



COPPE/UFRJ

ANÁLISE DE FADIGA EM *RISERS* RÍGIDOS CONSIDERANDO VARIAÇÃO DE
PARÂMETROS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E TRINCHEIRAS

Heric Dutra Geaquinto

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

Orientadores: Luís Volnei Sudati Segrilo
Marcos Queija de Siqueira

Rio de Janeiro
Setembro de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ANÁLISE DE FADIGA EM *RISERS* RÍGIDOS CONSIDERANDO VARIAÇÃO DE
PARÂMETROS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E TRINCHEIRAS

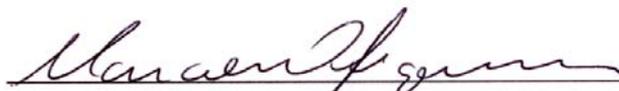
Heric Dutra Geaquinto

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

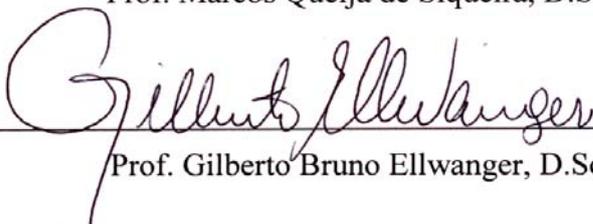
Aprovada por:



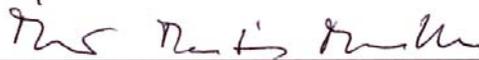
Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.



Prof. Marcos Queija de Siqueira, D.Sc.



Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.



Dr. Márcio Martins Mourelle, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2008

Geaquinto, Heric Dutra

Análise de Fadiga em *Risers* Rígidos Considerando a Variação de Parâmetros da Interação Solo Estrutura e Trincheiras/ Heric Dutra Geaquinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XVII, 81 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luís Volnei Sudati Sagrilo, Marcos Queija de Siqueira.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 74-78.

1. *Riser*. 2. Solo. 3. Trincheira. 4. Fadiga. I. Sagrilo, Luís Volnei Sudati, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“Nunca, jamais desanimeis, embora
venham ventos contrários...”*

Santa Paulina.

DEDICATÓRIA

Com carinho aos meus pais Luiz e Helena
e irmãos Heron, Helder e Helton.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de ter chegado até aqui.

Algumas pessoas tiveram muita importância para mim ao longo da realização desse trabalho, por isso, agradeço:

- Aos meus pais Luiz Augusto Geaquinto e Helena Maria Dutra Geaquinto pelo exemplo de caráter, carinho, educação transmitidos a mim ao longo da vida. Obrigado!

- Ao meu tio Sebastião Fioretti e tia Mary por todo apoio e ajuda que tive quando cheguei ao Rio.

- Aos meus amigos Rodrigo Pena, Rômulo e Fred pela grande amizade e companheirismo que foram fundamentais para mim durante esse período de mestrado.

- Ao Professor Sagrilo, antes de tudo pela amizade e também pela oportunidade de trabalhar no LACEO, pela imensa contribuição e paciente ajuda na realização deste trabalho.

- Ao Professor Marcos Queija pelos ensinamentos passados a mim a respeito de análise de *risers* e pela fundamental contribuição para a realização deste trabalho.

- Ao Professor Gilberto Ellwanger por todo aprendizado e imenso conhecimento transmitido durante as aulas.

- Aos colegas de mestrado Aline Nacif, Sandro, Fernando Loureiro pela ajuda e estudo ao longo das disciplinas e aos colegas do LACEO Fernando Mendes, Cristiano, Thiago, Ricardo Pereira e Felipe Bazán pela paciente e imediata ajuda em todos os momentos. E também aos colegas Bruno Menechini e Luciene pela grande amizade.

- Aos colegas Flávio e Nordino pela paciência nos últimos meses.

- Aos amigos Luiz Eduardo Carneiro e Taisa pelos ótimos momentos proporcionados a mim e Milena.

- À minha namorada Milena, pelo amor, carinho, dedicação, paciência e, acima de tudo, compreensão e incentivo durante todos os momentos.

- À CAPES, pelo apoio financeiro.

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

ANÁLISE DE FADIGA EM *RISERS* RÍGIDOS CONSIDERANDO VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E TRINCHEIRAS

Heric Dutra Geaquinto

Setembro/2008

Orientadores: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Marcos Queija de Siqueira

Programa: Engenharia Civil

Nos últimos anos, a indústria do petróleo tem investido muito em novas tecnologias para viabilização da exploração e produção de óleo em lâminas d'água cada vez mais profundas. Os *risers* rígidos têm se mostrado como uma solução viável e que atendem as exigências de normas de projeto internacionais tanto para tensões extremas bem como com relação aos critérios de vida à fadiga. Porém, um dos grandes desafios em um projeto de um SCR é garantir que os critérios apropriados de dano à fadiga sejam assegurados, particularmente na região do TDP (*Touch Down Point*) onde estes danos normalmente tendem a ser maiores do que outras regiões do *riser*.

A geometria do fundo marinho e a rigidez do solo de contato com o *riser* têm grande influência nas tensões na região do TDP e, conseqüentemente, nos aspectos relativos aos danos à fadiga nessa região. A presença de uma trincheira nessa região normalmente contribui para que as variações de tensão que causam danos à estrutura sejam mais bem distribuídas ao longo do TDP, amenizando os picos que ocorrem e, conseqüentemente, ocasionando danos menores nesta região. Quanto maior a rigidez do solo, maior é o dano à fadiga na região do TDP.

Neste trabalho, investiga-se numericamente a influência da modelagem de trincheiras e de rigidezes diferentes do solo marinho na vida à fadiga na região do TDP de um SCR.

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

PARAMETRIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION ANALYSES CONSIDERING
TRENCHING IN RIGID RISERS FATIGUE LIFE

Heric Dutra Geaquinto

September/2008

Advisors: Luís Volnei Sudati Sagrilo
Marcos Queija de Siqueira

Department: Civil Engineering

In these last years, the oil industry has invested in new technologies in order to exploit and produce oil in deeper waters. The rigid risers have been a good alternative since they usually are able to attend all design criteria concerning extreme stresses and fatigue life as well. However, one of the major challenges in the design, for instance, of a steel catenary riser (SCR) is to satisfy the fatigue design criterium, mainly in the region of the touch down point (TDP), where the fatigue damage is normally greater.

The sea bottom geometry and soil stiffness have a sensible influence on the riser stresses in the TDP region. As a consequence, they also have an influence on the fatigue damage. A trench in the TDP region usually leads to a stress distribution in this region which is normally favorable for the fatigue damage. The stiffer is the soil, the greater is the fatigue damage in the TDP zone.

