, combinados entre si com alternância de sinais nos casos de carregamentos do L14 ao L21, ao contrário do que entende-se ser a maneira mais adequada de combinação de casos de carregamentos apresentada na Tabela 17 do item 2.1.2.7 desta dissertação.

A fim de determinar as divergências de resultados para os dois cenários, neste estudo de caso foi avaliado o resultado de três diferentes análises, nas quais os casos de carregamento foram combinados, ora da maneira menos suscetível às imprecisões de resultados devido aos efeitos não lineares, ora da maneira mais suscetível às imprecisões de resultados devido aos efeitos não lineares. Importante registrar que combinações de casos de carregamentos inadequadas foram, inclusive, identificadas nos projetos de engenharia já avaliados nos estudos de caso anteriores.

A primeira análise contempla todas as linhas que fazem parte do sistema de processo do módulo M-01 de determinado FPSO, conforme apresentado na Figura 72.

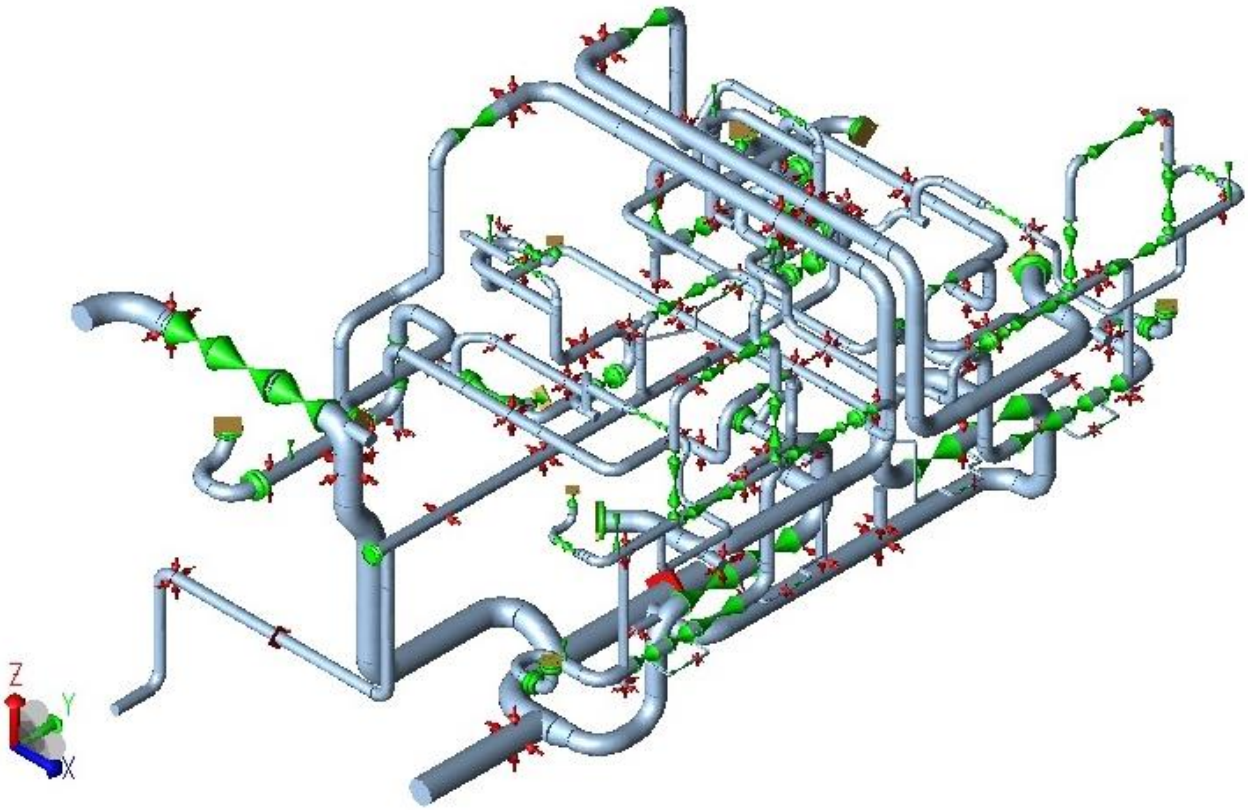


Fig. 72 Vista isométrica do sistema de processo – Análise 1 (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D).

O sistema de *flare* de baixa temperatura foi escolhido e é contemplado na segunda análise abordada neste item, conforme a Figura 73.

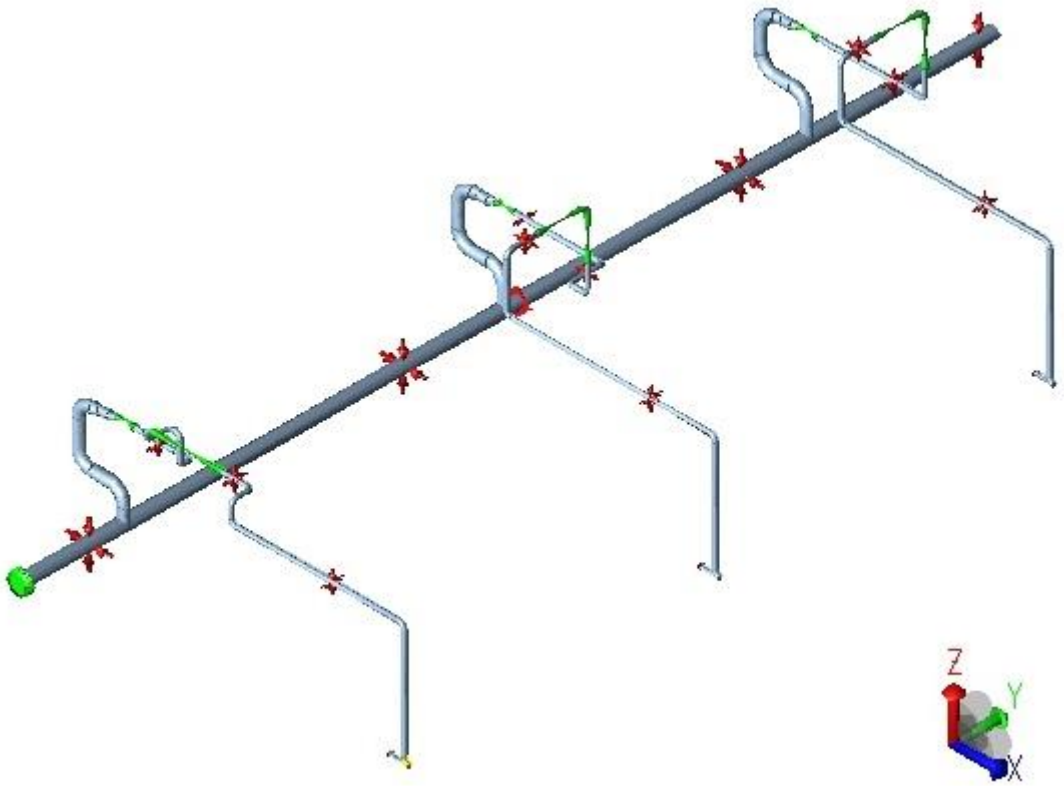


Fig. 73 Vista isométrica do sistema de flare de baixa – Análise 2 (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D).

A terceira análise corresponde ao sistema de *flare* de alta pressão do módulo M-04, conforme Figura 74.

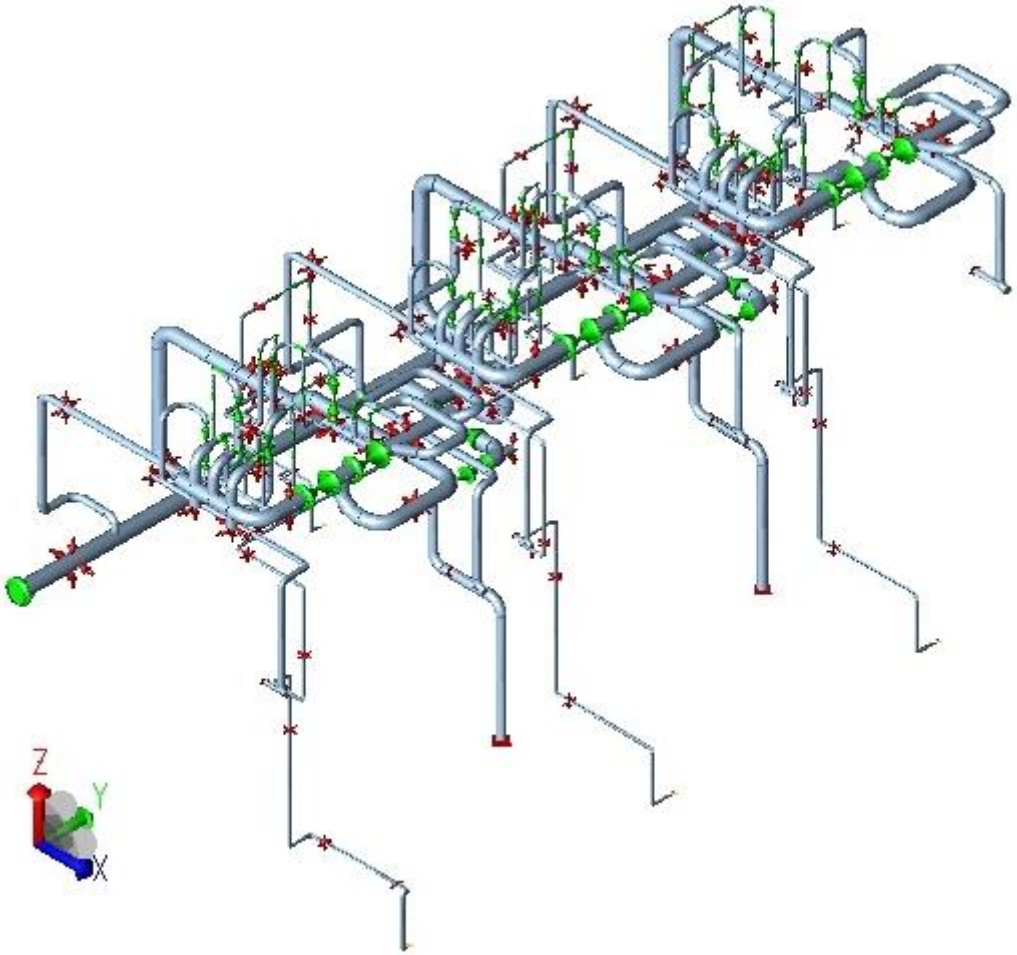


Fig. 74 Vista isométrica do sistema de flare de alta pressão – Análise 3 (CAESAR II, 2014). Fonte: (S/D).

Os casos de carga L19 ao L27 das Tabelas 63, 64 e 65 correspondem à combinação não adequada dos casos de carregamento, ou seja, bastante suscetíveis às influências das não linearidades do cálculo. Os casos de carregamentos L83 ao L91 representam a combinação adequada dos casos. As Tabelas 64, 65 e 66, trazem as variações de resultados para o caso SUS (sustentação) para as três análises realizadas.

Tabela 64 Comparativo de resultados de tensões – Análise 1.

ANÁLISE 1						
NÃO RECOMENDADA			RECOMENDADA			% DE VARIAÇÃO
CASO	% DE TENSÃO	NÓ	CASO	% DE TENSÃO	NÓ	
L19	36,3	3989	L83	36,8	3989	0,5
L20	40,1	4389	L84	31,5	465	8,6
L21	38,5	125	L85	64,6	125	26,1
L22	40,8	3989	L86	59,0	465	18,2
L23	40,8	3989	L87	48,6	125	7,8
L24	38,5	125	L88	60,1	125	21,6
L25	40,1	4389	L89	34,7	4389	5,4
L26	36,3	3989	L90	58,7	465	22,4

ANÁLISE 1						
NÃO RECOMENDADA			RECOMENDADA			% DE VARIAÇÃO
CASO	% DE TENSÃO	NÓ	CASO	% DE TENSÃO	NÓ	
L27	29,7	125	L91	41,8	125	12,1

Tabela 65 Comparativo de resultados de tensões – Análise 2.

ANÁLISE 2						
NÃO RECOMENDADA			RECOMENDADA			% DE VARIAÇÃO
CASO	% DE TENSÃO	NÓ	CASO	% DE TENSÃO	NÓ	
L19	17,8	350	L83	18,0	350	0,2
L20	17,4	125	L84	20,4	125	3,0
L21	18,0	720	L85	18,5	125	0,5
L22	17,0	125	L86	17,1	125	0,1
L23	17,0	125	L87	16,9	125	0,1
L24	18,0	720	L88	20,7	125	2,7
L25	17,4	125	L89	18,4	125	1,0
L26	17,8	350	L90	18,0	350	0,2
L27	16,2	125	L91	17,7	125	1,5

Tabela 66 Comparativo de resultados de tensões – Análise 3.

ANÁLISE 3						
NÃO RECOMENDADA			RECOMENDADA			% DE VARIAÇÃO
CASO	% DE TENSÃO	NÓ	CASO	% DE TENSÃO	NÓ	
L19	48,2	1310	L83	53,7	1310	35,7
L20	49,3	1310	L84	55,6	1310	35,2
L21	51,2	1310	L85	45,9	1310	27,4
L22	49,7	1310	L86	43,3	1310	26,2
L23	49,7	1310	L87	46,9	1310	30,0
L24	51,2	1310	L88	49,3	1310	28,6
L25	49,3	1310	L89	51,2	1310	32,8
L26	48,2	1310	L90	49,2	1310	31,2
L27	49,6	1310	L91	49,9	1310	32,2

Em comum para as três análises apresentadas neste estudo de caso, tem-se basicamente o atrito como o efeito da não linearidade recorrente. Como pode ser observado nas Figuras 72, 73 e 74, as restrições verticais unidirecionais do tipo +Z são evitadas, por também contribuírem para o efeito da não linearidade. Assim, por mais que a suportação aplicada fisicamente na tubulação seja somente apoiada, não restringindo o movimento vertical para cima, as restrições são representadas no *software* como Z pleno (bidirecional).

De acordo com os resultados apresentados na Tabelas 64, 65 e 66, observa-se que o percentual de variação de tensão para a Análise 2 foi significativamente menor do que o percentual das demais análises devido ao menor tamanho do sistema analisado, e consequentemente, menor quantidade de suportes (atrito).

Conclui-se que a variação de resultados chega à ordem de 35,2%, o que, consequentemente, significa uma alteração significativa de resultados no cálculo do dano total

acumulado. De acordo com a avaliação dos projetos de engenharia já executados, observou-se que determinados casos de carregamentos foram combinados de forma não adequada, ou seja, mais suscetíveis aos efeitos da não linearidade do cálculo.

CAPÍTULO VI

6.1 PROPOSTAS DE PROCEDIMENTOS DE PROJETO À FADIGA DE TUBULAÇÕES

A definição dos casos de carregamentos de uma análise de tensões é um dos pontos chaves para a elaboração do estudo de flexibilidade de tubulações. Quanto mais bem arquitetados, no sentido de abranger todas, ou a maioria, das condições sujeitas a ocorrer ao longo de toda a vida útil do sistema de tubulações, levando em consideração os fenômenos operacionais, tais como: deslocamentos impostos por equipamentos, condições de escoamento, abertura de uma válvula de alívio, combinações térmicas operacionais, entre outros, bem como, a consideração dos efeitos relacionados ao fato do sistema estar contido em um navio submetido às ações das ondas do mar, mais precisa será a análise de flexibilidade. Consequentemente, a maior precisão deste estudo leva à maior proximidade dos resultados no campo.

Resumidamente, os casos de carregamentos buscam contemplar todas as condições de processo e esforços aos quais um determinado sistema de tubulação estará submetido, incluindo-se a necessidade da consideração das fontes de fadiga devido às acelerações, deslocamentos estruturais e temperatura.

Como já comentado anteriormente, a proposição de uma metodologia padrão específica para o cálculo de fadiga de sistemas de tubulação de plataformas de petróleo é o principal objetivo desta dissertação. A partir desta, espera-se alcançar uma significativa redução de horas de execução de projetos de engenharia com métodos ainda conservadores de avaliação de fadiga, além do ganho significativo na otimização de arranjo e *suportação* dos sistemas de tubulações.

Neste capítulo serão apresentados dois critérios de análise. O primeiro refere-se ao critério de acúmulo de dano, comumente utilizado nos projetos de Engenharia executados até os dias atuais, entretanto, com a aplicação de alguns artifícios que buscam um maior refinamento dos resultados de dano acumulado.

O segundo procedimento, corresponde ao critério de avaliação de fadiga baseado em tensão admissível. Com base nas investigações realizadas ao longo da execução desta dissertação, será sugerida uma nova metodologia de avaliação da fadiga baseada na tensão

admissível. Resumidamente, esta proposta de procedimento subdivide-se em dois critérios de avaliação, sendo eles:

1) Procedimento de Avaliação da Fadiga através do Critério do Acúmulo de Dano;
2) Procedimento de Avaliação da Fadiga através do Critério da Tensão Admissível.

A definição das linhas denominadas “críticas”, ou seja, linhas que requerem a avaliação computacional através de *software* de análise de tensões, são essenciais na elaboração de um projeto de Engenharia, seja na aplicação do critério do acúmulo do dano, seja na aplicação do critério da tensão admissível. Esta definição é fornecida no documento que comtempla o Critério de Análise de Tensões do projeto, e pode variar de caso para caso. Em geral, as linhas críticas são categorizadas como:

- que transportam produtos perigosos ou inflamáveis;
- linhas de grande importância para a operacionalidade da unidade;
- linhas acima ou igual a 4” operando com temperatura igual ou superior a 100ºC;
- linhas acima ou igual a 12” operando com temperatura igual ou superior a 75ºC;
- linhas acima ou igual a 16” operando a qualquer temperatura;
- todas as linhas que possuem temperatura de operação menor que 0ºC;
- tubulações suscetíveis a vibrações devido a carregamentos internos e externos, como por exemplo: linhas com escoamento bifásico, transientes de pressão, altas velocidades de escoamento, vibração induzida por vórtices, entre outros;
- tubulações de materiais especiais tais como duplex, cobre-níquel, e outros para tubulação acima ou igual a 4”;
- tubulação a partir de 3” inclusive conectada a equipamentos sensíveis tais como equipamentos rotativos;
- tubulações do anel principal e a distribuição do sistema de incêndio;
- linhas de hidrocarbonetos contendo óleo e gás que precise ser despressurizada após a condição de *blast*;
- linhas de alívio conectadas a válvulas de alívio e discos de ruptura;
- linhas do sistema de *blowdown* a partir de 2” inclusive, com exceção de drenos;
- tubulações ao longo da torre de *flare*;

- todas as derivações com diâmetro ≥ 1/3 do diâmetro da linha tronco, desde que afastadas de equipamentos, ou que não possuam massas concentradas que possam contribuir para o efeito da fadiga;

- todas as linhas de produção ou injeção;

- linhas afetadas pelos movimentos devido aos deslocamentos da estrutura, equipamentos conectados, movimentos de pontes, entre outros;

6.1.1 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério de Acúmulo de Dano

Este corresponde ao critério de análise de fadiga comumente utilizado em projetos de engenharia de unidades FPSO executados até os dias atuais. Os subitens a seguir trazem a definição de todos os parâmetros considerados neste critério.

- Deslocamentos de SAG e HOG:

Os casos de carregamentos foram elaborados de modo a levar em consideração os deslocamentos de *SAG* e *HOG* da viga navio, tanto para a condição DOC (*Design Operation Condition*), quanto para a condição DEC (*Design Extreme Condition*). Todos estes cenários foram aplicados em uma mesma filosofia de casos de carregamentos, sem a necessidade de que seja destinado um arquivo da análise somente para a condição DOC e outro somente para a condição DEC. Desta forma, são evitados possíveis erros na replicação destes arquivos por parte da projetista, bem como a facilitação do trabalho da fiscalização do projeto que executará a verificação de somente um arquivo (com exceção dos arquivos *blast* e *transit* que não são abordados nesta dissertação e não levam em consideração o efeito da fadiga).

Resumidamente, os casos de carregamento idealizados neste critério não adotam premissas simplificadoras para a consideração dos deslocamentos da viga navio. Os deslocamentos de SAG e HOG são contemplados em casos distintos e devem ser aplicados na análise de flexibilidade.

- Acelerações:

As acelerações são contempladas nos casos de carregamento do critério do acúmulo de dano tanto para a condição DOC, quanto para a condição DEC, levando-se em consideração o efeito da não linearidade explicada no Capítulo IV desta dissertação. Para estas duas condições, foram aplicados fatores de altura de onda, também conforme a Tabela 69. A última faixa (11)

da condição DEC corresponde à passagem da onda centenária. Os vetores acelerações foram combinados em 8 combinações, não tendo sido considerado nenhuma combinação de aceleração predominante. Conforme informado no item 3.1.2.1 desta dissertação, não é considerado o efeito da tensão média.

Tabela 67 Combinação dos vetores acelerações.

COMBINAÇÕES DAS ACELERAÇÕES	
COMBINAÇÃO 1	+U1+U2+U3
COMBINAÇÃO 2	+U1-U2+U3
COMBINAÇÃO 3	+U1+U2-U3
COMBINAÇÃO 4	+U1-U2-U3
COMBINAÇÃO 5	-U1+U2+U3
COMBINAÇÃO 6	-U1-U2+U3
COMBINAÇÃO 7	-U1+U2-U3
COMBINAÇÃO 8	-U1-U2-U3

- Linhas de menores diâmetros:

A fim de reduzir a ocorrência de falhas por fadiga em derivações do tipo "*weldolet*", ou seja, nos casos de conexões em que há uma maior variação entre o diâmetro da linha tronco e o diâmetro da derivação, este procedimento recomenda a inclusão das derivações de diâmetros iguais ou maiores que 2" na análise computacional, a fim de que seja prevista a adequada suportação para estas linhas que muitas vezes, são suportadas com critérios não assertivos. Principalmente, quando estas conexões se fizerem próximas a equipamentos rotativos, ou estejam conectadas à tubulações suscetíveis à vibração, bem como possuam acessórios (massas concentradas) que contribuam para o processo de falha por fadiga. Nesses casos, uma adequada avaliação na determinação dos pontos e tipos de suportes que proporcionam o aumento da rigidez destas linhas é imprescindível para uma menor ocorrência de falhas por fadiga em operação.

Atualmente, ferramentas de modelagem 3D possuem artifícios de rápida conversão de todo um sistema de tubulação, sem a necessidade do modelamento manual do arranjo no *software* de análise de flexibilidade, proporcionando ganho de tempo de execução, bem como a garantia da fidelidade de que o arranjo analisado corresponde ao arranjo contido na maquete eletrônica.

- Critério de Dano Admissível:

Conforme recomenda a norma BS PD 5500 (1997), o dano admissível à fadiga não deve ser maior do que 0,6 para tubulações de até 22 mm de espessura. Para tubulações com espessura superior a 22 mm, o dano admissível deve ser calculado de acordo com a equação 27:

$$\sum \frac{ni}{Ni} \leq 0,6\left(\frac{22}{e}\right)^{0,75} \qquad \text{(EQ27)}$$

onde:

i – índice i = 1,2,3, etc.
n_i – número esperados de ciclos;
N_i – número de ciclos admissíveis obtidos a partir da curva F3 da DNV RP C203;
e – espessura de parede da tubulação.

- Deformações Dinâmicas e Deformações em águas calmas (*Still Water*):

Conforme exposto no item 2.8 desta dissertação, as deformações dinâmicas são aquelas decorrentes da ação das ondas sobre a embarcação, correspondendo geralmente a cerca de 60% da deformação total do FPSO. A aplicação deste critério está contemplada no caso L191 para a condição *Design Operation Condition* (DOC), e L286 para a condição *Design Extreme Condition* (DEC) apresentados na Tabela 6.5.

- Curva de Fadiga:

A definição da curva de fadiga corresponde a um dos principais pontos de importância na avaliação da fadiga em tubulações *offshore*. Devido à certa obscuridade no entendimento dos fatores de intensificação de tensões (SIFs) adotados pela norma ASME B31.3, que será explanada a seguir, conclui-se que a curva F3 da norma DNV RP C203 corresponde à curva mais adequada a ser utilizada no estudo de fadiga.

A tabela A.9 da norma DNV apresenta o detalhe da junta correspondente a curva F3 que contempla uma solda de topo circunferencial feita apenas a partir de um lado da tubulação sem a utilização de barra cobre junta (*back bar*). Estes procedimentos de soldagem de juntas tubulares são aqueles normalmente utilizados em campo, o que justifica a adoção da curva F3 no projeto à fadiga de tubulações.

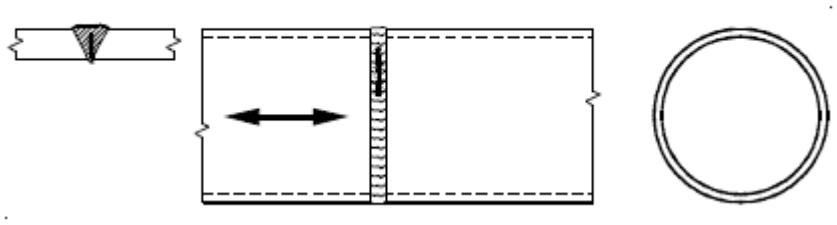


Fig. 75 Detalhe da junta soldada abrangida pela curva F3. Fonte: (DNV RP C203, 2014).

Muito se discute a respeito da duplicidade de fatores intensificadores de tensão tanto da curva F3 da norma DNV RP C203, quanto dos intensificadores de tensão da própria ASME B31. Entretanto, segundo Peng (2009), os fatores intensificadores de tensão contidos nas normas ASME B31 correspondem à metade do valor teórico, com exceção de tubulações Classe 1 aplicáveis à componentes do sistema de refrigeração de reatores nucleares, cuja falha na refrigeração poderia causar um grave acidente.

O motivo pelo qual os fatores de intensificação de tensão são divididos por 2 pelos códigos corresponde à, basicamente, fins de praticidade. Pois, os corpos de prova de tubulações utilizados nos testes de fadiga para definição dos critérios de avaliação de tensões secundárias da ASME B31.3 já possuem SIF de aproximadamente 2,0, portanto, se fossem utilizados os SIF's teóricos, as análises dos sistemas de tubulações precisariam identificar todas as soldas circunferenciais contidas ao longo do arranjo para a aplicação do SIF. Desta forma, a tensão calculada de acordo com os códigos ASME B31 em pontos com intensificação de tensões, corresponde somente a metade da tensão teórica, o que não traz nenhum prejuízo, uma vez estando o sistema dentro dos limites estabelecidos pelo código, pois a tensão admissível também foi ajustada de acordo com esta premissa.

Entretanto, existem ocasiões em que algo não coberto pelo código precisa ser levado em consideração, como é o caso da fadiga de alto ciclo. Importante ressaltar que, dos códigos que cobrem o estudo de tensões em tubulações, somente a norma IGE/TD/12 leva também em consideração o efeito da fadiga.

Ao se realizar uma análise de fadiga em tubulações utilizando uma curva de fadiga não pertencente ao código ASME B31, que tenha sido obtida com base em corpos de prova com SIF diferente de 2,0, a tensão calculada pela ASME B31 precisa ser corrigida antes de utilizar a curva de fadiga de fora da norma. Por este motivo, foi escolhida a curva F3 da norma DNV RP C203, uma vez que esta foi obtida com corpos de prova mais parecidos com os corpos utilizados na definição dos critérios da norma.

- Verificação de tensão – SRSS:

Conforme recomendação do apêndice G da norma DNV RP D101, apesar de não se tratar de um caso de carregamento destinado à avaliação de fadiga, este foi considerado nos casos de carregamentos apresentados nas Tabelas 70 e 72. De acordo com esta recomendação, o resultado de tensão obtido a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados dos vetores aceleração deve ser menor do que 1,33 S_H (OCC – Caso ocasional).

- Número de Ciclos:

O número de ciclos de repetições foi considerado para as diversas faixas de alturas de ondas conforme a Tabela 6.2 que traz a distribuição de altura significativa de onda Hs e períodos de pico das ondas Tp de acordo com o METOCEAN DATA. Para as combinações das acelerações em cada faixa de altura, o número de ciclos da faixa foi dividido igualmente entre as oito combinações.

Tabela 68 Distribuição de alturas e períodos de ondas.

Hs(m)		Tp(s)																		Freq	%	Mean Tp
		3 4	4 5	5 6	6 7	7 8	8 9	9 10	10 11	11 12	12 13	13 14	14 15	15 16	16 17	17 18	18 19	19 20	20 21			
0.0	0.5	1	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	8	0.01	8.24
0.5	1.0	107	113	205	256	273	159	112	74	68	50	41	38	12	4	0	0	0	0	1512	2	7.73
1.0	1.5	15	938	1115	1792	3608	2505	692	373	283	260	108	103	31	11	3	0	2	3	11842	15.64	7.7
1.5	2.0	1	349	3682	3524	4602	6028	2948	1626	993	534	251	174	69	26	18	8	1	2	24836	32.8	8.12
2.0	2.5	0	13	1265	4995	2430	2755	2041	1870	1806	982	523	284	105	32	10	8	2	0	19121	25.25	8.74
2.5	3.0	0	6	109	2114	2404	1040	858	798	879	1021	514	288	108	20	8	6	1	1	10175	13.44	9.27
3.0	3.5	0	1	4	403	1240	856	277	292	294	424	431	280	77	18	8	1	1	1	4608	6.09	9.82
3.5	4.0	0	0	0	43	268	550	189	91	140	141	139	209	75	16	5	1	0	0	1867	2.47	10.45
4.0	4.5	0	0	0	3	31	207	161	48	47	63	68	89	73	17	3	0	0	0	810	1.07	11.16
4.5	5.0	0	0	0	0	4	48	116	48	15	21	41	57	35	19	6	0	0	0	410	0.54	11.75
5.0	5.5	0	0	0	0	0	16	45	60	19	15	16	22	20	7	8	1	0	0	229	0.3	11.88
5.5	6.0	0	0	0	0	0	2	22	44	19	7	6	15	9	0	0	0	0	0	124	0.16	11.5
6.0	6.5	0	0	0	0	0	0	10	18	22	0	3	11	2	0	0	0	0	0	66	0.09	11.55
6.5	7.0	0	0	0	0	0	0	3	12	12	2	0	7	3	0	0	0	0	0	39	0.05	11.99
7.0	7.5	0	0	0	0	0	0	4	4	14	1	0	1	5	0	0	0	0	0	29	0.04	11.99
7.5	8.0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	4	0	0	3	0	0	0	0	0	11	0.01	12.51
8.0	8.5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	9	0.01	12.47
8.5	9.0	0	0	0	0	0	0	1	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0.01	10.82
9.0	9.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0.01	12.88
9.5	10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	16.95
10.0	10.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.5	11.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Freq		124	1420	6380	13131	14862	14168	7482	5371	4616	3527	2141	1580	629	173	69	25	7	7	75712		
%		0.16	1.88	8.43	17.34	19.63	18.71	9.88	7.09	6.1	4.66	2.83	2.09	0.83	0.23	0.09	0.03	0.01	0.01			
Mean Hs		0.86	1.35	1.75	2.07	2.03	2.04	2.2	2.31	2.38	2.49	2.69	2.9	3.14	3.12	3.05	2.43	2.07	1.96			

Fonte: (S/D).

- Fatores de Alturas de Ondas:

Propõe-se que para a condição *Design Operation Condition* (DOC) sejam consideradas as faixas de ondas de 0,0 a 8,0 metros de altura, enquanto que para a condição *Design Extreme Condition* (DEC), as faixas de altura de ondas devem ser de 8,0 a 11,0 metros.

Os casos de carregamentos aqui propostos aplicam o fator de altura de onda para o cálculo de dano devido às acelerações e deslocamentos, o que não foi observado na análise de projetos anteriores, nos quais os fatores de altura de onda eram aplicados somente para os deslocamentos da viga navio. A fim de obter um maior refinamento dos resultados, e, em contrapartida, buscando não impactar em uma quantidade ainda maior de casos de carregamentos, as faixas de altura de onda foram agrupadas conforme a Tabela 69. Observa-se que um agrupamento mais refinado da faixa 2 à faixa 7 foi previsto por se tratarem das faixas nas quais são identificadas as maiores ocorrências de danos por fadiga.

Conforme comentado anteriormente no Capítulo II, tanto para o apêndice W da ASME B31.3, quanto para a norma ABS – *Spectral-based fatigue analysis for* FPSO *installations* (2018), supõe-se uma relação linear entre altura de onda e as tensões e deformações produzidas por estas na embarcação, desta forma considerou-se uma relação linear entre o fator de altura de onda e a altura de onda, determinado através da Equação 28.

$$F_n = \frac{\mathrm{H_n}}{\mathrm{H_C}} \qquad \text{(EQ28)}$$

onde:

n – índice n = 1,2,3...
F_n – Fator de altura de onda;
H_n –altura máxima da faixa (n);
H_C – altura da onda centenária (10,25 m) ou maior altura da onda de DOC (8 metros).

Tabela 69 Fator de altura de onda proposto.

CONDIÇÃO	FAIXA	ALTURA (m)	FATOR DE ALTURA	CICLOS
DOC	**1**	**0 a 1**	0,250	49.911.401
		1 a 2		
	2	**2 a 2,5**	0,316	22.781.434
	3	**2,5 a 3**	0,375	11.429.746
	4	**3 a 3,5**	0,438	4.886.331
	5	**3,5 a 4**	0,500	1.860.415
	6	**4 a 4,5**	0,563	755.793
	7	**4,5 a 5**	0,625	363.352
	8	**5 a 6**	0,750	313.006
	9	**6 a 7**	1,000	127.717
		7 a 8		
DEC	**10**	**8 a 10**	0,909	21.602
	11	**10 a 11**	1	1

- *Full Range*:

Os casos de carregamentos aqui abordados levam em consideração o *full range* de tensões devido aos deslocamentos de SAG e HOG, representados pelo *load case* L190 para a condição *Design Operation Condition* (DOC) e L285 para a condição *Design Extreme Condition* (DEC).

A Tabela 70 apresenta um resumo dos principais parâmetros considerados no procedimento de análise de fadiga baseado no critério do acúmulo de dano.

Tabela 70 Procedimento de análise de fadiga baseado no critério do Acúmulo de Dano.

PROCEDIMENTO DO CRITÉRIO DE ACÚMULO DE DANO PARA ANÁLISE DE FADIGA		
6.1	ACELERAÇÕES	DOC – *Design Operation Condition* DEC – *Design Extreme Condition*
6.2	DESLOCAMENTOS ESTRUTURAIS (*SAG* E *HOG*)	Deverão ser considerados deslocamentos de *SAG* e *HOG*, tanto para DOC quanto para DEC.
6.3	FADIGA TÉRMICA	Deverá ser considerada a partir do maior caso de expansão (EXP), para uma quantidade total de 7.000 ciclos operacionais.
6.4	FATORES DE ALTURAS DE ONDAS APLICADOS PARA DESLOCAMENTOS E ACELERAÇÕES	Sim, conforme agrupamento da Tabela 6.2
6.5	CASOS DE CARREGAMENTOS	Conforme Tabela 6.4.
6.6	ATUALIZAÇÃO DOS SIF's e K's CONFORME ASME B31.J	SIM
6.7	CURVA DE FADIGA	F3 da norma DNV RP C203
6.8	FREQUÊNCIA NATURAL DE VIBRAÇÃO MÍNIMA	5,0 Hz
6.9	VIDA ÚTIL	Conforme o projeto
6.10	QUANTIDADE DE CICLOS	Conforme METOCEAN DATA
6.11	DANO ADMISSÍVEL	0,6 para tubos até 22 mm (espessura). $\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 0{,}6\ (22/e)^{0{,}75}$
6.12	MÉTODO DE CÁLCULO DE DANO	PALMGREN MINER
6.13	ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DERIVAÇÕES DE MENORES DIÂMETROS	DERIVAÇÕES ≥ 2" PRÓXIMAS A EQUIPAMENTOS ROTATIVOS E QUE POSSUAM ACESSÓRIOS (MASSAS CONCENTRADAS).

A Tabela 71 apresenta os 305 casos de carregamentos para o critério do acúmulo de dano.

Tabela 71 Casos de carregamentos – Critério do Acúmulo de Dano.