This work investigates numerically the influence of including trenches in the fatigue analysis of SCRs. It also evaluates the influence of the vertical soil stiffness on the fatigue life of a SCR in the TDP zone.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
2. CONCEITOS BÁSICOS – INTERAÇÃO SOLO-RISER	4
2.1 PRINCIPAIS EFEITOS DO SOLO SOBRE RISERS EM CATENÁRIA.....	4
2.1.1 A IMPORTÂNCIA DA INTERAÇÃO <i>RISER</i> -SOLO NO PROJETO DE UM SCR.....	5
2.1.2 OBSERVAÇÕES DE CAMPO	7
2.2 PRINCIPAIS MECANISMOS DE INTERAÇÃO <i>RISER</i> -SOLO MARINHO.....	9
2.2.1 O EFEITO DOS MOVIMENTOS DO RISER NO SOLO MARINHO.....	9
2.2.2 O EFEITO DA ÁGUA NO SOLO MARINHO	9
2.2.3 O EFEITO DO SOLO MARINHO NO RISER.....	9
2.2.4 EFEITO DE CARREGAMENTO CÍCLICO.....	10
2.3 MODELAGEM E ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO- <i>RISER</i>	11
2.3.1 CURVAS DE RESPOSTA DO SOLO.....	11
2.3.2 CURVAS P-Y OU DE REAÇÃO VERTICAL	12
2.3.3 MOLAS DE REAÇÃO DO SOLO	13
2.3.4 ASPECTOS ADICIONAIS SOBRE A MODELAGEM DO FUNDO MARINHO NO ANFLEX.....	18
2.3.5 MODELAGEM DA FORMA DE UMA TRINCHEIRA.....	21
3. ANÁLISE DE FADIGA	24
3.1 CARREGAMENTOS DE FADIGA – CICLOS DE TENSÃO	25
3.1.1 AMPLITUDE CONSTANTE	26
3.1.2 AMPLITUDE VARIÁVEL	27
3.2 CURVAS S-N	28
3.3 CÁLCULO DO DANO CUMULATIVO – REGRA DE MINER.....	31
3.4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS	33
3.5 ANÁLISE DINÂMICA ALEATÓRIA GLOBAL	36
3.6 CÁLCULO DAS TENSÕES PARA ANÁLISE DE FADIGA	37

4. MODELAGEM DE TRINCHEIRA NA ANÁLISE DE FADIGA DE UM SCR.....	40
4.1 O MODELO ESTRUTURAL DO SCR.....	40
4.2 CASOS DE CARREGAMENTO UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	43
4.2.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA MODELAGEM DO SOLO MARINHO.....	44
4.3 DEFINIÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE TRINCHEIRA.....	46
5. ANÁLISES E RESULTADOS.....	52
5.1 ANÁLISE DE FADIGA SEM CONSIDERAR TRINCHEIRA.....	52
5.2 ANÁLISE DE FADIGA CONSIDERANDO TRINCHEIRA	55
5.3 ANÁLISE DE FADIGA COM TRINCHEIRA E OFFSETS ESTÁTICOS FIXOS.....	62
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
7. REFERÊNCIAS.....	74
ANEXO - A.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Contribuição do dano à fadiga no TDP de um SCR [1]	6
Figura 2-2 – Exemplo de curva P-y de interação entre o solo e o <i>riser</i> (condições extremas) extraída de [11].	12
Figura 2-3 – Molas elasto-plásticas não lineares: (a) axial; (b) lateral (μ_x – coeficiente de atrito axial; μ_y -coeficiente de atrito lateral, d_x - deslocamento de mobilização axial; d_y - deslocamento de mobilização lateral, k_x -rigidez axial, k_y -rigidez lateral).....	15
Figura 2-4 – Comportamento do tubo apenas apoiado ou semi-enterrado	16
Figura 2-5 – Mola de reação vertical.....	16
Figura 2-6 – Molas disponíveis no ANFLEX.....	17
Figura 2-7 – Mola não-linear elástica para reação vertical.....	17
Figura 2-8 – Rigidez vertical do solo. (a) modelo com sucção e (b) idealização sem sucção para o ANFLEX.	19
Figura 2-9 – Exemplo de trincheira.	20
Figura 2-10 – Curvas força vs. deslocamento: (a) com gap, (b) sem gap.	20
Figura 2-11 – Perfil de um SCR de exportação de gás no Campo de Allegheny, Golfo do México sete meses após sua instalação. Extraído de [16]......	22
Figura 2-12 – Trincheira na região do TDP sete meses após a instalação do SCR. . Figuras extraídas de [16].	23
Figura 3-1 - Carregamento com amplitude constante.....	26
Figura 3-2 - Esquema ilustrativo da utilização do método Rain-Flow [27].	28
Figura 3-3 – Exemplo de curva S-N típica sem proteção catódica extraída de [26].	30
Figura 3-4 – Exemplo de curva S-N típica com proteção catódica extraída de [26].	30
Figura 3-5 – Elevação do mar (ondas) com forma irregular.	34

Figura 3-6 - Disposição dos pontos em torno da seção transversal.....	38
Figura 4-1 - Visão geral do modelo de SCR em elementos finitos.	41
Figura 4-2 – Aplicação do carregamento ambiental sobre o sistema <i>riser</i> - flutuante.....	44
Figura 4-3 – Definição dos parâmetros de profundidade da trincheira.	48
Figura 4-4 – Offsets aplicados ao SCR para definição do comprimento da trincheira (Escala vertical ampliada).	48
Figura 4-5 – Trincheira e geometria do <i>riser</i> na região do TDP (profundidade de trincheira 1D, $D = 0.211\text{m}$).	49
Figura 4-6 – Trincheira e geometria do <i>riser</i> na região do TDP (profundidade de trincheira 2D, $D = 0.211\text{m}$).	49
Figura 4-7 – Trincheira e geometria do <i>riser</i> na região do TDP (profundidade de trincheira 3D, $D = 0.211\text{m}$).	50
Figura 4-8 – Trincheira e geometria do <i>riser</i> na região do TDP (profundidade de trincheira 4D, $D = 0.211\text{m}$).	50
Figura 4-9 – Trincheira e geometria do <i>riser</i> na região do TDP (profundidade de trincheira 5D, $D = 0.211\text{m}$).	51
Figura 5-1 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do <i>riser</i> em função variação da rigidez vertical do solo marinho.	53
Figura 5-2 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função variação da rigidez vertical do solo marinho.	53
Figura 5-3 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função da variação rigidez vertical do solo marinho.	54
Figura 5-4 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do <i>riser</i> em função da profundidade da trincheira. Rigidez do solo: $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$	56
Figura 5-5 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$	56