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
L1	W+T1+P1+D1	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA	OPE	-	CASO DE OPERAÇÃO SEM ACELERAÇÕES E DESLOCAMENTOS
L2	W+T2+P1+D2	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA	OPE	-	CASO DE OPERAÇÃO SEM ACELERAÇÕES E DESLOCAMENTOS
L3	W+P1	TUBO CHEIO + PRESSÃO INTERNA	SUS	-	PESO PRÓPRIO
L4	L1-L3	TÉRMICA P/ T1	EXP	-	SECUNDÁRIA
L5	L2-L3	TÉRMICA P/ T2	EXP	-	SECUNDÁRIA
L6	W+T1+P1+D1+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 1 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÁXIMA COMBINADOS COM ACELERAÇÕES DE DOC
L7	W+T1+P1+D1+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 2 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L8	W+T1+P1+D1+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 3 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L9	W+T1+P1+D1+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 4 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L10	W+T1+P1+D1-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 5 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L11	W+T1+P1+D1-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 6 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L12	W+T1+P1+D1-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 7 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L13	W+T1+P1+D1-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 8 – TEMP. 1 - DOC	OPE	-	
L14	W+T2+P1+D2+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 1 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÍNIMA COMBINADOS COM ACELERAÇÕES DE DOC
L15	W+T2+P1+D2+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 2 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L16	W+T2+P1+D2+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 3 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L17	W+T2+P1+D2+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 4 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L18	W+T2+P1+D2-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 5 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L19	W+T2+P1+D2-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 6 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L20	W+T2+P1+D2-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 7 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L21	W+T2+P1+D2-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 8 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L22	W+T1+P1+D1+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 1 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÁXIMA COMBINADOS COM ACELERAÇÕES DE DEC
L23	W+T1+P1+D1+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 2 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L24	W+T1+P1+D1+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 3 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L25	W+T1+P1+D1+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 4 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L26	W+T1+P1+D1-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 5 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L27	W+T1+P1+D1-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 6 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L28	W+T1+P1+D1-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 7 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L29	W+T1+P1+D1-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 8 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L30	W+T2+P1+D2+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 1 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÍNIMA COMBINADOS COM
L31	W+T2+P1+D2+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 2 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L32	W+T2+P1+D2+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 3 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L33	W+T2+P1+D2+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 4 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L34	W+T2+P1+D2-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 5 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L35	W+T2+P1+D2-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 6 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L36	W+T2+P1+D2-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 7 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L37	W+T2+P1+D2-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 8 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
					ACELERAÇÕES DE DEC
L38	L6-L1	+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	COMBINAÇÃO ALGÉBRICA PARA ACELERAÇÕES DE DOC NA CONDICÇÃO DE PROJETO MÁXIMA
L39	L7-L1	+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L40	L8-L1	+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	
L41	L9-L1	+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L42	L10-L1	-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	
L43	L11-L1	-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L44	L12-L1	-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	
L45	L13-L1	-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L46	L38	+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3 (SRSS)	OCC	-	RAIZ QUADRADA DA SOMA DOS QUADRADOS DAS ACELERAÇÕES - DOC
L47	L14-L2	+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	COMBINAÇÃO ALGÉBRICA PARA ACELERAÇÕES DE DOC NA CONDICÇÃO DE PROJETO MÍNIMA
L48	L15-L2	+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L49	L16-L2	+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	
L50	L17-L2	+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L51	L18-L2	-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	
L52	L19-L2	-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L53	L20-L2	-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	SUS	-	
L54	L21-L2	-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	SUS	-	
L55	L47	+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3 (SRSS)	OCC	-	RAIZ QUADRADA DA SOMA DOS QUADRADOS DAS ACELERAÇÕES - DOC
L56	L38, L47	+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	MÁX.	-	MAIORES RESULTADOS DE ACELERAÇÕES PARA DOC DENTRE AS DUAS CONDIÇÕES (MÁX. E MÍN.)
L57	L39, L48	+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	MÁX.	-	
L58	L40, L49	+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	MÁX.	-	
L59	L41, L50	+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	MÁX.	-	
L60	L42, L51	-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	MÁX.	-	
L61	L43, L52	-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	MÁX.	-	
L62	L44, L53	-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	MÁX.	-	
L63	L45, L54	-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	MÁX.	-	
L64	L46, L55	+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3 (SRSS)	MÁX.	-	MAIOR RESULTADO DE ACELERAÇÃO RESULTANTE - DOC
L65	**0,250** L56	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 1 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS
L66	**0,316** L56	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L67	**0,375** L56	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L68	**0,438** L56	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L69	**0,500** L56	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L70	**0,563** L56	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
L71	**0,625** L56	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	FATORES DE ONDAS
L72	**0,750** L56	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L73	**1,000** L56	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L74	**0,250** L57	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 2 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS FATORES DE ONDAS
L75	**0,316** L57	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L76	**0,375** L57	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L77	**0,438** L57	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L78	**0,500** L57	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L79	**0,563** L57	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	
L80	**0,625** L57	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L81	**0,750** L57	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L82	**1,000** L57	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L83	**0,250** L58	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 3 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS FATORES DE ONDAS
L84	**0,316** L58	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L85	**0,375** L58	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L86	**0,438** L58	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L87	**0,500** L58	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L88	**0,563** L58	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	
L89	**0,625** L58	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L90	**0,750** L58	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L91	**1,000** L58	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L92	**0,250** L59	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 4 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS FATORES DE ONDAS
L93	**0,316** L59	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L94	**0,375** L59	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L95	**0,438** L59	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L96	**0,500** L59	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L97	**0,563** L59	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	
L98	**0,625** L59	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L99	**0,750** L59	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L100	**1,000** L59	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L101	**0,250** L60	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 5 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS FATORES DE ONDAS
L102	**0,316** L60	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L103	**0,375** L60	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L104	**0,438** L60	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L105	**0,500** L60	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L106	**0,563** L60	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	
L107	**0,625** L60	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L108	**0,750** L60	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L109	**1,000** L60	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L110	**0,250** L61	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 6 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS FATORES DE ONDAS
L111	**0,316** L61	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L112	**0,375** L61	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L113	**0,438** L61	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L114	**0,500** L61	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L115	**0,563** L61	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	
L116	**0,625** L61	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L117	**0,750** L61	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L118	**1,000** L61	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L119	**0,250** L62	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 7 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS FATORES DE ONDAS
L120	**0,316** L62	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L121	**0,375** L62	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L122	**0,438** L62	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L123	**0,500** L62	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	
L124	**0,563** L62	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	
L125	**0,625** L62	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L126	**0,750** L62	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L127	**1,000** L62	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L128	**0,250** L63	ACEL. DOC - FAIXA 1	SUS	-	COMBINAÇÃO 8 DAS ACELERAÇÕES DE DOC COM OS
L129	**0,316** L63	ACEL. DOC - FAIXA 2	SUS	-	
L130	**0,375** L63	ACEL. DOC - FAIXA 3	SUS	-	
L131	**0,438** L63	ACEL. DOC - FAIXA 4	SUS	-	
L132	**0,500** L63	ACEL. DOC - FAIXA 5	SUS	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
L133	**0,563** L63	ACEL. DOC - FAIXA 6	SUS	-	FATORES DE ONDAS
L134	**0,625** L63	ACEL. DOC - FAIXA 7	SUS	-	
L135	**0,750** L63	ACEL. DOC - FAIXA 8	SUS	-	
L136	**1,000** L63	ACEL. DOC - FAIXA 9	SUS	-	
L137	L22-L1	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	COMBINAÇÃO ALGÉBRICA PARA ACELERAÇÕES DE DEC NA CONDICÇÃO DE PROJETO MÁXIMA
L138	L23-L1	+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L139	L24-L1	+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L140	L25-L1	+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L141	L26-L1	-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L142	L27-L1	-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L143	L28-L1	-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L144	L29-L1	-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L145	L137	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3 (SRSS)	OCC	-	RAIZ QUADRADA DA SOMA DOS QUADRADOS DAS ACELERAÇÕES - DEC
L146	L30-L2	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	COMBINAÇÃO ALGÉBRICA PARA ACELERAÇÕES DE DEC NA CONDICÇÃO DE PROJETO MÍNIMA
L147	L31-L2	+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L148	L32-L2	+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L149	L33-L2	+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L150	L34-L2	-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L151	L35-L2	-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L152	L36-L2	-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L153	L37-L2	-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L154	L146	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3 (SRSS)	OCC	-	RAIZ QUADRADA DA SOMA DOS QUADRADOS DAS ACELERAÇÕES – DEC
L155	L137, L146	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	MÁX.	-	MAIORES RESULTADOS DE ACELERAÇÕES PARA DEC DENTRE AS DUAS CONDIÇÕES (MÁX. E MÍN.)
L156	L138, L147	+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	MÁX.	-	
L157	L139, L148	+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	MÁX.	-	
L158	L140, L149	+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	MÁX.	-	
L159	L141, L150	-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	MÁX.	-	
L160	L142, L151	-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	MÁX.	-	
L161	L143, L152	-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	MÁX.	-	
L162	L144, L153	-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	MÁX.	-	
L163	L145, L154	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3 (SRSS)	MÁX.	-	MAIOR RESULTADO DE ACELERAÇÃO RESULTANTE - DEC
L164	**0,909** L155	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 1 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS
L165	**1,000** L155	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
					FATORES DE ONDAS
L166	**0,909** L156	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 2 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L167	**1,000** L156	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
L168	**0,909** L157	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 3 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L169	**1,000** L157	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
L170	**0,909** L158	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 4 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L171	**1,000** L158	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
L172	**0,909** L159	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 5 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L173	**1,000** L159	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
L174	**0,909** L160	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 6 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L175	**1,000** L160	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
L176	**0,909** L161	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 7 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L177	**1,000** L161	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
L178	**0,909** L162	ACEL. DEC - FAIXA 10	SUS	-	COMBINAÇÃO 8 DAS ACELERAÇÕES DE DEC COM OS FATORES DE ONDAS
L179	**1,000** L162	ACEL. DEC - FAIXA 11	SUS	-	
DESLOCAMENTOS ESTRUTURAIS					
L180	W+T1+P1+D1+D8	OPERAÇÃO - CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – SAGGING – DOC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO MÁXIMA E MÍNIMA COMBINADOS COM DESLOCAMENTOS DE
L181	W+T1+P1+D1+D9	OPERAÇÃO - CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – HOGGING – DOC	OPE	-	
L182	W+T2+P1+D2+D8	OPERAÇÃO - CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – SAGGING – DOC	OPE	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
L183	W+T2+P1+D2+D9	OPERAÇÃO - CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – HOGGING – DOC	OPE	-	SAG E HOG PARA DOC
L184	L180-L1	D8 – TEMP. 1 (SAG)	EXP	-	COMBINAÇÕES ALGÉBRICAS DOS CASOS DE OPE+DESLOCAMENTOS COM OPE NORMAL (DOC)
L185	L181-L1	D9 – TEMP. 1 (HOG)	EXP	-	
L186	L182-L2	D8 – TEMP. 2 (SAG)	EXP	-	
L187	L183-L2	D9 – TEMP. 2 (HOG)	EXP	-	
L188	L184, L186	Maior Caso de Deslocamento de SAG p/ DOC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE SAG - DOC
L189	L185, L187	Maior Caso de Deslocamento de HOG p/ DOC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE HOG - DOC
L190	L188-L189	Maior caso de SAG menos maior caso de HOG p/ DOC	EXP	-	MAIOR CASO DE SAG – MAIOR CASO DE HOG (DOC)
L191	0,6 L190	Desconsiderando carregamento estático	EXP	-	-
L192	**0,250** L191	FAIXA DE ONDA 1 – DOC	EXP	-	CASOS DE DESLOCAMENTOS SAG-HOG P/ DOC COM APLICAÇÃO DE FATOR DE ALTURA
L193	**0,316** L191	FAIXA DE ONDA 2 – DOC	EXP	-	
L194	**0,375** L191	FAIXA DE ONDA 3 – DOC	EXP	-	
L195	**0,438** L191	FAIXA DE ONDA 4 – DOC	EXP	-	
L196	**0,500** L191	FAIXA DE ONDA 5 – DOC	EXP	-	
L197	**0,563** L191	FAIXA DE ONDA 6 – DOC	EXP	-	
L198	**0,625** L191	FAIXA DE ONDA 7 – DOC	EXP	-	
L199	**0,750** L191	FAIXA DE ONDA 8 – DOC	EXP	-	
L200	**1,000** L191	FAIXA DE ONDA 9 – DOC	EXP	-	
L201	L4, L5	EXP. MÁXIMA	MÁX	-	-
L202	L201	FADIGA TÉRMICA	FAT	7000	-
L203	L192+L65	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 1** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 1 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 1
L204	L192+L74				
L205	L192+L83				
L206	L192+L92				
L207	L192+L101				
L208	L192+L110				
L209	L192+L119				
L210	L192+L128				
L211	L193+L66	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 2** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 2 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 2
L212	L193+L75				
L213	L193+L84				
L214	L193+L93				
L215	L193+L102				
L216	L193+L111				
L217	L193+L120				
L218	L193+L129				
L219	L194+L67	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 3** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 3 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇ
L220	L194+L76				
L221	L194+L85				
L222	L194+L94				
L223	L194+L103				

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
L224	L194+L112				ÕES – FAIXA 3
L225	L194+L121				
L226	L194+L130				
L227	L195+L68	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 4** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 4 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 4
L228	L195+L77				
L229	L195+L86				
L230	L195+L95				
L231	L195+L104				
L232	L195+L113				
L233	L195+L122				
L234	L195+L131				
L235	L196+L69	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 5** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 5 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 5
L236	L196+L78				
L237	L196+L87				
L238	L196+L96				
L239	L196+L105				
L240	L196+L114				
L241	L196+L123				
L242	L196+L132				
L243	L197+L70	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 6** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 6 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 6
L244	L197+L79				
L245	L197+L88				
L246	L197+L97				
L247	L197+L106				
L248	L197+L115				
L249	L197+L124				
L250	L197+L133				
L251	L198+L71	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 7** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 7 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 7
L252	L198+L80				
L253	L198+L89				
L254	L198+L98				
L255	L198+L107				
L256	L198+L116				
L257	L198+L125				
L258	L198+L134				
L259	L199+L72	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 8** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 8 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 8
L260	L199+L81				
L261	L199+L90				
L262	L199+L99				
L263	L199+L108				
L264	L199+L117				
L265	L199+L126				
L266	L199+L135				
L267	L200+L73	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 9** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DOC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 9 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 9
L268	L200+L82				
L269	L200+L91				
L270	L200+L100				
L271	L200+L109				
L272	L200+L118				
L273	L200+L127				
L274	L200+L136				
L275	W+T1+P1+D1+D10	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – SAGGING – DEC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO MÁXIMA E MÍNIMA COMBINADOS COM DESLOCAMENTOS DE
L276	W+T1+P1+D1+D11	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – HOGGING – DEC	OPE	-	
L277	W+T2+P1+D2+D10	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – SAGGING – DEC	OPE	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBS.
L278	W+T2+P1+D2+D11	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – HOGGING – DEC	OPE	-	SAG E HOG PARA DEC
L279	L275-L1	D10 – TEMP. 1 (SAG)	SUS	-	COMBINAÇÕES ALGÉBRICAS DOS CASOS DE OPE+DESLOCAMENTOS COM OPE NORMAL (DEC)
L280	L276-L1	D11 – TEMP. 1 (HOG)	SUS	-	
L281	L277-L2	D10 – TEMP. 2 (SAG)	SUS	-	
L282	L278-L2	D11 – TEMP. 2 (HOG)	SUS	-	
L283	L279, L281	Maior Caso de Deslocamento de SAG p/ DEC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE SAG - DEC
L284	L280, L282	Maior Caso de Deslocamento de HOG p/ DEC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE HOG - DEC
L285	L283-L284	Maior caso de SAG menos maior caso de HOG p/ DEC	SUS	-	MAIOR CASO DE SAG – MAIOR CASO DE HOG (DEC)
L286	0,6 L285	Desconsiderando carregamento estático	SUS	-	-
L287	**0,909** L286	FAIXA DE ONDA 10 – DEC	SUS	-	CASOS DE DESLOCAMENTOS SAG-HOG P/ DEC COM APLICAÇÃO DE FATOR DE ALTURA
L289	**1,000** L286	FAIXA DE ONDA 11 – DEC	SUS	-	
L290	L287+L164	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 10** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DEC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 10 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 10
L291	L287+L166				
L292	L287+L168				
L293	L287+L170				
L294	L287+L172				
L295	L287+L174				
L296	L287+L176				
L297	L287+L178				
L298	L288+L165	FADIGA - DESLOCAMENTO P/ **FAIXA 11** COMBINADO COM ACELERAÇÕES - DEC	FAT	Nº CICLOS FAIXA 11 / 11	DESLOCAMENTOS COMBINADO COM ACELERAÇÕES – FAIXA 11
L299	L288+L167				
L300	L288+L169				
L301	L288+L171				
L302	L288+L173				
L303	L288+L175				
L304	L288+L177				
L305	L288+L179				

Onde:

W – Peso da tubulação + fluido;

T1 – Temperatura de Projeto Máxima;

T2 – Temperatura de Projeto Mínima;

P1 – Pressão de Projeto;
D1 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Máxima (provenientes de um equipamento);
D2 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Mínima (provenientes de um equipamento);
D8 – Deslocamentos devido ao movimento de *SAGGING* para DOC;
D9 – Deslocamentos devido ao movimento de *HOGGING* para DOC;
D10 – Deslocamentos devido ao movimento de *SAGGING* para DEC;
D11 – Deslocamentos devido ao movimento de *HOGGING* para DEC;
U1 – vetor aceleração *surge*;
U2 – vetor aceleração *sway*;
U3 – vetor aceleração *heave*;
A1/B1/C1 – Aceleração para DOC conforme *Acceleration Data*;
A2/B2/C2 – Aceleração para DEC conforme *Acceleration Data*.

- **Determinação do Dano Acumulado:**

A determinação do dano acumulado é realizada através da ferramenta *cumulative usage* da saída de dados do *software* CAESAR II, contemplando desde o caso L203 ao L274, relacionados à condição *Design Operation Condition* (DOC), e também, do L290 ao L305 relacionados à condição *Design Extreme Condition* (DEC) dos carregamentos propostos para o critério do acúmulo de dano.

6.1.2 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério da Tensão Admissível

Este procedimento busca a simplificação da metodologia de análise de fadiga convencional a partir do critério do acúmulo de dano, apresentada no item anterior, baseando-se na comparação da tensão produzida por deslocamento de *sagging* e *hogging* e acelerações atuantes devido à passagem da onda centenária com a tensão admissível.

A partir dos seguintes estudos contemplados no Capítulo III desta dissertação, tais como:

1- Análise da distribuição do dano por fadiga em função de diferentes agrupamentos de altura de onda, nível de tensão e curva de fadiga;
2- Resultado de dano por fadiga com a adoção de diferentes curvas de fadiga;

3- Estudo das fontes de dano por fadiga (aceleração e deslocamento) em diferentes sistemas de tubulações de FPSO's.

algumas importantes conclusões foram obtidas para a consolidação da proposta deste critério de análise de fadiga baseado na tensão admissível, as quais estão contempladas no item 3.1.3.1.2 desta dissertação. Começando pelos resultados da distribuição de dano por altura de onda, que foi obtida considerando a relação linear entre altura de onda e a tensão na tubulação, com a aplicação de diferentes fatores de altura de onda e número de ciclos de cada faixa de altura de onda conforme o Metocean Data. Para visualização do gráfico que contempla este estudo, consultar as Figuras 17 e 18. Considerou-se a relação linear entre tensão e altura de onda por falta de informações mais precisas sobre as deformações e movimentos que ocorrem no FPSO em função da altura de onda.