Figura 5-6 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do <i>riser</i> em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo. $K_v = 3972$ kN/m ²	57
Figura 5-7 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 1478$ kN/m ²	57
Figura 5-8 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo. $K_v = 1478$ kN/m ² . 58	
Figura 5-9 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo. $K_v = 1478$ kN/m ²	58
Figura 5-10 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 315$ kN/m ²	59
Figura 5-11 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 315$ kN/m ² ... 59	
Figura 5-12 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do <i>riser</i> em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 315$ kN/m ²	60
Figura 5-13 – Gráfico comparativo dos valores mínimos de vida útil na região do TDP.....	60
Figura 5-14 – Modelo sem trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da rigidez vertical do solo marinho (<i>offsets</i> estáticos iguais).	63
Figura 5-15 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da rigidez vertical do solo marinho (<i>offsets</i> estáticos iguais).	63
Figura 5-16 – Modelo sem trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do <i>riser</i> em função da rigidez vertical do solo marinho (<i>offsets</i> estáticos iguais).....	64
Figura 5-17 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 3972$ kN/m ²).....	65
Figura 5-18 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 3972$ kN/m ²).....	65

Figura 5-19 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topod o SCR em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 3972$ kN/m ²).....	66
Figura 5-20 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 1478$ kN/m ²).....	66
Figura 5-21 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 1478$ kN/m ²).....	67
Figura 5-22 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 1478$ kN/m ²).67	
Figura 5-23 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 315$ kN/m ²).....	68
Figura 5-24 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 315$ kN/m ²).....	68
Figura 5-25 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função profundidade da trincheira (<i>offsets</i> iguais e $K_v = 315$ kN/m ²).....	69
Figura 5-26 – Gráfico comparativo dos valores mínimos de vida útil na região do TDP. (Offset estático igual para todos os estados de mar).....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Discretização da malha de elementos finitos do riser.....	42
Tabela 2 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do SCR.....	42
Tabela 3 – Propriedades da Stressjoint.....	42
Tabela 4 – Propriedades da Flex-Joint.....	43
Tabela 5 – Estados de mar utilizados nas análises de fadiga.....	43
Tabela 6 – Parâmetros de solo utilizados nas análises	45

SIMBOLOGIA

SCR – Steel Catenary Riser;

TDP – Touch Down Point;

TDZ – Touch Down Zone;

VIV – Vortex Induced Vibration;

VIM – Vortex Induced Motions;

ROV – Remote Operated Vehicle;

D – Diâmetro Externo do *riser*;

S – Ciclo de tensões;

σ_{amp} – Amplitude do Sinal de Tensões;

$\sigma_{méd}$ – Tensão Média;

$\sigma_{máx}$ – Tensão Máxima;

$\sigma_{mín}$ – Tensão Mínima;

N – Força normal;

N – Número de ciclos que levam o material à ruptura por fadiga para um determinado ciclo de tensões.

σ - Tensão de cálculo;

SCF – Stress Concentration Factor (Fator de concentração de tensões);

σ_{nom} – Tensão cíclica nominal de cálculo;

D – Dano provocado por um ciclo de tensão sobre a estrutura por ciclo de carregamento;

D_T – Somatório total do dano (Regra de Miner);

V_u – Vida útil;

L_0 – Tempo relativo à contagem do número total de ciclos de tensão do histograma;

H_s – Altura Significativa de Onda;

H_i – Altura de cada onda individual identificada no registro;

T_z – Período de Cruzamento Zero;

T_i – Período de cada onda individual identificada no registro;

T_p – Período de Pico;

$S_\eta(\omega)$ – Função de densidade espectral de Pierson-Moskowitz de dois parâmetros;

ω – frequência em Hertz (Hz);

$S_\eta(f)$ – Função de densidade espectral de JONSWAP;

f – frequência em Hertz (Hz);

γ – Parâmetro de forma do espectro de JONSWAP;

σ – Parâmetro de largura do espectro de JONSWAP;

$S_r(\omega)$ – Espectro de movimento da unidade flutuante;

RAO – Response Amplitude Operator;

$P_{\text{máx}}$ – Profundidade máxima da trincheira;

CM – coeficiente de inércia de Morison;

CD – Coeficiente de Arrasto.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do Trabalho

Steel catenary risers (SCRs) têm sido utilizados com frequência nos últimos anos como uma alternativa tecnológica para produção de óleo e gás em águas profundas e ultra-profundas. Os SCRs são bastantes atrativos devido ao baixo custo do material base, significativa capacidade de resistência estrutural e, por conseguir atender às exigências de projeto com relação à vida à fadiga e condições extremas para diversos tipos de flutuantes.

Um dos grandes desafios num projeto de SCR é garantir que os critérios de dano à fadiga sejam atendidos, particularmente na região do TDP (*Touch down Point*), ponto em que o *riser* toca o solo e onde os danos tendem a ser maiores. Com a crescente demanda de exploração em águas cada vez mais profundas e em locações com condições ambientais mais severas à fadiga, o potencial do SCR em satisfazer os critérios de dimensionamento à fadiga pode ser comprometido, ou mesmo inviabilizado, se forem usados métodos muito conservadores de análise. Sob estas circunstâncias, é desejável melhorar tais métodos para esclarecer todos os fatores que controlam a fadiga do SCR e evitar o conservadorismo excessivo.

Tradicionalmente, a análise de SCRs à fadiga é feita utilizando-se modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos em que se utiliza um modelo de solo plano que é extremamente rígido ou rígido-elástico representado por molas. Esses modelos de solo normalmente não levam em conta os efeitos de uma trincheira que é escavada pelo SCR na região do TDP, devido aos movimentos dinâmicos impostos na linha pelo flutuante.

O dano à fadiga na região do TDP depende principalmente da amplitude e frequência dos momentos fletores ao longo do SCR [2, 3]. Trincheiras podem ajudar a aumentar a vida à fadiga do SCR porque a amplitude de variação dos momentos fletores na região do TDP de um riser que está dentro de uma delas é normalmente menor que a de um riser que está sob um solo plano. Conseqüentemente, as técnicas utilizadas atualmente para se modelar o solo marinho tendem a ocasionar estimativas conservadoras do dano à fadiga. Este conservadorismo pode, inicialmente, ser

considerado como desejável, mas isto pode, na verdade, comprometer o dimensionamento de um *riser*, como mencionado anteriormente.

Portanto, é extremamente necessário que o efeito da presença de uma trincheira seja levado em conta para que se tenham melhorias nas estimativas de vida à fadiga. Esta consideração do efeito da trincheira no modelo do solo marinho é especialmente importante onde os métodos convencionais de análise de fadiga indicam que os valores de vida à fadiga de um SCR estão muito próximos do limite aceitável ou não atende a critérios de normas de projeto.

Por outro lado, ainda de acordo com [3], há uma grande necessidade de informações e compreensão dos conceitos envolvidos na modelagem de uma trincheira, o que motivou o estudo desenvolvido nessa dissertação. O estudo realizado neste trabalho busca extrair conhecimento sobre a influência da modelagem de trincheiras na região do TDP com relação à vida à fadiga de um SCR.

Para isto, foram analisados modelos em elementos finitos, utilizando-se o programa ANFLEX [4], para a simulação do efeito de trincheira e da mudança de rigidez vertical do solo na região do TDP de um SCR, buscando-se um melhor entendimento de tais aspectos sobre a vida à fadiga. As análises de fadiga propriamente ditas foram realizadas com a ajuda do programa POSFAL [5].

1.2 Organização do Texto

O texto dessa dissertação está estruturado em capítulos, apresentados na seqüência descrita a seguir.

O Capítulo 2 descreve os principais aspectos da interação solo-*riser* assim como sua importância no projeto e análise de *risers* rígidos, sua influência na avaliação do dano à fadiga e, conseqüentemente, no cálculo da vida útil. São apresentados os conceitos de TDP e TDZ e enfatiza-se a importância de cada um dos mecanismos de interação solo-*riser* na análise de fadiga de um SCR. Destaca-se principalmente a importância da geometria local na região do TDP e de parâmetros de rigidez do solo na avaliação da vida útil de um SCR. A seguir, é apresentada a modelagem da reação do solo através de molas com a descrição mais detalhada do funcionamento das mesmas no programa de análise global utilizado no trabalho (ANFLEX [4]).

No Capítulo 3, são apresentados os aspectos relativos à análise de fadiga, contemplando o conceito de fadiga, seguido de suas formas básicas de ocorrência, tipos de carregamento mais comuns que ocasionam a fadiga, a contagem dos ciclos de tensão, destacando-se o método Rain-Flow [27], utilizado neste trabalho. Em seguida, comenta-se sobre os conceitos de Curvas S-N e o cálculo do dano cumulativo através da Regra de Miner. Também são descritos os principais tipos de parâmetros ambientais que tem influência na vida à fadiga de uma estrutura *offshore*. Por fim, é descrito de forma sucinta como são geradas as séries temporais de esforços para a análise de fadiga através de uma análise dinâmica aleatória global e como esses dados são tratados pelo programa utilizado nas análises de fadiga deste trabalho (POSFAL [5]).

O Capítulo 4 apresenta os dados do modelo de elementos finitos de um SCR utilizado nas análises paramétricas dessa dissertação, assim como os valores dos parâmetros ambientais considerados. Em seguida, é detalhado todo o procedimento para a obtenção dos perfis de trincheira utilizados nas análises, assim como a verificação do “encaixe” do *riser* dentro da mesma nas situações desejadas.

No Capítulo 5, são apresentados e comentados todos os resultados das análises paramétricas de fadiga em forma de gráficos, destacando-se nos resultados a influência de uma trincheira e da rigidez do solo nas regiões do TDP e do topo, que são as mais críticas em relação ao dano à fadiga ao longo de um SCR.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais sobre as análises realizadas neste trabalho e são propostas algumas sugestões para desenvolvimento em trabalhos futuros.

2. CONCEITOS BÁSICOS – INTERAÇÃO SOLO-RISER

Neste capítulo, inicialmente, são introduzidos os conceitos básicos associados aos principais temas tratados nesta dissertação.

2.1 Principais Efeitos Do Solo Sobre Risers Em Catenária

O uso de *risers* em catenária simples para exploração de petróleo em águas profundas vem se tornando mais popular ao redor do mundo, com *risers* já instalados na Bacia de Campos e no Golfo do México.

O conceito de *risers* em catenária é naturalmente simples e é, geralmente, associado a uma extensão de um flowline ou de um pipeline. No entanto, movimentos dinâmicos impostos a um *riser* pelas unidades flutuantes e carregamentos hidrodinâmicos o levam a um comportamento estrutural mais complexo quando comparado com flowlines e pipelines. Estes aspectos fazem com que sejam necessárias sofisticadas ferramentas numéricas para ajudar no desenvolvimento do projeto, em particular na estimativa de esforços extremos e da vida à fadiga. Deve-se observar, para o caso de SCRs que a fadiga também pode ser causada por vibrações induzidas por vórtices (VIV).

Os atuais avanços na tecnologia de *risers* em catenária têm focado no melhor entendimento diversos pontos críticos, um dos quais é a interação do TDP (touch down region) com o solo marinho e suas conseqüências no comportamento estrutural de um *riser*.

De acordo com [6], estudos mostram que as tensões resultantes em um *riser* e, conseqüentemente na sua vida à fadiga, são influenciadas pela rigidez do solo marinho e pela sua geometria local na região do TDP. Devido às potenciais implicações em projetos, principalmente de SCRs, a indústria vem investindo e investigando essa interação solo-*riser* mais detalhadamente. Algumas iniciativas, incluindo programas de testes em pequena e grande escala, foram realizadas no JIP STRIDE [7] e JIP CARISIMA [8].

2.1.1 A Importância da Interação *Riser-Solo* no Projeto de um SCR

O projeto estrutural de um SCR é um processo iterativo, o qual é geralmente conduzido da seguinte maneira:

- Definição das propriedades e características físicas e geométricas do riser;
- Análises de condições extremas e;
- Análise de fadiga.

Um dimensionamento preliminar na espessura da parede do riser pode ser feito usando-se uma norma de projeto que considera pressões internas e externas, colapso hidrostático e propagante. Análises globais preliminares são então realizadas usando-se um programa de elementos finitos para que se possa levar em consideração o complexo comportamento não-linear dinâmico de um SCR.

A partir de uma matriz de carregamentos que considera combinações de correntes, ondas, movimentos das embarcações, fluidos internos, pressões em operação, devidamente assegurados para todos os casos de carregamento. As respostas obtidas após o processamento do riser sob as condições de carregamento devem estar dentro dos limites de segurança especificados por uma norma de projeto. Após a análise preliminar, é normal tentar uma otimização da configuração inicial. As alterações mais comuns a serem feitas nessa etapa são: a alteração na espessura da parede do *riser*, mudança no valor do ângulo de topo e tipo de material a ser considerado.

Após todos os parâmetros acima citados serem atendidos e as respostas extremas do riser estarem dentro dos parâmetros de segurança estipulados pela norma adotada, deve ser efetuada uma avaliação criteriosa sobre fadiga do mesmo. A melhor indicação para este tipo de análise é que ela seja realizada no domínio do tempo para que se possam levar em conta os efeitos das não-linearidades que, por sua vez, consideram aspectos importantes da interação com o solo marinho, da posição atualizada da geometria e dos carregamentos ambientais. Além do dano de fadiga de primeira ordem, existem danos devidos aos movimentos de segunda ordem do flutuante, às VIV (Vibrações Induzidas por Vórtices) e ao VIM (movimento do flutuante induzido por vórtices) devendo todos eles ser também quantificados e verificados. A estes danos, deve-se somar o dano acumulado no transporte e fabricação.

É importante salientar que esses danos são apenas uma porcentagem do dano total que ocorre na estrutura de um SCR, em especial na região do TDP. A figura a seguir mostra a contribuição desses e outros fatores para o dano à fadiga na região do TDP em um SCR.