A partir da observação de que a maior parte do dano se concentra na faixa de altura de onda entre 2 e 5 metros, foram verificadas algumas formas de agrupamento de alturas de ondas e seus efeitos no cálculo de dano por fadiga. Os resultados foram obtidos considerando diferentes tensões máximas na tubulação devido à onda de maior amplitude (10,25 m). A partir destas tensões máximas, as tensões correspondentes às demais alturas de onda foram calculadas utilizando fatores proporcionais à altura de onda máxima de cada faixa. O dano por fadiga foi calculado de acordo com a regra de Palmgren-Miner, considerando a razão entre número de ciclos para cada faixa de altura de onda indicado no Metocean Data, e o número de ciclos para falha por fadiga, correspondente às tensões de cada faixa de altura de onda, determinado a partir das curvas de fadiga F3 e D, ambas da DNV RP C203. Os resultados de dano calculados foram comparados com os resultados das simulações realizadas através do *software* CAESAR, apresentando ótima concordância, conforme apresentando na Figura 17 e Figura 18.

Outra importante observação incorreu a partir do estudo no qual foi demonstrado que é possível determinar a tensão admissível em função do dano admissível. Os gráficos das Figuras 21 e 22 mostram o dano em função da tensão máxima (relativo à onda de 10,25 m) na tubulação, para o agrupamento de onda mais refinado (de 0,5m em 0,5m) ao se utilizar a curva F3 da norma DNV RP C203 e as condições de mar da Bacia de Santos.

Além dos resultados destes estudos, ao longo das pesquisas realizadas na elaboração desta dissertação, observou-se também a adoção de critérios baseados na tensão admissível em diferentes referências bibliográficas.

Conforme informado no item 2.2.2 desta dissertação, o apêndice W da norma ASME B31.3 baseia-se na determinação de uma faixa de tensão admissível, abordando a amplitude

variável de carregamentos randômicos em que a distribuição da faixa de tensão de longa duração pode ser representada por uma distribuição de Weibull de dois parâmetros.

Segundo Robleto *et al.* (2010), a fim de simplificar os critérios de avaliação de fadiga, é muito benéfico converter danos acumulados em tensão admissível para que o analista de flexibilidade possa avaliar a fadiga de maneira similar ao critério de tensão admissível para tensões primária e secundária da própria ASME B31.3.

A determinação da tensão admissível poderá levar em consideração, de forma mais simplificada os vários efeitos que implicam na vida à fadiga do sistema de tubulação, conforme abordado, por exemplo, pela DNV RP C203, tais como:

- efeito da temperatura da linha;
- efeito da espessura de parede;
- efeito do módulo de elasticidade do material da tubulação.

Dentre os benefícios obtidos com a adoção do critério de avaliação de fadiga com base na tensão admissível, frente ao procedimento convencional baseado em acúmulo de dano por fadiga, podemos destacar:

- redução de, aproximadamente, 200 casos de carregamento;
- a tensão admissível pode ser obtida a partir de um agrupamento de onda mais refinado (de 0,5 em 0,5 metro), conforme levantamento do METOCEAN DATA;
- redução de custo e tempo de execução do projeto;
- percepção prematura da maior tensão que o sistema de tubulações poderá apresentar;
- simplificação de relatório de cálculo;
- os casos de carregamento do critério de avaliação através da tensão admissível poderão ser utilizados em substituição aos casos de carregamentos convencionais de cálculo de dano, sem prejuízo na obtenção dos demais resultados da análise, tais como cargas atuantes nos bocais de equipamentos, cargas atuantes nos suportes contemplando o efeito das acelerações, flechas, tensões, entre outros;
- maior facilidade e agilidade na comparação dos resultados de tensão;
- aplicação do caso FAT somente para a obtenção do dano referente à fadiga térmica;
- maior facilidade de manipulação da curva de fadiga, uma vez que não há a necessidade de entrada de seus dados no *software* de análise de tensões;

- maior facilidade de aplicação dos parâmetros da curva de fadiga, seja relacionado à espessura, temperatura, ou até mesmo a adoção de uma diferente curva para uma linha específica contida na análise de flexibilidade.

- maior assertividade na avaliação da fadiga, uma vez que a maneira de análise é mais simples se comparada ao critério convencional de identificação de dano.

Todos os parâmetros levantados para o critério do acúmulo de dano apresentados no item anterior deverão ser seguidos também para o critério da tensão admissível. Entretanto, os itens a seguir possuem algumas simplificações:

- Acelerações:

A fim de buscar um maior refinamento do resultado da tensão devido às acelerações, são levadas em consideração as acelerações das condições *Design Operation Condition* (DOC) e *Design Extreme Condition* (DEC).

- Número de Ciclos de Ondas:

O número de ciclos deverá ser aplicado conforme o METOCEAN DATA somente para a determinação da tensão admissível. Para os casos de carregamentos considerados no CAESAR II, não há necessidade de consideração do número de ciclos, uma vez que não há necessidade do cálculo do dano devido à ação das ondas pelo *software* de análise de tensões.

- Fatores de alturas de ondas

Para a determinação da tensão admissível é possível a aplicação do agrupamento mais refinado de 0,5 em 0,5 metro. Para os casos de carregamentos considerados no CAESAR II, os fatores de alturas de onda é 1,0 tanto para as acelerações de DOC e DEC.

A Tabela 72 apresenta os fatores de alturas de onda para o agrupamento mais refinado de 0,5 e 0,5 metro. Observa-se que são aplicados aos casos de carregamentos deste critério, somente os fatores em negrito relativos à onda centenária (10,25 metros) e maior onda da condição DOC (8 metros).

Tabela 72 Agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metro.

CONDIÇÃO	ALTURA (m)		FATOR DE ALTURA	CICLOS
DOC	0	0,5	0,06	10.110
	0,5	1	0,13	2.036.827
	1	1,5	0,19	16.014.605
	1,5	2	0,25	31.849.859
	2	2,5	0,31	22.781.434
	2,5	3	0,38	11.429.746
	3	3,5	0,44	4.886.331
	3,5	4	0,50	1.860.415
	4	4,5	0,56	755.793
	4,5	5	0,63	363.352
	5	5,5	0,69	200.725
	5,5	6	0,75	112.281
	6	6,5	0,81	59.504
	6,5	7	0,88	33.871
	7	7,5	0,94	25.186
	7,5	8	**1,00**	9.156
DEC	8	8,5	0,83	7.516
	8,5	9	0,88	9.624
	9	9,5	0,93	3.234
	9,5	10	0,98	1.229
	10	10,25	**1,00**	1

A fim de simplificar os casos de carregamento, a determinação do dano devido à fadiga térmica d_t, bem como o dano proveniente das operações de *loading* e *offloading* do FPSO d_{lo}, não é contemplada nos casos de carregamento da Tabela 74. Sendo assim, uma parcela de dano deverá ser reservada para estas fontes de fadiga, conforme apresentado na Tabela 73.

Tabela 73 Procedimento de análise de fadiga baseado no critério da Tensão Admissível.

PROCEDIMENTO DO CRITÉRIO DA TENSÃO ADMISSÍVEL PARA ANÁLISE DE FADIGA		
6.1	ACELERAÇÕES	DEC – *Design Extreme Condition*
6.2	DESLOCAMENTOS ESTRUTURAIS (*SAG* E *HOG*)	Deverão ser considerados deslocamentos de *SAG* e *HOG* somente para DEC.
6.3	FADIGA TÉRMICA	Deverá ser considerada a partir do maior caso de expansão (EXP), para uma quantidade total de 7.000 ciclos operacionais.
6.4	FATORES DE ALTURAS DE ONDAS APLICADOS PARA DESLOCAMENTOS E ACELERAÇÕES	De 0,5 em 0,5 metro somente para a obtenção da tensão admissível. Para os casos de carregamentos considerados no CAESAR II, não há necessidade de aplicação.
6.5	CASOS DE CARREGAMENTOS	Conforme Tabela 6.6.
6.6	ATUALIZAÇÃO DOS SIF's e K's CONFORME ASME B31.J	SIM
6.7	CURVA DE FADIGA	F3 da norma DNV RP C203
6.8	FREQUÊNCIA NATURAL DE VIBRAÇÃO MÍNIMA	5,0 Hz

PROCEDIMENTO DO CRITÉRIO DA TENSÃO ADMISSÍVEL PARA ANÁLISE DE FADIGA		
6.9	VIDA ÚTIL	Conforme o projeto
6.10	QUANTIDADE DE CICLOS	Conforme METOCEAN DATA
6.11	DANO ADMISSÍVEL	$d_w = 1 - d_t - d_{lo}$
6.12	MÉTODO DE CÁLCULO DE DANO	PALMGREN MINER
6.13	ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DERIVAÇÕES DE MENORES DIÂMETROS	DERIVAÇÕES ≥ 2” PRÓXIMAS A EQUIPAMENTOS ROTATIVOS E QUE POSSUAM ACESSÓRIOS (MASSAS CONCENTRADAS).

O diagrama da Figura 76 resume a metodologia proposta para a obtenção da tensão admissível. Os dados de entrada abaixo deverão ser inicialmente definidos:

- dados do METOCEAN para obtenção da quantidade de ciclos por faixa de altura de onda;
- tensão na tubulação produzida pela onda centenária
- fatores de altura de onda de 0,5 em 0,5 metro;
- curva de fadiga;
- critério do dano admissível;
- vida útil do projeto.

Além disso, o critério adota como premissa os seguintes parâmetros:

- critério do acúmulo de dano linear (*Palmgren Miner*);
- relação linear da tensão com a altura de onda;
- é desprezado o efeito da tensão média.

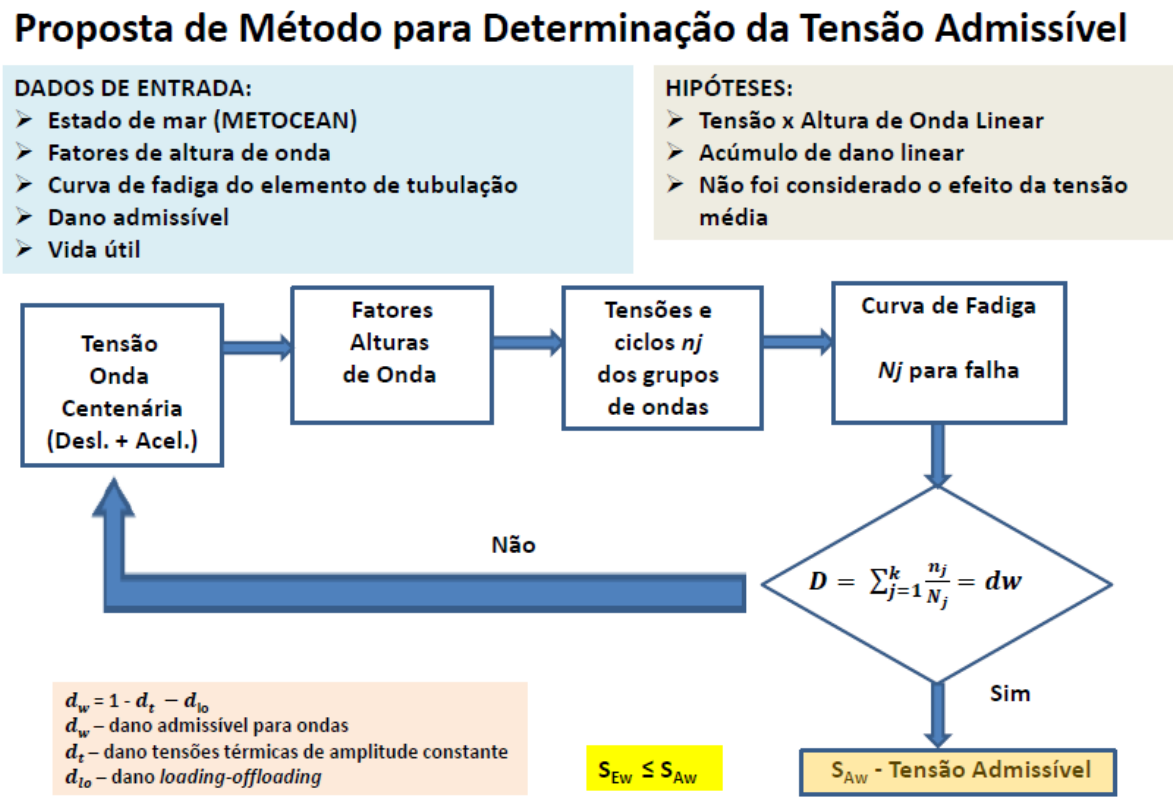


Fig. 76 Proposta de método para determinação da tensão admissível. Fonte: (S/D).

Conforme mostra o diagrama na Fig. 76, o método para determinação da tensão admissível consiste em um procedimento recursivo que tem início com a suposição de uma tensão na tubulação causada pela onda centenária. Em seguida, são calculadas as tensões para as demais alturas de onda utilizando os fatores de altura de onda. Conhecidas as tensões e os números de ciclos correspondentes a cada faixa de altura de onda, para fins de cálculo do dano por fadiga, são então determinados os números de ciclos para a falha por fadiga devido a cada uma destas tensões utilizando a curva de fadiga associada ao elemento de tubulação em análise. Verifica-se agora se o dano por fadiga encontrado é igual ao dano admissível. Caso afirmativo, a tensão admissível está determinada, caso contrário, supõe-se uma nova tensão causada pela onda centenária, repetindo-se os passos anteriores até que o dano por fadiga encontrado seja igual ao dano admissível.

Importante ressaltar que o dano admissível para as ondas (d_w) deve ser obtido a partir da subtração dos danos relativos à fadiga térmica (d_t), e dano relativo aos carregamentos de *loading e offloading* (d_{LO}) do dano total admissível para o projeto (d_{Total}), obtido a partir do criério de dano admissível. A tensão encontrada causadora deste dano (d_w) será a tensão admissível adotada nos estudos de flexibilidade, de acordo com a Equação 30. A sua obtenção está descrita no item 7.2 do Capítulo VII desta dissertação.

$$d_w = d_{Total} - d_{LO} - d_t \qquad \text{(EQ30)}$$

Deve-se mencionar também que a relação entre as deformações estruturais e movimentos do FPSO com a altura de onda é uma característica da embarcação, devendo ser determinada através de funções de transferência (*RAO*) pela equipe de estruturas navais. A hipótese utilizada neste trabalho, de que esta relação seja linear, deve-se a falta de informações mais precisas sobre as relações entre altura de onda e as deformações estruturais e movimentos do FPSO.

A Tabela 74 apresenta os casos de carregamentos propostos para o procedimento de análise de fadiga a partir do critério da Tensão Admissível.

A tensão atuante (S_{Ew}) devido aos de deslocamentos e acelerações é calculada a partir dos casos de carregamento L54 ao L61, que contemplam as oito combinações de acelerações da condição DOC, L62 ao L69 que contemplam as oito combinações de acelerações da condição DEC, bem como os casos L81 e L93 para obtenção das tensões devido aos deslocamentos para DOC e DEC, respectivamente, deverão ser comparadas com a tensão admissível (S_{Aw}). Para um melhor entendimento deste procedimento de obtenção da tensão atuante, consultar item 7.2 do Capítulo VII desta dissertação.

$$S_{Ew} \leq S_{Aw} \qquad \text{(EQ31)}$$

Tabela 74 Casos de carregamentos – Critério da Tensão Admissível.