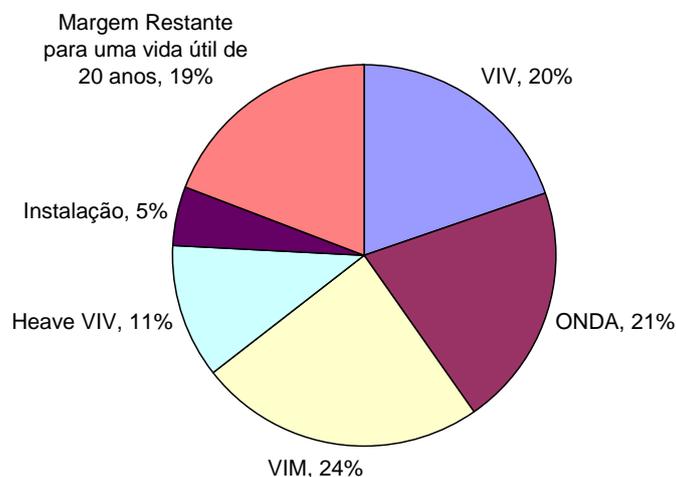


Figura 2-1 – Contribuição do dano à fadiga no TDP de um SCR [1]

Quando um *riser* está sendo analisado sob certa condição de carregamento ambiental, existem regiões do mesmo onde os esforços e tensões são maiores e mais significativas. Estas regiões de interesse particular são, normalmente, o TDP (touch down point) e o topo, ou ponto de conexão com a embarcação. Como consequência, estes são os principais pontos de ocorrência de fadiga e, também são os locais onde ocorrem os maiores momentos fletores e cargas de tração, respectivamente. O TDP é definido como sendo o ponto onde o riser toca o solo marinho.

Tendo-se estabelecido que, o TDP é um ponto crítico para o projeto de um SCR, deve-se notar que o mesmo não é um único ponto no *riser*. O TDP irá se mover constantemente com o tempo, refletindo os movimentos da embarcação e do próprio *riser*. Portanto, o termo “Touch Down Zone” (TDZ) é mais coerente de ser utilizado.

Os métodos atuais de análise fazem uso de um modelo rígido ou elástico-linear para representar a reação vertical do solo marinho sobre um *riser*. Além disso, molas de fricção/atrito são utilizadas nas direções axial e lateral do riser.

O dano à fadiga é afetado pela rigidez do solo. O uso de um solo marinho mais rígido gera um dano à fadiga bem mais elevado na TDZ se comparado com um solo

marinho com rigidez menor. As tensões resultantes de análises de extremos não são particularmente sensíveis à rigidez do solo, mas são mais influenciadas pelos coeficientes de fricção lateral quando as cargas de corrente e onda estão na direção transversal ao eixo longitudinal do riser [6].

Há várias incertezas acerca da interação *riser*-solo na medida em que observações feitas *in loco* de um SCR no Golfo do México [6], mostraram profundas trincheiras, de faces bastante íngremes, na TDZ. Estas trincheiras usualmente não são modeladas nas análises de *risers*. Outros fatores potenciais que podem influenciar no incremento de tensões em um *riser*, tais como forças de sucção do solo e resistência lateral das paredes da trincheira, também não são levadas em conta em uma análise de projeto de um riser. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento e melhoramento de modelos e técnicas que representem esses parâmetros.

Os tópicos apresentados a seguir ilustram melhor a importância desses parâmetros.

2.1.2 Observações de Campo

Observações de *risers* rígidos e flexíveis em operação feitas por ROVs [6], mostram trincheiras profundas no solo marinho que vão bem além da região do TDP. Decorridos poucos meses depois de instalados os risers, as trincheiras tinham de quatro a cinco diâmetros de profundidade e de três a quatro diâmetros de largura, também com certa quantidade de solo depositada sobre o riser entrincheirado.

As trincheiras têm seu perfil traçado sobre a TDZ, tanto na profundidade quanto na largura. Evidências mostradas em vídeos sugerem que a parte mais profunda e a mais larga da trincheira tende a ser na posição do TDP correspondente ao *offset* estático médio do flutuante, onde os movimentos mais frequentes do *riser* ocorrem. Depois do TDP nominal, em direção à âncora, o perfil da trincheira torna-se mais raso e estreito.

É difícil prever como será o perfil da trincheira e a razão a que a mesma se desenvolve, na medida em que ambos dependem da amplitude e da frequência dos movimentos do riser no TDP que, por sua vez, dependem dos carregamentos ambientais, dos movimentos da embarcação e das próprias características do solo no leito marinho. No entanto, a TDZ pode ser mapeada mediante análises que mostram a

movimentação do TDP dentro da TDZ, podendo assim definir, aproximadamente, seus limites.

Estudos mostram que durante toda a vida em serviço de um riser, aproximadamente 97% dos movimentos se concentram em uma longa e estreita faixa centralizada próximo ao TDP nominal e na direção do eixo longitudinal do *riser* [7]. O mapeamento do TDP é utilizado na definição dos limites da TDZ e identifica as seções do riser que se movem com mais frequência, de tal forma que, o solo dentro desta região está sempre sendo remodelado [6].

2.2 Principais Mecanismos de Interação *Riser*-Solo Marinho

Os mecanismos de interação entre o riser e o solo marinho podem ser subdivididos em quatro categorias [6]:

2.2.1 O Efeito dos Movimentos do Riser no Solo Marinho

O resultado deste mecanismo é a degradação do solo, resultando numa deformação plástica e no enterramento do riser. Isso é causado por movimentos predominantemente verticais do riser, alguns dos quais podem estar associados também a movimentos laterais.

2.2.2 O Efeito da Água no Solo Marinho

Os movimentos de um *riser* para dentro e para fora de uma depressão ou trincheira no solo marinho produz um mecanismo chamado “*pumping*”, que é o bombeamento da água próxima ao solo na região do TDP.

O fluxo de água resultante deste mecanismo chamado “*pumping*” age de forma a expulsar todo o solo degradado pelo impacto do *riser* e promovendo o transporte efetivo dos sedimentos para fora da depressão no solo marinho. Deste modo, uma depressão inicial pode-se transformar em uma trincheira [6].

2.2.3 O Efeito do Solo Marinho no Riser

O solo marinho exerce uma complexa resistência aos movimentos do *riser* nas direções vertical, lateral e longitudinal.

A resistência vertical do solo pode ser subdividida em resistência à penetração descendente e resistência ascendente. No ciclo descendente, o solo apresenta comportamento elástico para as tensões que são causadas por uma pequena penetração inicial, que é benéfica à vida da fadiga do riser na TDZ [6]. Durante o ciclo ascendente, o *riser* pode ser submetido a forças de sucção do solo, caso este seja, por exemplo, uma argila mole aderida que adere facilmente ao tubo. O fenômeno de sucção é análogo à

situação de alguém ficar por certo período de tempo com as botas dentro de uma argila bastante pegajosa, neste caso uma considerável força de tração se faz necessária para que se possa vencer a força de sucção desenvolvida pela argila em contato com a bota. Adicionalmente, todo peso de solo que volta para a trincheira devido à ação da água ou do próprio movimento do *riser*, faz com que aumente a resistência ao movimento ascendente do *riser*.

A resistência lateral consiste na soma, simultânea ou não, da parcela de fricção entre o *riser* e o solo marinho, da parcela de resistência passiva do solo e da parcela cisalhante do solo, a qual ocorre quando o *riser* se move lateralmente para fora de uma depressão ou contra a parede de uma trincheira. Pode-se considerar como exemplo, o caso do TDP de um *riser* que tem metade de seu diâmetro embutido no fundo de uma trincheira em uma argila muito mole com cinco diâmetros de profundidade e três diâmetros de largura. Com a possibilidade de ocorrer um grande offset lateral, o TDP tenderá a se mover para fora da trincheira, inicialmente mobilizando a resistência ao atrito do solo combinada com a sua resistência passiva. À medida que o *riser* se desloca, ele está sujeito apenas à resistência ao atrito até que ele venha a impactar com a lateral da trincheira. A saída do *riser* da trincheira depende da força que ele transmite em conjunto com a resistência cisalhante passiva da parede da trincheira.

A resistência axial é, normalmente, apenas de caráter friccional e pode ser levada em conta em ferramentas computacionais para análise de *risers* através da consideração de molas associadas a coeficientes de fricção.

2.2.4 Efeito de Carregamento Cíclico

Carregamentos cíclicos estão presentes na maior parte dos problemas de geotecnia marinha, especialmente naqueles em que os carregamentos de onda atuam em estruturas que estão interagindo diretamente com o solo marinho.

Para análise de estruturas em contato com o solo, impondo-lhes carregamentos cíclicos, é necessário levar em consideração a significativa mudança de comportamento de solos sob a ação de carregamentos cíclicos ou sob diferentes níveis de tensões ao longo do tempo. Muitos dos trabalhos a respeito de carregamentos cíclicos aplicados a solos têm como referência o problema da liquefação da areia [9]. No entanto, estudos sobre a influência de carregamentos cíclicos em solos argilosos [9] revelam que, em vários aspectos, estes têm comportamento similar às areias e, conseqüentemente, é

possível tratar o problema da resposta ao carregamento cíclico de solos, para o caso da argila, de uma maneira similar à areia.

2.3 Modelagem e Análise da Interação Solo-Riser

Uma avaliação deve ser feita com relação a cada um dos mecanismos descritos anteriormente na análise e projeto de um SCR. Evidências em vídeo [6] indicam que a formação de trincheiras em argila mole é inevitável numa situação na qual um SCR está conectado a uma unidade flutuante.

Os mecanismos envolvidos na formação de uma trincheira são resultantes da combinação da deformação plástica do solo e da ação de bombeamento e deslocamento do solo pela água em torno do riser. A interação entre esses mecanismos e a natureza aleatória dos movimentos do riser ao longo da TDZ torna muito difícil a previsão precisa da forma do perfil de uma trincheira. Como consequência, as dimensões adotadas para profundidade e largura da trincheira ao longo da TDZ devem ser feitas com base na trincheira mais profunda observada na inspeção de um ROV e de suposições conservadoras da resistência do solo [6].

Melhorias na modelagem da capacidade resistente do solo nas direções lateral, axial e vertical são possíveis através do uso de elementos de mola adequados num programa de elementos finitos. Baseados na teoria da capacidade de carga de fundações [20, 21] e em estudos de interação solo-riser [10], dados experimentais do solo permitem uma análise da penetração do duto no solo levando a uma significativa melhoria na modelagem da rigidez vertical e na representação das resistências lateral e axial de um riser enterrado ou dentro de uma trincheira formada no solo marinho.

As maiores incertezas nas respostas de análises são as que envolvem o fenômeno de sucção, no entanto, vários testes em pequena escala já foram realizados pelo JIP CARISIMA [8].

2.3.1 Curvas de Resposta do Solo

A reação do solo ou a interação solo-riser pode ser modelada através do emprego de molas ou, de forma figurada, de um “colchão de molas”, num modelo de elementos finitos para análise estrutural. O carregamento cíclico e as deformações plásticas dos solos tornam irreal a representação da resposta do solo sobre um elemento

do riser através de um único modelo de mola de sustentação, o qual é aplicado em todo o tempo de análise. A função que representa a forma de atuar da mola pode mudar completamente com o tempo passando de uma curva de resposta virgem a uma curva de resposta degradada.

Uma curva de resposta do solo virgem pode ser tratada como uma ‘backbone curve’, a qual servirá de parâmetro de resposta servindo como uma curva limite para subseqüentes curvas de resposta do sistema solo-*riser*. Reciprocamente, a curva de resposta do sistema solo-*riser* pode ser considerada como um caminho de carga limitado pela ‘backbone curve’ [6].

2.3.2 Curvas P-y ou de Reação Vertical

O programa utilizado nas análises deste trabalho - ANFLEX [4] -, assim como a maioria dos programas utilizados atualmente para análise global de *risers*, utiliza um modelo de solo elástico composto de molas lineares e um amortecimento equivalente. Entretanto, uma representação mais real do comportamento do solo em contato com o *riser*, na direção vertical, pode ser descrito aproximadamente por uma curva P-y como mostrada na Figura 2-2, obtida através de testes de laboratório [11].

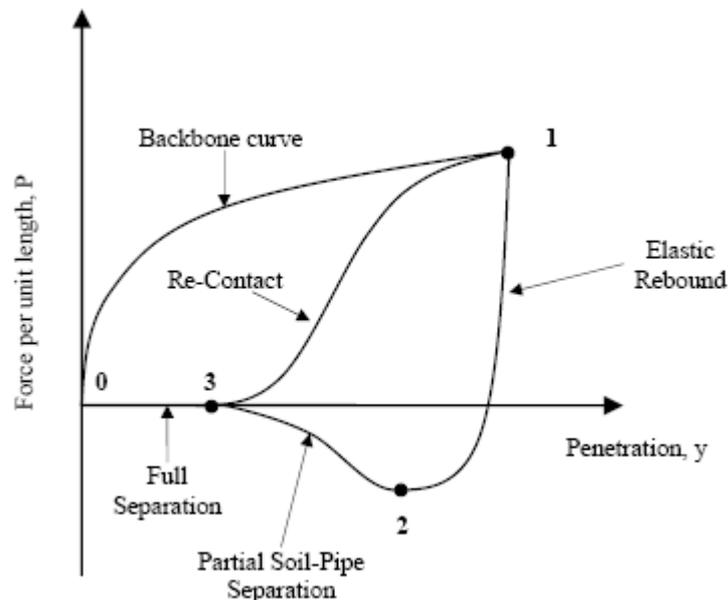


Figura 2-2 – Exemplo de curva P-y de interação entre o solo e o *riser* (condições extremas) extraída de [11].