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBSERVAÇÕES
L1	W+T1+P1+D1	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA	OPE	-	CASO DE OPERAÇÃO SEM ACELERAÇÕES E DESLOCAMENTOS
L2	W+T2+P1+D2	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA	OPE	-	CASO DE OPERAÇÃO SEM ACELERAÇÕES E DESLOCAMENTOS
L3	W+P1	TUBO CHEIO + PRESSÃO INTERNA	SUS	-	PESO PRÓPRIO
L4	L1-L3	TÉRMICA P/ T1	EXP	-	SECUNDÁRIA
L5	L2-L3	TÉRMICA P/ T2	EXP	-	SECUNDÁRIA
L6	W+T1+P1+D1+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 1 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBSERVAÇÕES
L7	W+T1+P1+D1+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 2 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	TEMPERATURA DE PROJETO MÁXIMA COMBINADOS COM ACELERAÇÕES DE DOC
L8	W+T1+P1+D1+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 3 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	
L9	W+T1+P1+D1+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 4 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	
L10	W+T1+P1+D1-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 5 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	
L11	W+T1+P1+D1-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 6 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	
L12	W+T1+P1+D1-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 7 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	
L13	W+T1+P1+D1-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 8 – TEMP. 1 – DOC	OPE	-	
L14	W+T2+P1+D2+**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 1 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÍNIMA COMBINADOS COM ACELERAÇÕES DE DOC
L15	W+T2+P1+D2+**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 2 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L16	W+T2+P1+D2+**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 3 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L17	W+T2+P1+D2+**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 4 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L18	W+T2+P1+D2-**A1**.U1+**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 5 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L19	W+T2+P1+D2-**A1**.U1+**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 6 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L20	W+T2+P1+D2-**A1**.U1-**B1**.U2+**C1**.U3	COMB. 7 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L21	W+T2+P1+D2-**A1**.U1-**B1**.U2-**C1**.U3	COMB. 8 – TEMP. 2 – DOC	OPE	-	
L22	W+T1+P1+D1+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 1 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÁXIMA COMBINADOS COM ACELERAÇÕES DE DEC
L23	W+T1+P1+D1+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 2 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L24	W+T1+P1+D1+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 3 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L25	W+T1+P1+D1+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 4 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L26	W+T1+P1+D1-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 5 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L27	W+T1+P1+D1-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 6 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L28	W+T1+P1+D1-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 7 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L29	W+T1+P1+D1-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 8 – TEMP. 1 – DEC	OPE	-	
L30	W+T2+P1+D2+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 1 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO EM TEMPERATURA DE PROJETO MÍNIMA COMBINADOS
L31	W+T2+P1+D2+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 2 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L32	W+T2+P1+D2+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 3 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBSERVAÇÕES
L33	W+T2+P1+D2+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 4 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	COM ACELERAÇÕES DE DEC
L34	W+T2+P1+D2-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 5 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L35	W+T2+P1+D2-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 6 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L36	W+T2+P1+D2-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	COMB. 7 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L37	W+T2+P1+D2-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	COMB. 8 – TEMP. 2 – DEC	OPE	-	
L38	L22-L1	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	COMBINAÇÃO ALGÉBRICA PARA ACELERAÇÕES DE DEC NA CONDICÇÃO DE PROJETO MÁXIMA
L39	L23-L1	+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L40	L24-L1	+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L41	L25-L1	+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L42	L26-L1	-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L43	L27-L1	-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L44	L28-L1	-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L45	L29-L1	-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L46	L30-L2	+**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	COMBINAÇÃO ALGÉBRICA PARA ACELERAÇÕES DE DEC NA CONDICÇÃO DE PROJETO MÍNIMA
L47	L31-L2	+**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L48	L32-L2	+**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L49	L33-L2	+**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L50	L34-L2	-**A2**.U1+**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L51	L35-L2	-**A2**.U1+**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L52	L36-L2	-**A2**.U1-**B2**.U2+**C2**.U3	SUS	-	
L53	L37-L2	-**A2**.U1-**B2**.U2-**C2**.U3	SUS	-	
L54	L38, L46	ACELERAÇÃO MÁXIMA	MÁX.	-	CASO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA – DEC
L55	L39, L47		MÁX.	-	
L56	L40, L48		MÁX.	-	
L62	L41, L49		MÁX.	-	
L58	L42, L50		MÁX.	-	
L59	L43, L51		MÁX.	-	
L60	L44, L52		MÁX.	-	
L61	L45, L53		MÁX.	-	
L62	$F_{ACEL.\ DOC}$ L54	ACELERAÇÃO MÁXIMA	MÁX.	-	CASO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA – DOC
L62	$F_{ACEL.\ DOC}$ L55		MÁX.	-	
L64	$F_{ACEL.\ DOC}$ L56		MÁX.	-	
L65	$F_{ACEL.\ DOC}$ L62		MÁX.	-	
L66	$F_{ACEL.\ DOC}$ L58		MÁX.	-	
L67	$F_{ACEL.\ DOC}$ L59		MÁX.	-	
L68	$F_{ACEL.\ DOC}$ L60		MÁX.	-	
L69	$F_{ACEL.\ DOC}$ L61		MÁX.	-	
DESLOCAMENTOS ESTRUTURAIS					
L70	W+T1+P1+D1+D8	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – SAGGING – DOC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO MÁXIMA E MÍNIMA COMBINADOS COM DESLOCAMENT
L71	W+T1+P1+D1+D9	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – HOGGING – DOC	OPE	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBSERVAÇÕES
L72	W+T2+P1+D2+D8	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – SAGGING – DOC	OPE	-	OS DE SAG E HOG PARA DOC
L73	W+T2+P1+D2+D9	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – HOGGING – DOC	OPE	-	
L74	L70-L1	D10 – TEMP. 1 (SAG)	EXP	-	COMBINAÇÕES ALGÉBRICAS DOS CASOS DE OPE+DESLOCAMENTOS COM OPE NORMAL (DOC)
L75	L71-L1	D11 – TEMP. 1 (HOG)	EXP	-	
L76	L72-L2	D10 – TEMP. 2 (SAG)	EXP	-	
L77	L73-L2	D11 – TEMP. 2 (HOG)	EXP	-	
L78	L74, L76	Maior Caso de Deslocamento de SAG p/ DOC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE SAG – DOC
L79	L75, L77	Maior Caso de Deslocamento de HOG p/ DOC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE HOG – DOC
L80	L78-L79	Maior caso de SAG menos maior caso de HOG p/ DOC	EXP	-	MAIOR CASO DE SAG – MAIOR CASO DE HOG (DOC)
L81	**0,6 x 1,0 x L80**	**Carregamento Dinâmico devido às acelerações e fator de altura de onda para última faixa de DOC**	EXP	-	-
L82	W+T1+P1+D1+D10	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – SAGGING – DEC	OPE	-	CASOS DE OPERAÇÃO MÁXIMA E MÍNIMA COMBINADOS COM DESLOCAMENTOS DE SAG E HOG PARA DEC
L83	W+T1+P1+D1+D11	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÁXIMA – HOGGING – DEC	OPE	-	
L84	W+T2+P1+D2+D10	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – SAGGING – DEC	OPE	-	
L85	W+T2+P1+D2+D11	OPERAÇÃO – CONDIÇÃO DE PROJETO MÍNIMA – HOGGING – DEC	OPE	-	
L86	L82-L1	D10 – TEMP. 1 (SAG)	EXP	-	COMBINAÇÕES ALGÉBRICAS DOS CASOS DE OPE+DESLOCAMENTOS COM OPE NORMAL (DEC)
L87	L83-L1	D11 – TEMP. 1 (HOG)	EXP	-	
L88	L84-L2	D10 – TEMP. 2 (SAG)	EXP	-	
L89	L85-L2	D11 – TEMP. 2 (HOG)	EXP	-	

	CASO DE CARREGAMENTO	DESCRIÇÃO	TIPO DE TENSÃO	Nº CICLOS	OBSERVAÇÕES
L90	L86, L88	Maior Caso de Deslocamento de SAG p/ DEC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE SAG – DEC
L91	L87, L89	Maior Caso de Deslocamento de HOG p/ DEC	MÁX	-	MAIOR CASO DE DESLOCAMENTO DE HOG – DEC
L92	L90-L91	Maior caso de SAG menos maior caso de HOG p/ DEC	EXP	-	MAIOR CASO DE SAG – MAIOR CASO DE HOG (DEC)
L93	**0,6 x 1,0 x L93**	**Carregamento Dinâmico devido às acelerações e fator de altura de onda para última faixa de DEC**	EXP	-	-

onde:

W – Peso da tubulação + fluido;

T1 – Temperatura de Projeto Máxima;

T2 – Temperatura de Projeto Mínima;

P1 – Pressão de Projeto;

D1 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Máxima (provenientes de um equipamento);

D2 – Deslocamentos impostos na tubulação para condição de Projeto Mínima (provenientes de um equipamento);

D8 – Deslocamentos devido ao movimento de *SAGGING* para DOC;

D9 – Deslocamentos devido ao movimento de *HOGGING* para DOC;

D10 – Deslocamentos devido ao movimento de *SAGGING* para DEC;

D11 – Deslocamentos devido ao movimento de *HOGGING* para DEC;

U1 – vetor aceleração *surge*;

U2 – vetor aceleração *sway*;

U3 – vetor aceleração *heave*;

A1/B1/C1 – Aceleração para DOC conforme *Acceleration Data*;

A2/B2/C2 – Aceleração para DEC conforme *Acceleration Data*.

CAPÍTULO VII

7.1 APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE FADIGA

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da adoção dos procedimentos apresentados no capítulo anterior buscando propiciar um melhor entendimento dos mesmos. Conclui-se que suas aplicações trazem ganhos significativos, tanto nos resultados de dano, uma vez utilizado o procedimento baseado no Critério do Acúmulo de Dano, quanto na redução do número de casos de carregamento e maior precisão do resultado, quando aplicado o critério da Tensão Admissível.

7.1.1 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério do Acúmulo de Dano

Conforme apresentado anteriormente, o procedimento aqui proposto traz a aplicação dos fatores de altura de onda também para as acelerações. A seguir serão demonstrados os resultados para os dois cenários, sendo o primeiro sem a aplicação dos fatores de altura de onda para as acelerações, conforme considerado no projeto executado e o segundo contemplando a aplicação dos fatores de altura de onda também para esta fonte de fadiga.

A Tabela 75 corresponde ao dano acumulado encontrado na análise de flexibilidade do projeto, conforme apresentado no estudo de caso apresentado na seção 5.1.2 do Capítulo V. Deve-se ressaltar que conforme explicado no Capítulo V, os fatores de altura de onda utilizados pela empresa projetista no sistema de tubulações do referido estudo de caso não são proporcionais à altura de onda. Os valores adotados são inferiores aos fatores proporcionais à altura de onda, e consequentemente acarretam em menores valores de dano por fadiga.

Tabela 75 Resultado de dano com fator de altura aplicado somente para os deslocamentos.

CONDIÇÃO	FAIXA	FATOR	DANO	%
DOC	1	0,05	0,67	18,26
	2	0,10	0,78	21,25
	3	0,20	0,65	17,71
	4	0,30	0,34	9,26
	5	0,50	0,40	10,90
	6	0,70	0,32	8,72
	7	1,00	0,36	9,81
DEC	8	0,60	0,09	2,45
	9	0,80	0,06	1,63
	10	1,00	0,00	0,00
	TOTAL		3,67	

O dano acumulado de 3,67 ocorre na conexão do tipo “tê” forjado representada pelo nó 440, conforme Figura 77.

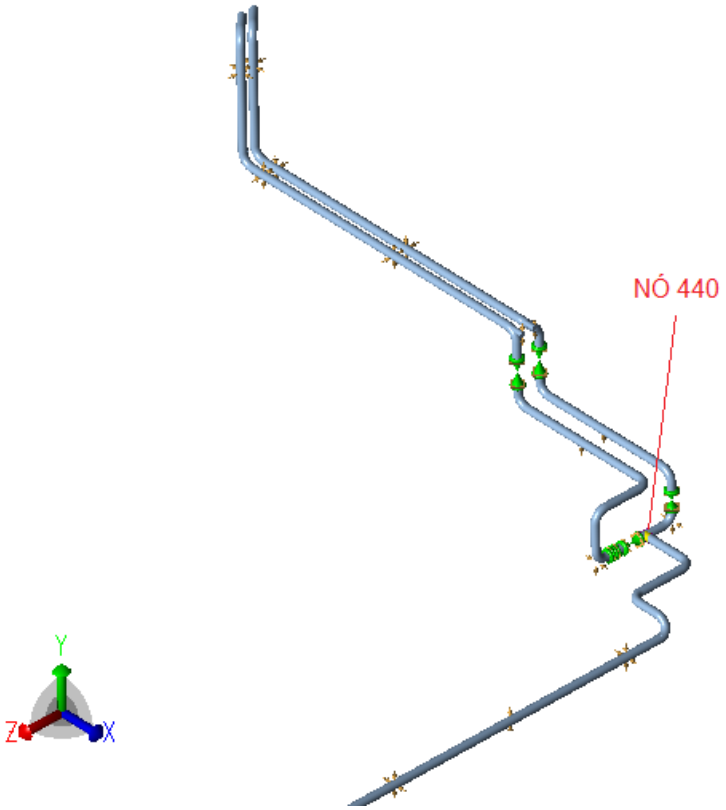


Fig. 77 Indicação da conexão tipo "tê" na qual foi encontrado o dano de 3,67 de acordo com o projeto executado. Fonte: (S/D).

Através do *software* CAESAR II, um novo estudo, agora com a aplicação dos fatores de altura de onda também para as acelerações, foi realizado. O dano encontrado através da simulação apresenta uma expressiva diminuição, conforme apresentado na Tabela 76.

Tabela 76 Resultado de dano com fator de altura de onda aplicado para os deslocamentos e acelerações.

CONDIÇÃO	FAIXA	FATOR	DANO	%
DOC	1	0,05	0,00	0,00
	2	0,10	0,05	0,03
	3	0,20	0,34	0,18
	4	0,30	0,29	0,15
	5	0,50	0,40	0,21
	6	0,70	0,32	0,17
	7	1,00	0,36	0,19
DEC	8	0,60	0,07	0,04
	9	0,80	0,05	0,03
	10	1,00	0,00	0,03
	TOTAL		1,89	

Desta forma, conclui-se que é possível uma redução da ordem de 48% com a aplicação dos fatores de altura de onda para as acelerações.

7.2 Procedimento de Análise de Fadiga baseado no Critério da Tensão Admissível

Este item apresenta os resultados obtidos com a aplicação do critério da tensão admissível, também para o estudo de caso 5.2 apresentado no Capítulo V desta dissertação. Entretanto, primeiramente, busca-se a confirmação dos resultados entre o critério baseado no acúmulo de dano conforme aplicado ao estudo de caso citado acima e o critério da tensão admissível, buscando, a cada etapa do desenvolvimento, relacionar os casos da Tabela 74.

Tabela 77 3D stress *intensity* para deslocamentos.

CONDIÇÃO	FAIXA	FATOR DE ALTURA DE ONDA	*3D STRESS INTENSITY (MPa)*
DOC	7	1,0	141,7
DEC	10	1,0	166,7

Para as acelerações, devido às variações das tensões causadas pelas oito possíveis combinações, e também, devido ao método de cálculo do *software*, devem ser determinadas as tensões *3D stress intensity* dos casos de deslocamentos isoladamente tanto para as acelerações de DOC, quanto para as acelerações de DEC, conforme saída de dados do *software* CAESAR II apresentada na Tabela 78.

Tabela 78 3D stress intensity para acelerações.

CONDIÇÃO	COMBINAÇÃO	*3D STRESS INTENSITY (MPa)*	NÓ	*RATIO*	CASO DE CARGA
DOC	U1+U2+U3	19,6	440	61,5	L197
	U1+U2-U3	**32,9**	440	**103,4**	L198
	U1-U2+U3	19,1	440	59,9	L199
	U1-U2-U3	18,0	440	56,6	L200
	-U1+U2+U3	16,4	440	51,4	L201
	-U1+U2-U3	30,4	440	95,2	L202
	-U1-U2+U3	17,9	440	56,2	L203
	-U1-U2-U3	**15,1**	440	**47,2**	L204
DEC	U1+U2+U3	32,2	440	4,9	L189
	U1+U2-U3	**79,1**	440	**12,1**	L190
	U1-U2+U3	59,4	440	9,1	L191
	U1-U2-U3	47,8	440	7,3	L192
	-U1+U2+U3	**29,6**	440	**4,5**	L193
	-U1+U2-U3	77,3	440	11,8	L194
	-U1-U2+U3	54,2	440	8,3	L195
	-U1-U2-U3	44,5	440	6,8	L196

A partir das oito combinações dos vetores acelerações, a intensidade de tensão desta fonte de fadiga deve ser calculada a partir da média entre as maiores razões de cada caso,

obtidos para um mesmo ponto nodal. A Tabela 80 apresenta as médias das tensões produzidas pelas acelerações encontradas para DOC e DEC do estudo de caso 5.1.2 apresentado no Capítulo V.

Tabela 79 Médias das tensões - Acelerações.

CONDIÇÃO	COMBINAÇÃO	*3D STRESS INTENSITY (MPa)*
DOC	MAIOR	32,9
	MENOR	15,1
	MÉDIA	**24,0**
DEC	MAIOR	79,1
	MENOR	29,6
	MÉDIA	**54,4**

A Tabela 7.6 apresenta o resultado do somatório das tensões *3D stress intensity* calculadas para o deslocamento estrutural, e também, para a média entre as acelerações tanto para a condição DOC quanto para a condição DEC.

Tabela 80 Somatório das tensões de deslocamentos e acelerações para DOC e DEC.

CONDIÇÃO	FONTE	*3D STRESS INTENSITY (MPa)*
DOC	DESLOCAMENTO	141,7
	ACELERAÇÃO	24,0
	TOTAL	**165,7**
DEC	DESLOCAMENTO	166,7
	ACELERAÇÃO	54,4
	TOTAL	**221,05**

Obtidos os valores de tensão de 221,05 MPa relativa ao somatório das tensões devido aos deslocamentos e acelerações para a condição DEC, bem como a tensão de 165,70 MPa relativa ao somatório das tensões devido aos deslocamentos e acelerações para a condição DOC, é possível calcular o dano acumulado a partir da curva S-N (Equação 7) para a curva F3 da norma DNV RP C203. Os resultados estão apresentados na Tabela 81. Os valores de tensões indicados nos campos sombreados correspondem aos valores de tensão total para DOC e DEC.

Tabela 81 Dano acumulado a partir da Curva S-N.

Faixa	H (m)	Ciclos	Fator Altura de	DT (MPa)	N falha F3	Dano por H	Dano por H (%)

				Onda (projeto executado)				
1	0	2	46272120	0,05	8,285	9.650.224.932	0,00	0,1
2	2	3	35488448	0,1	16,57	301.569.529	0,12	3,3
3	3	4	7843648	0,2	33,14	9.659.230	0,81	22,5
4	4	5	1477896	0,3	49,71	2.861.994	0,52	14,3
5	5	6	427600	0,5	82,85	618.191	0,69	19,2
6	6	7	127200	0,7	115,99	225.288	0,56	15,7
7	7	8	48448	1	165,7	77.274	0,63	17,4
8	8	9	23024	0,6	132,63	150.687	0,15	4,2
9	9	10	7272	0,8	176,84	63.571	0,11	3,2
10	10	10,25	1	1	221,05	32.548	0,00	0,0
						DANO TOTAL	**3,60**	

Observa-se o dano acumulado de 3,60. O erro identificado em relação ao cálculo realizado no CAESAR II foi de 1% conforme mostra a Tabela 82 .

Tabela 82 Dano Caesar x Dano Curva S-N.

DANO		
CURVA F3	CAESAR	DIFERENÇA
3,60	3,64	1%

A tensão da condição DEC para a ocorrência de um dano de 0,6 deveria ser de 130,5 MPa, conforme observado na Tabela 83. Entretanto, é importante ressaltar que deverá ser contemplado neste cálculo o dano devido à fadiga térmica, e também, o dano devido às operações de *loading* e *offloading* da plataforma.

Tabela 83 Tensão admissível para dano total de 0,6.

Faixa	**H (m)**		**Ciclos**	**Fator Altura de Onda (projeto executado)**	**DT (MPa)**	**N falha F3**	**Dano por H**	**Dano por H (%)**
1	0	2	46272120	0,05	4,89	134.211.924.228	0,00	0,1
2	2	3	35488448	0,1	9,79	4.194.122.632	0,01	1,4
3	3	4	7843648	0,2	19,58	131.066.332	0,06	10,0
4	4	5	1477896	0,3	29,36	17.259.764	0,09	14,3
5	5	6	427600	0,5	48,94	2.999.678	0,14	23,9
6	6	7	127200	0,7	68,51	1.093.177	0,12	19,5
7	7	8	48448	1	97,88	374.960	0,13	21,6
8	8	9	23024	0,6	78,30	732.343	0,03	5,3

Faixa	H (m)		Ciclos	Fator Altura de Onda (projeto executado)	DT (MPa)	N falha F3	Dano por H	Dano por H (%)
9	9	10	7272	0,8	104,40	308.957	0,02	3,9
10	10	10,25	1	1	130,5	158.186	0,00	0,0
						DANO TOTAL	**0,60**	

Importante ressaltar que até aqui, os fatores de alturas considerados nos estudos demonstrados neste subitem correspondem aos fatores aplicados ao projeto executado, já que o objetivo até o momento é de validar o resultado de dano do *software* através da curva S-N.

A Tabela 84 apresenta o resultado da tensão admissível para o dano aproximado de 1,0 com a aplicação dos fatores de altura do maior agrupamento de onda, de 0,5 em 0,5 metro.

Tabela 84 Tensão admissível para dano total aproximado de 1,0 com agrupamento de altura de onda de 0,5 em 0,5 metro.