Na Figura 2-2, que representa uma curva P-y geral para solos, o trecho que vai do ponto 0 ao ponto 1 segue a curva virgem do solo e descreve a penetração ou acomodação inicial do *riser* no solo intacto. Observações feitas por ROVs em alguns campos de produção no Golfo do México indicam que a máxima penetração do riser na região do TDP, nesta fase, é da ordem de 3 a 4 vezes o seu diâmetro [6]. O trecho de 1 a 2 e o trecho de 2 a 3 representam o comportamento quando o *riser* está sendo levantado, ou seja, está diminuindo gradativamente a força de sucção com o solo até que ocorra a ausência total de contato.

Quando o *riser* começa a ser levantado, a magnitude da força de compressão sobre o solo é reduzida rapidamente e, então, se inicia o desenvolvimento de forças de sucção [13, 14]. A máxima força de sucção é significativamente menor que a máxima força de compressão. No trecho que vai do ponto 2 até o ponto 3, a força de sucção diminuiu até tornar-se nula quando o *riser* separa-se completamente do solo. E, finalmente, quando o *riser* é posto novamente em contato com o solo a magnitude da força de compressão do *riser* com o solo segue a curva que vai do ponto 3 ao ponto 1.

As curvas descritas acima sobre a Figura 2-2 são baseadas na premissa de que o ciclo de contato entre o *riser* e o solo é resultado de movimentos extremos que ocasionam total contato e total separação entre os dois e, as equações e fórmulas que descrevem este comportamento podem ser encontradas na Ref. [12].

2.3.3 Molas de Reação do Solo

Embora diversos estudos tenham sido conduzidos recentemente para calcular e modelar de forma mais apropriada da interação solo-*riser*, ainda não existe um modelo numérico simples que seja capaz de representar esta complexa interação solo-estrutura.

Desta forma, a modelagem e representação das propriedades do solo numa análise numérica são normalmente feitas por molas que têm rigidezes equivalentes e atuam na direção vertical, lateral e axial simulando, respectivamente, a rigidez vertical do solo, reação lateral e o atrito devido ao arraste na direção axial.

No programa de elementos finitos utilizado neste trabalho (ANFLEX [4]), a representação do solo é feita através de escalares unidirecionais, *i.e.*, molas com um grau de liberdade. As reações do solo no sentido axial e lateral sobre um duto apoiado

no solo marinho são modeladas por molas elasto-plásticas não-lineares representadas na Figura 2-3. Pode-se observar que, estas molas apresentam uma simetria em relação à origem. Manipulando-se os seus parâmetros, elas podem representar numericamente o atrito (axial e lateral) de um duto apenas em contato com o leito marinho e também a reação axial e/ou lateral de um duto que se encontra parcialmente ou totalmente enterrado. Este comportamento é ilustrado na Figura 2-4, onde se pode observar um modelo de duto simplesmente apoiado e outro modelo de duto parcialmente enterrado no leito marinho. Estas situações podem ser modeladas através dos parâmetros numéricos fornecidos para as molas, que são de responsabilidade do analista.

Trechos com comportamentos distintos com relação à interação solo-estrutura, por exemplo, um trecho enterrado e outro parcialmente enterrado, podem ser modelados utilizando-se parâmetros distintos para as molas que representam cada trecho. A reação no sentido perpendicular ao eixo do duto, comumente chamada de reação vertical, é modelada no ANFLEX [4] através de uma mola elástica bi-linear ilustrada na Figura 2-5. Esta mola indica que o solo apresenta uma reação, diretamente proporcional à rigidez fornecida pelo usuário, quando o duto encontra-se em contato com o fundo marinho. Perdendo o contato, o solo não apresenta nenhum efeito sobre o duto e vice-versa.

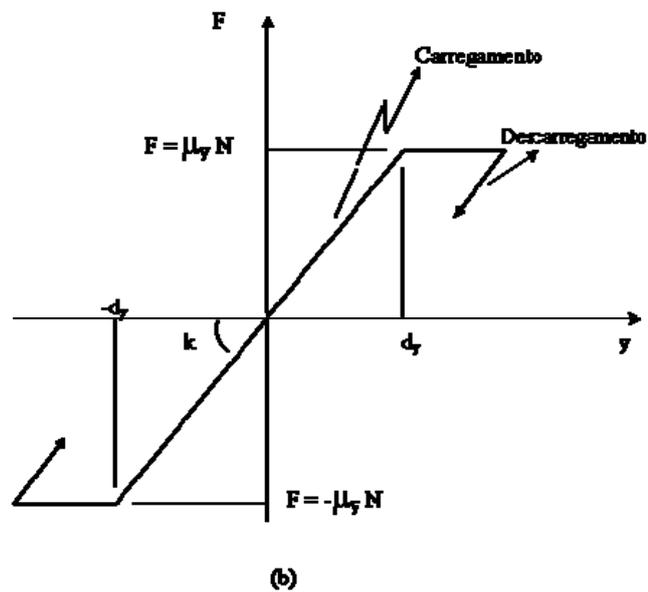
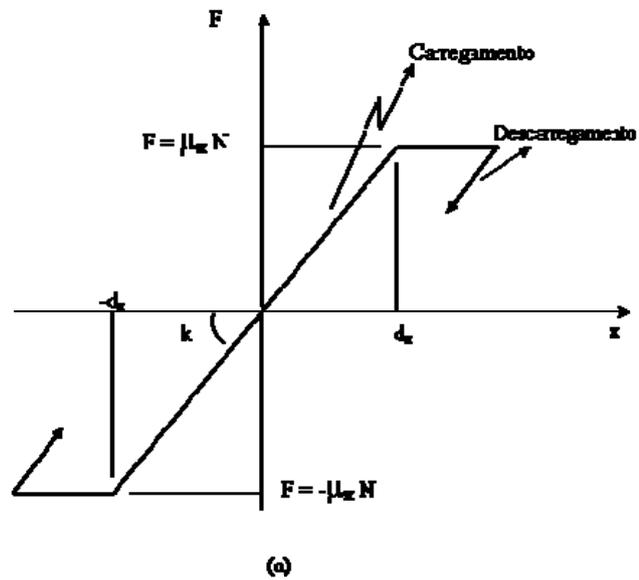


Figura 2-3 – Molas elasto-plásticas não lineares: (a) axial; (b) lateral (μ_x – coeficiente de atrito axial; μ_y -coeficiente de atrito lateral, d_x - deslocamento de mobilização axial; d_y - deslocamento de mobilização lateral, k_x -rigidez axial, k_y -rigidez lateral)