Faixa	H (m)		Ciclos	Fator Altura de Onda	DT (MPa)	N falha F3	Dano por H	Dano por H (%)
1	0	0,5	10110	0,06	3,60	622.999.210.309	0,00	0,00
2	0,5	1	2036827	0,13	7,80	13.047.490.417	0,00	0,00
3	1	1,5	16014605	0,19	11,40	1.956.481.489	0,01	0,01
4	1,5	2	31849859	0,25	15,00	496.070.846	0,06	0,12
5	2	2,5	22781434	0,31	18,60	169.213.605	0,13	0,24
6	2,5	3	11429746	0,38	22,80	61.140.047	0,19	0,34
7	3	3,5	4886331	0,44	26,40	29.375.168	0,17	0,30
8	3,5	4	1860415	0,5	30,00	15.502.214	0,12	0,22
9	4	4,5	7555793	0,56	33,60	9.267.918	0,08	0,15
10	4,5	5	363352	0,63	37,80	6.509.155	0,06	0,10
11	5	5,5	200725	0,69	41,40	4.954.490	0,04	0,07
12	5,5	6	112281	0,75	45,00	3.858.002	0,03	0,05
13	6	6,5	59504	0,81	48,60	3.062.606	0,02	0,03
14	6,5	7	33871	0,88	52,80	2.388.351	0,01	0,03
15	7	7,5	25186	0,94	56,40	1.959.579	0,01	0,02
16	7,5	8	9156	1	60,00	1.627.595	0,01	0,01
17	8	8,5	7516	0,83	66,40	1.200.869	0,01	0,01
18	8,5	9	9624	0,88	70,40	1.007.586	0,01	0,02
19	9	9,5	3234	0,93	74,40	853.653	0,00	0,01
20	9,5	10	1229	0,98	78,40	729.545	0,00	0,00
21	10	10,25	1	1	80	686.641	0,00	0,00
						DANO TOTAL	**0,96**	

Observa-se que a redução da tensão admissível é significativa ao se considerar um agrupamento de altura de onda mais refinado conforme pode ser constatado comparando os valores de dano total das Tabelas 83 e 84. Importante ressaltar que isso se deve aos diferentes fatores de altura considerados. Importante ressaltar que esta questão, que compreende na possibilidade de aplicação de fatores de alturas de ondas mais brandos, é uma sugestão de assunto a ser estudado em uma próxima dissertação, o qual deverá levar em consideração o período de tempo de aplicação das ondas relacionados às suas alturas.

CAPÍTULO VIII

8.1 PROPOSTAS DE NOVOS ESTUDOS E CONCLUSÃO

Por se tratar de um fenômeno causador de grande quantidade de falhas em tubulações e devido ao fato das operações de navios produtores de óleo e gás terem se tornado cada vez mais intensas nos últimos anos, assuntos relacionados à fadiga em tubulações *offshore* são bastante corriqueiros no setor e ainda carecem de aspectos a serem abordados e aprofundados.

Importante ressaltar que este trabalho, que teve início a partir do projeto de pesquisa para a criação de uma proposta de procedimento padrão de análise de fadiga, contribui para um ciclo que contempla as fases complementares de um empreendimento *offshore*, abrangendo a construção e montagem, bem como operação e manutenção das plataformas.

Neste cenário, todas as fases estão inter-relacionadas e necessitam de constante verificação, tanto para averiguar a correlação entre elas, quanto possíveis necessidades de reavaliação, considerando novas premissas ou variáveis que possam surgir no percurso e que não foram previstas no estudo apresentado nesta dissertação. Esta circunstância merece relevância no sentido em que nem todos os aspectos foram suficientemente explorados durante a etapa de pesquisa de elaboração deste trabalho.

O estudo comparativo dos procedimentos de análise de fadiga em tubulações *offshore*, dos diferentes projetos de Engenharia já executados, constatou divergências de metodologia e parâmetros considerados, tais como fatores de altura de ondas, dano total acumulado, curva de fadiga, número de ciclos, casos de carregamentos, entre outros.

A atualização dos fatores intensificadores de tensões e flexibilidade conforme a norma ASME B31.J, publicada no ano de 2017, se faz estritamente necessária em sistemas de tubulações submetidas a significativos ciclos de deslocamentos e acelerações, uma vez que influenciam diretamente no resultado do dano acumulado. A utilização de fatores calculados conforme o apêndice D da norma ASME B31.3 pode apresentar uma variação de resultados tanto para o superdimensionamento, quanto para o subdimensionamento de sistemas de tubulações, o que leva a um cenário de atenção.

A aplicação de fatores de altura de onda também para as acelerações nos casos de carregamentos do critério do acúmulo do dano demonstrou uma redução significativa do dano encontrado no sistema de tubulações avaliado, o que representa uma maior aproximação da realidade, uma vez que essa fatoração já era considerada para os deslocamentos de SAG e HOG.

Finalmente, a proposição da nova metodologia de avaliação de fadiga baseada no critério da tensão admissível permite ao engenheiro a possibilidade de uma análise mais rápida,

com uma significativa diminuição da quantidade de casos de carregamentos, alcançando também, uma maior precisão do resultado, uma vez que o agrupamento de altura de onda considerado é aplicado conforme o METOCEAN DATA. Considera-se que esta proposta está alinhada com a filosofia de projeto da ASME B31.3 que é baseada em tensões admissíveis, conforme mostra o Apêndice W *High-Cycle Fatigue Assessment of Piping Systems* desta norma, disponibilizado recentemente. As simulações realizadas ao longo do trabalho demonstraram que a variação máxima dos resultados obtidos com o cálculo de dano a paritr da curva S-N em comparação ao resultado de dano identificado na saída de dados das análises de flexibilidade realizadas pelo *software* CAESAR II foi de no máximo 4%. Dessa forma, vislumbra-se a possibilidade de uma redução da quantidade de horas gastas relacionadas à análise de fadiga durante a elaboração dos próximos projetos de unidades *offshore*.

Um estudo mais aprofundado das relações das acelerações e deslocamentos provocados pelas ondas para as condições *Design Operation Condition* (DOC) e *Design Extreme Condition* (DEC) constituem um importante tema a ser estudado. A adoção de premissas que relacionam as acelerações e os deslocamentos da viga navio levam a uma significativa redução da quantidade de casos de carregamentos dos procedimentos propostos no Capítulo VI desta dissertação.

Tão importante quanto o tema exposto anteriormente está a obtenção dos fatores de altura de ondas que devem ser considerados nos casos de carregamentos. Ao longo dos estudos, observou-se que o conceito adotado em determinado projeto executado apresentou uma significativa variação em relação aos fatores utilizados nos demais projetos avaliados, bem como, em relação aos fatores adotados nas duas propostas de procedimentos apresentadas no Capítulo V. Em geral, a determinação destes fatores considera a relação linear entre altura de onda máxima da faixa e a altura da onda máxima da condição (DOC ou DEC). Esta hipótese, deve-se a falta de informações mais precisas sobre as relações entre altura de onda e as deformações estruturais e movimentos do FPSO. Tanto para o critério do acúmulo de dano quanto para o critério baseado na tensão admissível, uma possível diminuição destes fatores implica em um menor dano acumulado e maiores tensões admissíveis, respectivamente. E, consequentemente, maior liberdade do calculista de flexibilidade em aprovar o sistema de tubulações estudado.

CAPÍTULO IX

9.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Caio de Oliveira. **Flambagem Térmica de Chapas Retangulares com Degraus de Espessura Uniformemente Aquecidas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials.** 6. ed. Connecticut: Cengage Learning, 2010.

BAILONA, B. A. et al. **Análise de Tensões em Tubulações Industriais para Engenheiros e Projetistas**. Brasil: LTC, 2006.

British Standard BS 5500. **Unfired Fusion Welded Pressure Vessels**, 1997.

CAESAR II**.** *User`s Guide - Versão 7.0*, abril de 2014.

DNV-RP-C203. *Fatigue* Design of Offshore Steel Structures**.** *Recommended Practice***,** abril de 2010.

DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads. *Recommended Practice*, outubro de 2010.

DNV-RP-C206. Fatigue Methodology of Offshore Ships. *Recommended Practice*, outubro de 2010.

DNVGL-RP-D101. Structural analysis of piping systems. *Recommended Pratice*, 2017.

Ellyin, F. **Mean Stress Effect**. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001.

GRAVUS, A; FRANCILLETTE, H. **An Anisotropic Behaviour Analysis of AA2024 Aluminium Alloy Undergoing Large Plastic Deformations.** European University of Brittany, National Institute of Applied Sciences, Rennes, p. 49-68, France, 2011.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

IGE/TD/12. **Piperwork Stress Analysis for Gas Industry Plant.** Recommendations on Transmission and Distribution Practice. 2. ed. Communication 1681, 2013.

LEE, Y. et al. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice.** EUA: Elsevier Butterworth-heinemann, 2005.

MATHER, Angus. **Offshore Engineering: an Introduction**. 2. ed. London: Witherby & Co Ltd, 2000.

MEDINA, J. A. H. **Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Rio de Janeiro.

MENDONÇA, Érica Martinho. **Análise de Concentração de Tensões e Fadiga em uma Junta Soldada.** Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MORAWSKI, Alexandre Persuhn. **Estimação da Vida de Fadiga de Tubulações de Transporte de Petróleo Sujeitas a Carregamento Estocásticos**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica. Vitória, 2013.

OLIVEIRA, Luiz Gustavo Leite. **Análise de Vibração de Sistemas de Tubulações em Navio Petroleiros**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2015.

PENG, Liang-Chuan. **Pipe Stress Engineering**. Peng Engineering, Houston, Texas, USA.

PESSARD, E.; MOREL F.; MOREL, A. **The anisotropic fatigue behavior of forged steel**. Advanced Engineering Materials, Wiley-VCH Verlag, 2009, p.732-735.

PICCININI, Flávio Costa**. A Onda de Projeto por Meio da Análise Estatística de Extremos a Partir de Dados Medidos por Satélite**. Macaé, Rio de Janeiro, 2008.

PIPING, Process**.** ASME Code for Pressure Piping, B31. ASME B31.3-2012 (Revision of ASME B31.3-2010). An American National Standard. *The American Society of Mechanical Engineers. New York*, 2013.

PIPING, Process**.** ASME Code for Pressure Piping, B31. ASME B31.8-2012 (Revision of ASME B31.8-2010). An *American National Standard. The American Society of Mechanical Engineers. New York*, 2013.

ROEHL, D.; GONÇALVES, P. B.; FRANZ, A. S. **Verificação à Fadiga por Análise Estática e Dinâmica de Uma Estrutura Offshore**. In: XXXVII Iberian Latin American Congress On Computational Methods in Engeneering. Brasília, Distrito Federal, 2016.

ROYLANCE, David. **Fatigue**. Department of Materials Science and Engineering. Massachusetts Institute of Technology, p. 1-9, Massachusetts, 2001.

SANDARUWAN, D. et al. A Six Degrees of Freedom Ship Simulation System for Maritime Education. *The International Journal on Advances in ICT for Emerging Regions*, p. 34-47**,** 2010.

SCIENCE DIRECT. Mean StressEffect. *Related terms.* S/d.

SILVA TELLES, Pedro C. S. **Tubulações Industriais – Cálculo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SHIGLEY, Joseph Edward. **Mechanical Engeneering Design.** 8. ed. McGraw-Hill Education, 2006.

SHIMAMURA, Yoshihide. FPSO/FSO: State of the art. *Journal of Marine Science and Technology*, p. 59-60, Tokyo, 2016.

THIAGO, Nathalie. Produção acadêmica. Disponível em: < http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2011/NathalieThiago/relat1/Conteudo.htm>. Acesso em: 02 de dezembro de 2018, 23:28:30

CAPÍTULO X

10.1 APÊNDICES

10.1.1 Caso de carregamento do projeto executado – Estudo de Caso 5.1

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L1	W	HGR		
L2	W+D7+T4+P1	HGR		Operating Temperature for Spring selection
L3	WW+HP+H	HYD		Weight Filled of Water plus Hydrostatic Press
L4	WNC+H	SUS		Weight No content
L5	W+D1+T1+P1+H	OPE		Operation Condition (Design Temp)
L6	W+D5+T2+P1+H	OPE		Operation Condition (Design or Ambient Temp, if required)
L7	W+D6+T3+P1+H	OPE		Operation Condition (Design or Ambient Temp, if required)
L8	W+P1+H	SUS		For Sustained Stress
L9	U1	SUS		Operation Acceleration Due Wave (XY)
L10	U2	SUS		Operation Acceleration Due Wave (YZ)
L11	WIN1	OCC		Win Pressure Along X axis
L12	WIN2	OCC		Win Pressure Along Z axis
L13	D2	EXP		Structural Deflection Due to Acceleration (Design Operation Condition) – HOG+SAG (HOG=0,5SAG)
L14	F1	SUS		Operation Thrust Load at Flare Tip
L15	F2	OCC		Loads due to Relief Valves
L16	F3	OCC		Loads due to Relief Valves
L17	F4	OCC		Loads due to Slug Force 1
L18	F5	OCC		Loads due to Slug Force 2
L19	F6	OCC		Loads due to Slug Force 3
L20	F7	OCC		Loads due to Slug Force 4
L21	F8	OCC		Loads due to Slug Force 5
L22	F9	OCC		Loads due to Slug Force 6
L23	W+D1+D2+T1+P1+H+U1	OPE	Algebraic	For Flange Leakage Checking
L24	W+D1+D2+T1+P1+H+U2	OPE	Algebraic	For Flange Leakage Checking
L25	L5-L8	EXP	Algebraic	For Thermal Stress Checking (Thermal Expansion plus Nozzle Displacement)
L26	L6-L8	EXP	Algebraic	For Thermal Stress Checking (Thermal Expansion plus Nozzle Displacement)
L27	L7-L8	EXP	Algebraic	For Thermal Stress Checking (Thermal Expansion plus Nozzle Displacement)
L28	L13+L25	EXP	SRSS	Square Root Combination - Displacement Due Thermal Expansion and Structural Displacement (D2)
L29	L13+L26	EXP	SRSS	Square Root Combination - Displacement Due Thermal Expansion and Structural Displacement (D2)

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L30	L13+L27	EXP	SRSS	Square Root Combination - Displacement Due Thermal Expansion and Structural Displacement (D2)
L31	L8+L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress and Occasional Loads (sustained Weight - Win Load Along X axis)
L32	L8-L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress and Occasional Loads (sustained Weight - Win Load Along X axis)
L33	L8+L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress and Occasional Loads (sustained Weight - Win Load Along Z axis)
L34	L8-L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress and Occasional Loads (sustained Weight - Win Load Along Z axis)
L35	L8+L9	SUS	Algebraic	For Sustained Stress and Operation Acceleration Due Wave (YZ)
L36	L8-L9	SUS	Algebraic	For Sustained Stress and Operation Acceleration Due Wave (YZ)
L37	L8+L10	SUS	Algebraic	For Sustained Stress and Operation Acceleration Due Wave (XY)
L38	L8-L10	SUS	Algebraic	For Sustained Stress and Operation Acceleration Due Wave (XY)
L39	L8+L9+L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L40	L8-L9+L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L41	L8+L9-L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L42	L8-L9-L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L43	L8+L9+L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L44	L8-L9+L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L45	L8+L9-L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L46	L8-L9-L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L47	L8+L10+L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L48	L8-L10+L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L49	L8+L10-L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L50	L8-L10-L11	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L51	L8+L10+L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L52	L8-L10+L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L53	L8+L10-L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L54	L8-L10-L12	OCC	Scalar	For Occasional Stress, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L55	L8+L14	SUS	Scalar	For Sustained Stress and Operation Thrust Load at Flare Tip
L56	L8+L15	OCC	Scalar	For Occasional Stress, PSV2
L62	L8+L16	OCC	Scalar	For Occasional Stress, PSV2
L58	L8+L17	OCC	Scalar	For Occasional Stress, SLUG FORCE 1
L59	L8+L18	OCC	Scalar	For Occasional Stress, SLUG FORCE 2
L60	L8+L19	OCC	Scalar	For Occasional Stress, SLUG FORCE 3
L61	L8+L20	OCC	Scalar	For Occasional Stress, SLUG FORCE 4
L62	L8+L21	OCC	Scalar	For Occasional Stress, SLUG FORCE 5
L62	L8+L22	OCC	Scalar	For Occasional Stress, SLUG FORCE 6
L64	L5,L6,L7	OPE	SignMax	SignMax OPE
L65	L5,L6,L7	OPE	Signmin	SignMin OPE
L66	L64+L11	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis)
L67	L64-L11	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis)
L68	L64+L12	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis)
L69	L64-L12	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis)
L70	L64+L9	OPE	Algebraic	Operation Condition and Operation Acceleration Due Wave
L71	L64-L9	OPE	Algebraic	Operation Condition and Operation Acceleration Due Wave
L72	L64+L10	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Maximum Acceleration Due Wave)
L73	L64-L10	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Maximum Acceleration Due Wave)
L74	L65+L11	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis)

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L75	L65-L11	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis)
L76	L65+L12	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis)
L77	L65-L12	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis)
L78	L65+L9	OPE	Algebraic	Operation Condition and Operation Acceleration Due Wave (YZ)
L79	L65-L9	OPE	Algebraic	Operation Condition and Operation Acceleration Due Wave (YZ)
L80	L65+L10	OPE	Algebraic	Operation Condition and Operation Acceleration Due Wave (XY)
L81	L65-L10	OPE	Algebraic	Operation Condition and Operation Acceleration Due Wave (XY)
L82	L64+L9+L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L83	L64-L9+L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L84	L64+L10-L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L85	L64-L10-L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L86	L64+L9+L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L87	L64-L9+L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L88	L64+L10-L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L89	L64-L10-L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L90	L64+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L91	L64-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L92	L64+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L93	L64-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L94	L64+L9+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L95	L64-L9+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L96	L64+L10+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L97	L64-L10+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operating Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L98	L64+L9-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L99	L64-L9-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L100	L64+L10-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L101	L64-L10-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L102	L65+L9+L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L103	L65-L9+L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L104	L65+L10-L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L105	L65-L10-L11	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis
L106	L65+L9+L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L107	L65-L9+L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L108	L65+L10-L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L109	L65-L10-L12	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis
L110	L65+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L111	L65-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along X axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L112	L65+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L113	L65-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Win Load Along Z axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L114	L65+L9+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L115	L65-L9+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L116	L65+L10+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L117	L65-L10+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L118	L65+L9-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L119	L65-L9-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along YZ axis)

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
				and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L120	L65+L10-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L121	L65-L10-L13	OPE	Algebraic	Operation Condition and Occasional Loads (Operation Acceleration along XY axis) and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L122	L64+L9+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L123	L64-L9+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L124	L64+L9-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L125	L64-L9-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L126	L64+L10+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L127	L64-L10+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L128	L64+L10-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L129	L64-L10-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L130	L64+L9+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
				Acceleration (Displacement OperationCondition)
L131	L64-L9+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L132	L64+L9-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L133	L64-L9-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L134	L64+L10+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement v Condition)
L135	L64-L10+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L136	L64+L10-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L137	L64-L10-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L138	L65+L9+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L139	L65-L9+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L140	L65+L9-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L141	L65-L9-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L142	L65+L10+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L143	L65-L10+L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L144	L65+L10-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L145	L65-L10-L11+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along X axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L146	L65+L9+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L147	L65-L9+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L148	L65+L9-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L149	L65-L9-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L150	L65+L10+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L151	L65-L10+L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
				Acceleration (Displacement Operation Condition)
L152	L65+L10-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L153	L65-L10-L12+L13	OPE	Algebraic	Operation Condition, Operation Acceleration Due Wave and Win Pres. Along Z axis and Struc. Deflection Due to Acceleration (Displacement Operation Condition)
L154	L28-L29+L13	EXP	Algebraic	Thermal Stress Range Checking
L155	L3	HYD		Hydro Stress
L156	L8,L35,L36,L37,L38	SUS	MAX	Max Sustained Stress
L157	L25,L26,L27,L28,L29,L30,L154	EXP	MAX	Max Expansion Stress (Thermal Stress Range)
L158	L31,L32,L33,L34,L35,L40,L41,L42,L43,L44, L45,L46,L47,L48,L49,L50,L51,L52,L53,L54, L55, L56, L62,L58,L59,L60,L61,L62,L62	OCC	MAX	Max Occ Stress
L159	L4,L8,L64,L65,L66,L67,L68, L69,L70,L71,L72 L73,L74,L75,L76,L77,L78,L79,L80,L81,L82, L83,L84,L85,L86	OPE	MAX	
L160	L87,L88,L89,L90,L91,L92,L93,L94,L95,L96, L97,L98,L99,L100,L101,L102,L103,L104, L105,L106,L107,L108,L109,L110,L111,L112,L113	OPE	MAX	
L161	L114,L115,L116,L117,L118,L119,L120,L121,L122,L123,L124,L125,L126,L127,L128,L129,L130,L131,L132,L133,L134,L135,L136,L137,L138	OPE	MAX	
L162	L139,L140,L141,L142,L143,L144,L145,L146, L147, L148,L149,L150,L151,L152,L153	OPE	MAX	
L163	L158,L159,L160,L161,L162	OPE	MAX	Nozzle Loads , Support Load (OPE)
L164	L14,L15,L16,L17,L18,L19,L20,L21,L22	OCC	MAX	Support Load (OCC - PSV, Slug)
L165	L25,L26,L27,L154	EXP	MAX	

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L166	L16,L17,L18,L19,L20,L21,L22	OCC	MAX	
L167	0.53L13	EXP		Adj Hogg = Sagg x 0,41
L168	0.077L167	EXP		Adj MHs = 0,75m
L169	0.179L167	EXP		Adj MHs = 1,75m
L170	0.282L167	EXP		Adj MHs = 2,75m
L171	0.385L167	EXP		Adj MHs = 3,75m
L172	0.487L167	EXP		Adj MHs = 4,75m
L173	0.59L167	EXP		Adj MHs = 5,75m
L174	L5	FAT	7000	TÉRMICA
L175	L165	FAT	7000	
L176	L168+L9	FAT	255867	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L177	L168-L9	FAT	255867	
L178	-L168+L9	FAT	255867	
L179	-L168-L9	FAT	255867	
L180	L168+L10	FAT	255867	
L181	L168-L10	FAT	255867	
L182	-L168+L10	FAT	255867	
L183	-L168-L10	FAT	255867	
L184	L169+L9	FAT	5983058	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L185	L169-L9	FAT	5983058	
L186	-L169+L9	FAT	5983058	
L187	-L169-L9	FAT	5983058	
L188	L169+L10	FAT	5983058	
L189	L169-L10	FAT	5983058	
L190	-L169+L10	FAT	5983058	
L191	-L169-L10	FAT	5983058	
L192	L170+L9	FAT	4276398	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L193	L170-L9	FAT	4276398	
L194	-L170+L9	FAT	4276398	
L195	-L170-L9	FAT	4276398	
L196	L170+L10	FAT	4276398	
L197	L170-L10	FAT	4276398	
L198	-L170+L10	FAT	4276398	
L199	-L170-L10	FAT	4276398	
L200	L171+L9	FAT	843343	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L201	L171-L9	FAT	843343	
L202	-L171+L9	FAT	843343	
L203	-L171-L9	FAT	843343	
L204	L171+L10	FAT	843343	
L205	L171-L10	FAT	843343	
L206	-L171+L10	FAT	843343	
L207	-L171-L10	FAT	843343	
L208	L172+L9	FAT	139893	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L209	L172-L9	FAT	139893	

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	MÉTODO DE COMB.	DESCRIÇÃO
L210	-L172+L9	FAT	139893	
L211	-L172-L9	FAT	139893	
L212	L172+L10	FAT	139893	
L213	L172-L10	FAT	139893	
L214	-L172+L10	FAT	139893	
L215	-L172-L10	FAT	139893	
L216	L173+L9	FAT	39126	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L217	L173-L9	FAT	39126	
L218	-L173+L9	FAT	39126	
L219	-L173-L9	FAT	39126	
L220	L173+L10	FAT	39126	
L221	L173-L10	FAT	39126	
L222	-L173+L10	FAT	39126	
L223	-L173-L10	FAT	39126	
L224	L167+L9	FAT	18665	FADIGA – ACELERAÇÃO + DESLOCAMENTOS
L225	L167-L9	FAT	18665	
L226	-L167+L9	FAT	18665	
L227	-L167-L9	FAT	18665	
L228	L167+L10	FAT	18665	
L229	L167-L10	FAT	18665	
L230	-L167+L10	FAT	18665	
L231	-L167-L10	FAT	18665	

10.1.2 Caso de carregamento do projeto executado – Estudo de Caso 5.2

CASO	COMBINAÇÃO	TIPO	Nº CICLOS	DESCRIÇÃO
L1	WW+HP+H	HYD	-	-
L2	W+D1+T1+P1+H	OPE	-	-
L3	W+D1+T1+P1+H+0.4U1+0.27U2+0.12U3	OPE	-	-
L4	W+D1+T1+P1+H+0.4U1+0.27U2-0.12U3	OPE	-	-
L5	W+D1+T1+P1+H+0.4U1-0.27U2+0.12U3	OPE	-	-
L6	W+D1+T1+P1+H+0.4U1-0.27U2-0.12U3	OPE	-	-
L7	W+D1+T1+P1+H-0.4U1+0.27U2+0.12U3	OPE	-	-
L8	W+D1+T1+P1+H-0.4U1+0.27U2-0.12U3	OPE	-	-
L9	W+D1+T1+P1+H-0.4U1-0.27U2+0.12U3	OPE	-	-
L10	W+D1+T1+P1+H-0.4U1-0.27U2-0.12U3	OPE	-	-
L11	W+D1+T1+P1+H+WIN1	OPE	-	-
L12	W+D1+T1+P1+H+WIN2	OPE	-	-
L13	W+D1+D2+T1+P1+H	OPE	-	-
L14	W+D1+D3+T1+P1+H	OPE	-	-
L15	W+D1+T1+P1+H+0.19U1+0.18U2+0.02U3	OPE	-	-
L16	W+D1+T1+P1+H+0.19U1+0.18U2-0.02U3	OPE	-	-
L17	W+D1+T1+P1+H+0.19U1-0.18U2+0.02U3	OPE	-	-
L18	W+D1+T1+P1+H+0.19U1-0.18U2-0.02U3	OPE	-	-

L19	W+D1+T1+P1+H-0.19U1+0.18U2+0.02U3	OPE	-	-
L20	W+D1+T1+P1+H-0.19U1+0.18U2-0.02U3	OPE	-	-
L21	W+D1+T1+P1+H-0.19U1-0.18U2+0.02U3	OPE	-	-
L22	W+D1+T1+P1+H-0.19U1-0.18U2-0.02U3	OPE	-	-
L23	W+D1+D4+T1+P1+H	OPE	-	-
L24	W+D1+D5+T1+P1+H	OPE	-	-
L25	W+P1+H	SUS	-	-
L26	L2-L25	EXP	-	-
L27	L13-L25	EXP	-	-
L28	L14-L25	EXP	-	-
L29	L11-L2	OCC	-	-
L30	L12-L2	OCC	-	-
L31	L13-L2	EXP	-	-
L32	L14-L2	EXP	-	-
L33	L3+L31	OPE	-	-
L34	L4+L31	OPE	-	-
L35	L5+L31	OPE	-	-
L36	L6+L31	OPE	-	-
L37	L7+L31	OPE	-	-
L38	L8+L31	OPE	-	-
L39	L9+L31	OPE	-	-
L40	L10+L31	OPE	-	-
L41	L3+L32	OPE	-	-
L42	L4+L32	OPE	-	-
L43	L5+L32	OPE	-	-
L44	L6+L32	OPE	-	-
L45	L7+L32	OPE	-	-
L46	L8+L32	OPE	-	-
L47	L9+L32	OPE	-	-
L48	L10+L32	OPE	-	-
L49	L3-L2	SUS	-	-
L50	L4-L2	SUS	-	-
L51	L5-L2	SUS	-	-
L52	L6-L2	SUS	-	-
L53	L7-L2	SUS	-	-
L54	L8-L2	SUS	-	-
L55	L9-L2	SUS	-	-
L56	L10-L2	SUS	-	-
L62	L15-L2	SUS	-	-
L58	L16-L2	SUS	-	-
L59	L17-L2	SUS	-	-
L60	L18-L2	SUS	-	-
L61	L19-L2	SUS	-	-
L62	L20-L2	SUS	-	-
L62	L21-L2	SUS	-	-
L64	L22-L2	SUS	-	-
L65	L25+L49	SUS	-	-
L66	L25+L50	SUS	-	-

L67	L25+L51	SUS	-	-
L68	L25+L52	SUS	-	-
L69	L25+L53	SUS	-	-
L70	L25+L54	SUS	-	-
L71	L25+L55	SUS	-	-
L72	L25+L56	SUS	-	-
L73	L29+L65	OCC	-	-
L74	L29+L66	OCC	-	-
L75	L29+L67	OCC	-	-
L76	L29+L68	OCC	-	-
L77	L29+L69	OCC	-	-
L78	L29+L70	OCC	-	-
L79	L29+L71	OCC	-	-
L80	L29+L72	OCC	-	-
L81	L30+L65	OCC	-	-
L82	L30+L66	OCC	-	-
L83	L30+L67	OCC	-	-
L84	L30+L68	OCC	-	-
L85	L30+L69	OCC	-	-
L86	L30+L70	OCC	-	-
L87	L30+L71	OCC	-	-
L88	L30+L72	OCC	-	-
L89	L23-L2	EXP	-	-
L90	L24-L2	EXP	-	-
L91	L26	FAT	7000	TÉRMICA
L92	0.6L31-0.6L32+L49	FAT	1	Faixa 10 de altura de onda - Fator 1,0 - DEC
L93	0.6L31-0.6L32+L50	FAT	1	
L94	0.6L31-0.6L32+L51	FAT	1	
L95	0.6L31-0.6L32+L52	FAT	1	
L96	0.6L31-0.6L32+L53	FAT	1	
L97	0.6L31-0.6L32+L54	FAT	1	
L98	0.6L31-0.6L32+L55	FAT	1	
L99	0.6L31-0.6L32+L56	FAT	1	
L100	0.48L31-0.48L32+L49	FAT	909	Faixa 9 de altura de onda - Fator 0,8 - DEC
L101	0.48L31-0.48L32+L50	FAT	909	
L102	0.48L31-0.48L32+L51	FAT	909	
L103	0.48L31-0.48L32+L52	FAT	909	
L104	0.48L31-0.48L32+L53	FAT	909	
L105	0.48L31-0.48L32+L54	FAT	909	
L106	0.48L31-0.48L32+L55	FAT	909	
L107	0.48L31-0.48L32+L56	FAT	909	
L108	0.36L31-0.36L32+L49	FAT	2878	Faixa 8 de altura de onda - Fator 0,6 - DEC
L109	0.36L31-0.36L32+L50	FAT	2878	
L110	0.36L31-0.36L32+L51	FAT	2878	
L111	0.36L31-0.36L32+L52	FAT	2878	
L112	0.36L31-0.36L32+L53	FAT	2878	
L113	0.36L31-0.36L32+L54	FAT	2878	
L114	0.36L31-0.36L32+L55	FAT	2878	

L115	0.36L31-0.36L32+L56	FAT	2878	
L116	0.6L89-0.6L90+L62	FAT	6056	Faixa 7 de altura de onda - Fator 1.0 - DOC
L117	0.6L89-0.6L90+L58	FAT	6056	
L118	0.6L89-0.6L90+L59	FAT	6056	
L119	0.6L89-0.6L90+L60	FAT	6056	
L120	0.6L89-0.6L90+L61	FAT	6056	
L121	0.6L89-0.6L90+L62	FAT	6056	
L122	0.6L89-0.6L90+L62	FAT	6056	
L123	0.6L89-0.6L90+L64	FAT	6056	
L124	0.42L89-0.42L90+L62	FAT	15900	Faixa 6 de altura de onda - Fator 0,7 - DOC
L125	0.42L89-0.42L90+L58	FAT	15900	
L126	0.42L89-0.42L90+L59	FAT	15900	
L127	0.42L89-0.42L90+L60	FAT	15900	
L128	0.42L89-0.42L90+L61	FAT	15900	
L129	0.42L89-0.42L90+L62	FAT	15900	
L130	0.42L89-0.42L90+L62	FAT	15900	
L131	0.42L89-0.42L90+L64	FAT	15900	
L132	0.3L89-0.3L90+L62	FAT	53450	Faixa 5 de altura de onda - Fator 0,5 - DOC
L133	0.3L89-0.3L90+L58	FAT	53450	
L134	0.3L89-0.3L90+L59	FAT	53450	
L135	0.3L89-0.3L90+L60	FAT	53450	
L136	0.3L89-0.3L90+L61	FAT	53450	
L137	0.3L89-0.3L90+L62	FAT	53450	
L138	0.3L89-0.3L90+L62	FAT	53450	
L139	0.3L89-0.3L90+L64	FAT	53450	
L140	0.18L89-0.18L90+L62	FAT	184737	Faixa 4 de altura de onda - Fator 0,3 - DOC
L141	0.18L89-0.18L90+L58	FAT	184737	
L142	0.18L89-0.18L90+L59	FAT	184737	
L143	0.18L89-0.18L90+L60	FAT	184737	
L144	0.18L89-0.18L90+L61	FAT	184737	
L145	0.18L89-0.18L90+L62	FAT	184737	
L146	0.18L89-0.18L90+L62	FAT	184737	
L147	0.18L89-0.18L90+L64	FAT	184737	
L148	0.12L89-0.12L90+L62	FAT	980456	Faixa 3 de altura de onda - Fator 0,2 - DOC
L149	0.12L89-0.12L90+L58	FAT	980456	
L150	0.12L89-0.12L90+L59	FAT	980456	
L151	0.12L89-0.12L90+L60	FAT	980456	
L152	0.12L89-0.12L90+L61	FAT	980456	
L153	0.12L89-0.12L90+L62	FAT	980456	
L154	0.12L89-0.12L90+L62	FAT	980456	
L155	0.12L89-0.12L90+L64	FAT	980456	
L156	0.06L89-0.06L90+L62	FAT	4436056	Faixa 2 de altura de onda - Fator 0,1 - DOC
L157	0.06L89-0.06L90+L58	FAT	4436056	
L158	0.06L89-0.06L90+L59	FAT	4436056	
L159	0.06L89-0.06L90+L60	FAT	4436056	
L160	0.06L89-0.06L90+L61	FAT	4436056	
L161	0.06L89-0.06L90+L62	FAT	4436056	
L162	0.06L89-0.06L90+L62	FAT	4436056	

L163	0.06L89-0.06L90+L64	FAT	4436056	
L164	0.03L89-0.03L90+L62	FAT	5784015	Faixa 1 de altura de onda - Fator 0,05 - DOC
L165	0.03L89-0.03L90+L58	FAT	5784015	
L166	0.03L89-0.03L90+L59	FAT	5784015	
L167	0.03L89-0.03L90+L60	FAT	5784015	
L168	0.03L89-0.03L90+L61	FAT	5784015	
L169	0.03L89-0.03L90+L62	FAT	5784015	
L170	0.03L89-0.03L90+L62	FAT	5784015	
L171	0.03L89-0.03L90+L64	FAT	5784015	
L172	L65,L66,L67,L68,L69,L70,L71,L72	SUS	-	-
L173	L73,L74,L75,L76,L77,L78,L79,L80,L81,L82,L83,L84,L85,L86,L87,L88	OCC	-	-
L174	L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,L14,L33,L34,L35,L36,L37,L38,L39,L40,L41,L42,L43,L44,L45,L46,L47,L48	OPE	-	-

10.1.3 Caso de carregamento do projeto executado – Estudo de Caso 5.3

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L1	WW+HP	HYD		HYDROSTATIC TEST
L2	W+T1+P1+D1	OPE		DESIGN CONDITION
L3	W+T1+P1+D1+A1.U1+B1.U2+ C1.U3	OPE		DESIGN CONDITION + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)
L4	W+T1+P1+D1+A1.U1+B1.U2-C1.U3	OPE		
L5	W+T1+P1+D1+A1.U1-B1.U2+C1.U3	OPE		
L6	W+T1+P1+D1+A1.U1-B1.U2-C1.U3	OPE		
L7	W+T1+P1+D1-A1.U1+B1.U2+C1.U3	OPE		
L8	W+T1+P1+D1-A1.U1+B1.U2-C1.U3	OPE		
L9	W+T1+P1+D1-A1.U1-B1.U2+C1.U3	OPE		
L10	W+T1+P1+D1-A1.U1-B1.U2-C1.U3	OPE		
L11	W+T1+P1+D1+WIN1	OPE		DESIGN CONDITION + WIN1
L12	W+T1+P1+D1+WIN2	OPE		DESIGN CONDITION + WIN2
L13	W+T1+P1+D1+D2	OPE		DESIGN CONDITION + SAGGING (DEC)
L14	W+T1+P1+D1+D3	OPE		DESIGN CONDITION + HOGGING (DEC)
L15	W+T1+P1+D1+A2.U1+B2.U2+	OPE		

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
	C2.U3			DESIGN CONDITION + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DOC)
L16	W+T1+P1+D1+A2.U1+B2.U2-C2.U3	OPE		
L17	W+T1+P1+D1+A2.U1-B2.U2+C2.U3	OPE		
L18	W+T1+P1+D1+A2.U1-B2.U2-C2.U3	OPE		
L19	W+T1+P1+D1-A2.U1+B2.U2+C2.U3	OPE		
L20	W+T1+P1+D1-A2.U1+B2.U2-C2.U3	OPE		
L21	W+T1+P1+D1-A2.U1-B2.U2+C2.U3	OPE		
L22	W+T1+P1+D1-A2.U1-B2.U2-C2.U3	OPE		
L23	W+T1+P1+D1+D4	OPE		DESIGN CONDITION + SAGGING (DOC)
L24	W+T1+P1+D1+D5	OPE		DESIGN CONDITION + HOGGING (DOC)
L25	W+P1	SUS		SUSTAINED LOADS
L26	L2-L25	EXP		EXPANSION (T1+D1)
L27	L13-L25	EXP		EXPANSION (T1+D1+D2)
L28	L14-L25	EXP		EXPANSION (T1+D1+D3)
L29	L11-L2	OCC		WIN1
L30	L12-L2	OCC		WIN2
L31	L13-L2	EXP		D2 (SAGGING DEC)
L32	L14-L2	EXP		D3 (HOGGING DEC)
L33	L3+L31	OPE		DESIGN CONDITION + D(2,3) + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)
L34	L4+L31	OPE		
L35	L5+L31	OPE		
L36	L6+L31	OPE		
L37	L7+L31	OPE		
L38	L8+L31	OPE		

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L1	WW+HP	HYD		HYDROSTATIC TEST
L2	W+T1+P1+D1	OPE		DESIGN CONDITION
L3	W+T1+P1+D1+A1.U1+B1.U2+ C1.U3	OPE		DESIGN CONDITION + COMBINATION OF
L4	W+T1+P1+D1+A1.U	OPE		

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
	1+B1.U2-C1.U3			ACCELERATIONS (DEC)
L5	W+T1+P1+D1+A1.U 1-B1.U2+C1.U3	OPE		
L6	W+T1+P1+D1+A1.U 1-B1.U2-C1.U3	OPE		
L7	W+T1+P1+D1-A1.U1+B1.U2+C1.U3	OPE		
L8	W+T1+P1+D1-A1.U1+B1.U2-C1.U3	OPE		
L9	W+T1+P1+D1-A1.U1-B1.U2+C1.U3	OPE		
L10	W+T1+P1+D1-A1.U1-B1.U2-C1.U3	OPE		
L11	W+T1+P1+D1+WIN1	OPE		DESIGN CONDITION + WIN1
L12	W+T1+P1+D1+WIN2	OPE		DESIGN CONDITION + WIN2
L13	W+T1+P1+D1+D2	OPE		DESIGN CONDITION + SAGGING (DEC)
L14	W+T1+P1+D1+D3	OPE		DESIGN CONDITION + HOGGING (DEC)
L15	W+T1+P1+D1+A2.U 1+B2.U2+ C2.U3	OPE		DESIGN CONDITION + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DOC)
L16	W+T1+P1+D1+A2.U 1+B2.U2-C2.U3	OPE		
L17	W+T1+P1+D1+A2.U 1-B2.U2+C2.U3	OPE		
L18	W+T1+P1+D1+A2.U 1-B2.U2-C2.U3	OPE		
L19	W+T1+P1+D1-A2.U1+B2.U2+C2.U3	OPE		
L20	W+T1+P1+D1-A2.U1+B2.U2-C2.U3	OPE		
L21	W+T1+P1+D1-A2.U1-B2.U2+C2.U3	OPE		
L22	W+T1+P1+D1-A2.U1-B2.U2-C2.U3	OPE		
L23	W+T1+P1+D1+D4	OPE		DESIGN CONDITION + SAGGING (DOC)
L24	W+T1+P1+D1+D5	OPE		DESIGN CONDITION + HOGGING (DOC)
L25	W+P1	SUS		SUSTAINED LOADS
L26	L2-L25	EXP		EXPANSION (T1+D1)
L27	L13-L25	EXP		EXPANSION (T1+D1+D2)

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L28	L14-L25	EXP		EXPANSION (T1+D1+D3)
L29	L11-L2	OCC		WIN1
L30	L12-L2	OCC		WIN2
L31	L13-L2	EXP		D2 (SAGGING DEC)
L32	L14-L2	EXP		D3 (HOGGING DEC)
L33	L3+L31	OPE		DESIGN CONDITION + D(2,3) + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)
L34	L4+L31	OPE		
L35	L5+L31	OPE		
L36	L6+L31	OPE		
L37	L7+L31	OPE		
L38	L8+L31	OPE		
L39	L9+L31	OPE		
L40	L10+L31	OPE		
L41	L3+L32	OPE		
L42	L4+L32	OPE		
L43	L5+L32	OPE		
L44	L6+L32	OPE		
L45	L7+L32	OPE		
L46	L8+L32	OPE		
L47	L9+L32	OPE		
L48	L10+L32	OPE		
L49	L3-L2	SUS		COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)
L50	L4-L2	SUS		
L51	L5-L2	SUS		
L52	L6-L2	SUS		
L53	L7-L2	SUS		
L54	L8-L2	SUS		
L55	L9-L2	SUS		
L56	L10-L2	SUS		
L57	L15-L2	SUS		COMBINATION OF ACCELERATIONS (DOC)
L58	L16-L2	SUS		
L59	L17-L2	SUS		
L60	L18-L2	SUS		
L61	L19-L2	SUS		
L62	L20-L2	SUS		
L63	L21-L2	SUS		
L64	L22-L2	SUS		
L65	L25+L49	SUS		W+P1 + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC) SCALAR
L66	L25+L50	SUS		
L67	L25+L51	SUS		
L68	L25+L52	SUS		
L69	L25+L53	SUS		
L70	L25+L54	SUS		

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L71	L25+L55	SUS		
L72	L25+L56	SUS		
L73	L29+L65	OCC		W+P1 + WIN(1,2) + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)SCALAR
L74	L29+L66	OCC		
L75	L29+L67	OCC		
L76	L29+L68	OCC		
L77	L29+L69	OCC		
L78	L29+L70	OCC		
L79	L29+L71	OCC		
L80	L29+L72	OCC		
L81	L30+L65	OCC		
L82	L30+L66	OCC		
L83	L30+L67	OCC		
L84	L30+L68	OCC		
L85	L30+L69	OCC		
L86	L30+L70	OCC		
L87	L30+L71	OCC		
L88	L30+L72	OCC		
L89	L23-L2	EXP		D4 (SAGGING DOC)
L90	L24-L2	EXP		D5 (HOGGING DOC)
L91	L26	FAT	7000	EXPANSION (T1+D1)
L92	0.6L31-0.6L32+L49	FAT	1	0.6(D2-D3)+A1.U1+B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L93	0.6L31-0.6L32+L50	FAT	1	0.6(D2-D3)+A1.U1+B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L94	0.6L31-0.6L32+L51	FAT	1	0.6(D2-D3)+A1.U1-B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L95	0.6L31-0.6L32+L52	FAT	1	0.6(D2-D3)+A1.U1-B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L96	0.6L31-0.6L32+L53	FAT	1	0.6(D2-D3)-A1.U1+B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L97	0.6L31-0.6L32+L54	FAT	1	0.6(D2-D3)-A1.U1+B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L98	0.6L31-0.6L32+L55	FAT	1	0.6(D2-D3)-A1.U1-B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L99	0.6L31-0.6L32+L56	FAT	1	0.6(D2-D3)-A1.U1-B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L100	0.48L31-0.48L32+L49	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3+A1.U1+B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L101	0.48L31-0.48L32+L50	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3+A1.U1+B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L102	0.48L31-0.48L32+L51	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3+A1.U1-B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L103	0.48L31-0.48L32+L52	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3+A1.U1-B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L104	0.48L31-0.48L32+L53	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3-A1.U1+B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L105	0.48L31-0.48L32+L54	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3-A1.U1+B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L106	0.48L31-0.48L32+L55	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3-A1.U1-B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L107	0.48L31-0.48L32+L56	FAT	909	0.48.D2-0.48.D3-A1.U1-B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L108	0.36L31-0.36L32+L49	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3+A1.U1+B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L109	0.36L31-0.36L32+L50	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3+A1.U1+B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L110	0.36L31-0.36L32+L51	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3+A1.U1-B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L111	0.36L31-0.36L32+L52	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3+A1.U1-B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L112	0.36L31-0.36L32+L53	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3-A1.U1+B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L113	0.36L31-0.36L32+L54	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3-A1.U1+B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L114	0.36L31-0.36L32+L55	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3-A1.U1-B1.U2+C1.U3 (DEC CONDITION)
L115	0.36L31-0.36L32+L56	FAT	2878	0.36.D2-0.36.D3-A1.U1-

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
				B1.U2-C1.U3 (DEC CONDITION)
L116	0.6L89-0.6L90+L57	FAT	6056	0.6(D4-D5)+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L117	0.6L89-0.6L90+L58	FAT	6056	0.6(D4-D5)+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L118	0.6L89-0.6L90+L59	FAT	6056	0.6(D4-D5)+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L119	0.6L89-0.6L90+L60	FAT	6056	0.6(D4-D5)+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L120	0.6L89-0.6L90+L61	FAT	6056	0.6(D4-D5)-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L121	0.6L89-0.6L90+L62	FAT	6056	0.6(D4-D5)-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L122	0.6L89-0.6L90+L63	FAT	6056	0.6(D4-D5)-A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L123	0.6L89-0.6L90+L64	FAT	6056	0.6(D4-D5)-A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L124	0.42L89-0.42L90+L57	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L125	0.42L89-0.42L90+L58	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L126	0.42L89-0.42L90+L59	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L127	0.42L89-0.42L90+L60	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L128	0.42L89-0.42L90+L61	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L129	0.42L89-0.42L90+L62	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L130	0.42L89-0.42L90+L63	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5-A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L131	0.42L89-0.42L90+L64	FAT	15900	0.42.D4-0.42.D5-A2.U1-B2.U2-C2.U3

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
				(DOC CONDITION)
L132	0.3L89-0.3L90+L57	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L133	0.3L89-0.3L90+L58	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L134	0.3L89-0.3L90+L59	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L135	0.3L89-0.3L90+L60	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L136	0.3L89-0.3L90+L61	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L137	0.3L89-0.3L90+L62	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L138	0.3L89-0.3L90+L63	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5-A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L139	0.3L89-0.3L90+L64	FAT	53450	0.3.D4-0.3.D5-A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L140	0.18L89-0.18L90+L57	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L141	0.18L89-0.18L90+L58	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L142	0.18L89-0.18L90+L59	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L143	0.18L89-0.18L90+L60	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L144	0.18L89-0.18L90+L61	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L145	0.18L89-0.18L90+L62	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L146	0.18L89-0.18L90+L63	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5-A2.U1-B2.U2+C2.U3

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
				(DOC CONDITION)
L147	0.18L89-0.18L90+L64	FAT	184737	0.18.D4-0.18.D5-A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L148	0.12L89-0.12L90+L57	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L149	0.12L89-0.12L90+L58	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L150	0.12L89-0.12L90+L59	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L151	0.12L89-0.12L90+L60	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L152	0.12L89-0.12L90+L61	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L153	0.12L89-0.12L90+L62	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L154	0.12L89-0.12L90+L63	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5-A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L155	0.12L89-0.12L90+L64	FAT	980456	0.12.D4-0.12.D5-A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L156	0.06L89-0.06L90+L57	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L157	0.06L89-0.06L90+L58	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L158	0.06L89-0.06L90+L59	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L159	0.06L89-0.06L90+L60	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L160	0.06L89-0.06L90+L61	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L161	0.06L89-0.06L90+L62	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)

	LOAD CASES	STRESS TYPE	LOAD CYCLES	DESCRIPTION
L162	0.06L89-0.06L90+L63	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5-A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L163	0.06L89-0.06L90+L64	FAT	4436056	0.06.D4-0.06.D5-A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L164	0.03L89-0.03L90+L57	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5+A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L165	0.03L89-0.03L90+L58	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5+A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L166	0.03L89-0.03L90+L59	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5+A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L167	0.03L89-0.03L90+L60	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5+A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L168	0.03L89-0.03L90+L61	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5-A2.U1+B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L169	0.03L89-0.03L90+L62	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5-A2.U1+B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L170	0.03L89-0.03L90+L63	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5-A2.U1-B2.U2+C2.U3 (DOC CONDITION)
L171	0.03L89-0.03L90+L64	FAT	5784015	0.03.D4-0.03.D5-A2.U1-B2.U2-C2.U3 (DOC CONDITION)
L172	L65,L66,L67,L68,L69,L70,L71, L72	SUS		MAXIMUM: W+P1 + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)
L173	L73,L74,L75,L76,L77,L78,L79, L80,L81,L82,L83,L84,L85,L86, L87,L88	OCC		MAXIMUM: W+P1 + WIN(1,2) + COMBINATION OF ACCELERATIONS (DEC)
L174	L2,L3,L4,L5,L6, L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,L14, L33,L34,L35,L36,L37,L38,L39,L40, L41,L42,L43,L44,L45,L46,L47, L48	OPE		MAXIMUM: W+T1+P1+D1 / WIN(1,2) / D(2,3) / COMBINATION OF ACCELERATIONS

10.1.4 Determinação da Tensão de Fadiga pelo CAESAR II

A tensão atuante baseada no critério da tensão admissível pode ser determinada através dos seguintes passos:

1 – Determinação da tensão devido às acelerações:

Conforme consta no manual do *software*, devido ao fato do código ASME B31 não abordar o cálculo de fadiga, o CAESAR II leva em consideração no cálculo de fadiga, para todos os códigos de tubulações, com exceção do código IGE/TD/12 (por ser o único que contempla o cálculo de fadiga), a maior intensidade de tensão *(3D stress intensity)* para os quatro pontos da seção transversal apresentados na Figura 17.

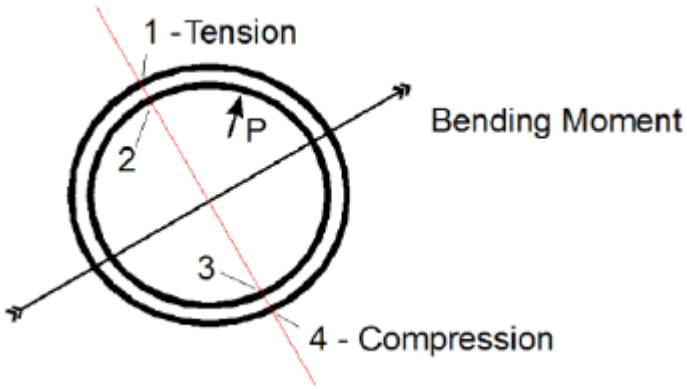


Fig. 78 Indicação da posição dos quatro pontos da seção transversal (Caesar II User's Guide, 2019). Fonte:

O *software* calcula a tensão principal a partir da tensão longitudinal, tensão circunferencial e tensão de cisalhamento. As tensões são determinadas no estado plano de tensões, conforme demonstra a Figura 6.4.

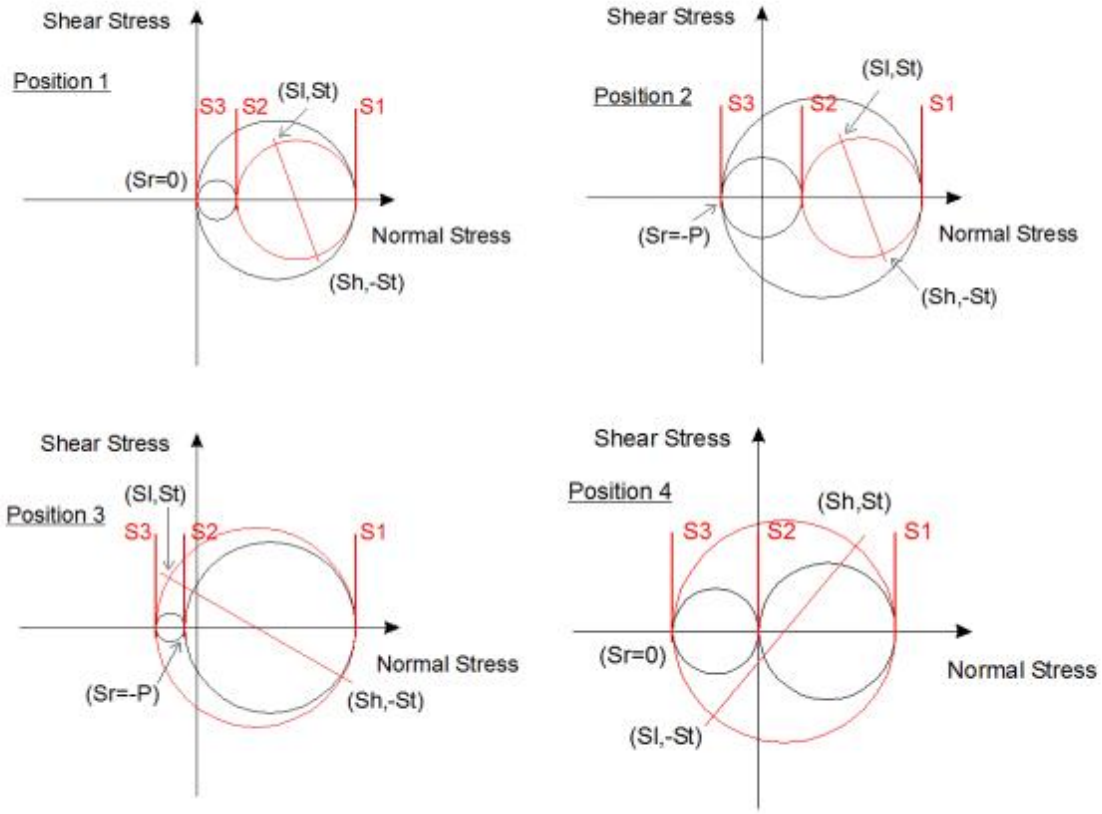


Fig. 79 Determinação das tensões principais nos quatro pontos da seção transversal (Caesar II User's Guide, 2019). Fonte:

A tensão *3D stress intensity* corresponde à maior intensidade de tensão entre as tensões principais S1 e S3.

Sendo assim, para a análise de fadiga baseada no critério da tensão admissível, deve ser determinada a tensão média *3D Max. Stress Intensity* para os maiores *stress ratios* devido às acelerações tanto para a condição DOC (caso L54 ao L61), quanto para a condição DEC (caso L62 ao L69). A obtenção destes resultados pode ser feita a partir da saída de dados do *software* em conjunto com a utilização de planilhas com a aplicação de macros, de forma a buscar os resultados da análise e automatizar a obtenção da média.

2 – Determinação das tensões devido aos deslocamentos:

Conforme observado deverá ser determinada a tensão *3D Máx. Stress Intensity* para o caso de carregamento que contempla o deslocamento estrutural devido à passagem da onda centenária na condição DEC (L93), e também, devido à passagem da maior altura de onda (8 metros) para a condição DOC (L81).

3 – Somatório dos resultados de tensões *3D Máx. Stress Intensity*:

O somatório das tensões *3D Máx. Stress Intensity* respectivas às condições DOC e DEC correspondem às tensões atuantes no sistema de tubulações, às quais deverão ser comparadas com as tensões admissíveis estipuladas no início do estudo, a partir da definição dos dados de entrada do estudo de fadiga.

O Capítulo VII desta dissertação, demonstra um caso prático de aplicação do critério da tensão admissível baseado no estudo de caso 5.1.2 apresentado nesta dissertação.