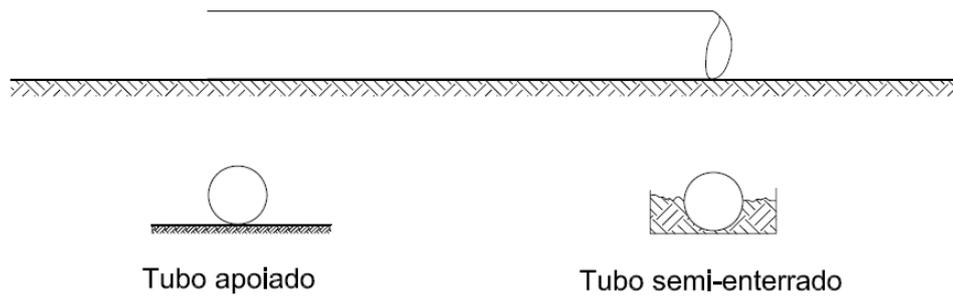


Figura 2-4 – Comportamento do tubo apenas apoiado ou semi-enterrado

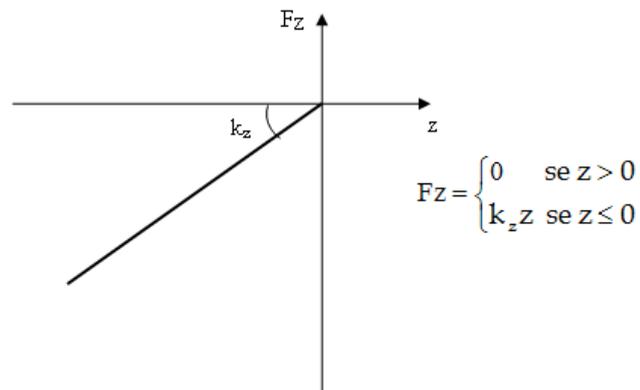


Figura 2-5 – Mola de reação vertical

Como numa análise global o *riser* é discretizado em nós e elementos, é importante observar que as curvas de reação axial e lateral são proporcionais às reações nodais e, portanto, no modelo numérico elas representam um trecho equivalente de duto igual à soma das duas metades de comprimento dos elementos adjacentes ao nó. Modelagem similar é válida para as reações verticais. No ANFLEX [4], a rigidez da mola de reação vertical pode ser fornecida pelo usuário através de um valor que já representa a “rigidez equivalente” associada a cada nó ou através de uma mola distribuída ao longo do *riser* representando a rigidez contínua do solo. Neste último caso, as molas equivalentes são calculadas automaticamente pelo próprio programa. Estas duas situações são ilustradas na Figura 2-6.

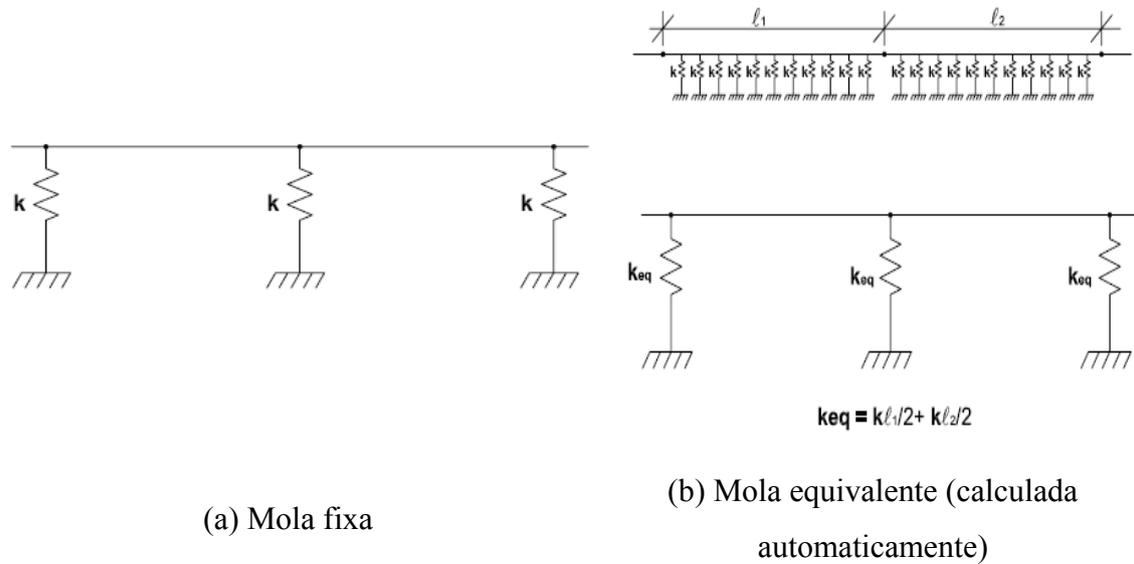


Figura 2-6 – Molas disponíveis no ANFLEX

Atualmente no ANFLEX [4], para se representar a reação vertical do solo também é possível usar uma mola não-linear elástica apresentada na Figura 2-7. A diferença desta mola com relação à anterior (Figura 2-5), é que se admite um “escoamento” do solo a partir de um determinado nível de deformação devido à penetração. Deve-se observar que neste modelo, a relação força-deslocamento na descarga percorre o mesmo caminho da fase de carregamento, pois o modelo não acumula deformação permanente.

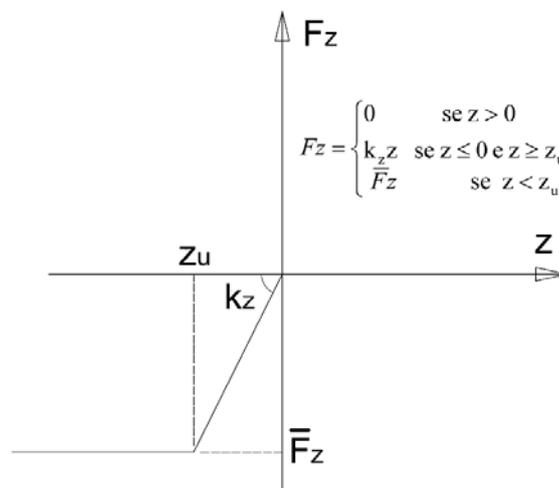


Figura 2-7 – Mola não-linear elástica para reação vertical.

Uma alternativa mais trabalhosa para o usuário, porém, bem mais flexível é que o ANFLEX [4] permite que sejam fornecidas molas não-lineares nodais individuais para representar outros modelos de reação do solo.

2.3.4 Aspectos adicionais sobre a modelagem do fundo marinho no ANFLEX

Como mencionado anteriormente, as molas axial e lateral podem ser manipuladas de forma a representar atritos e/ou reações quando o duto estiver enterrado, *i.e.*, embora conceitualmente estas molas tenham sido desenvolvidas para representar a reação de atrito, os seus parâmetros podem ser manipulados de forma a representar a reação lateral de um duto parcialmente ou totalmente enterrado ou até mesmo a reação lateral de uma parede de uma trincheira. Atualmente, o ANFLEX [4] também não faz distinção de rigidez do solo nas análises estática e dinâmica.

Com relação ao comportamento vertical, modelos matemáticos atuais de comportamento, como o mostrado na Figura 2-8, indicam que inicialmente, na etapa de carga, o solo reage não linearmente e na descarga fica uma deformação permanente e ainda tem-se uma reação contrária à compressão devido à ação da reação de sucção. Na recarga, o solo passa a reagir de forma mais ou menos linear com a origem na deformação (deslocamento) permanente. Hoje, no ANFLEX [4], este efeito pode ser parcialmente representado. O deslocamento permanente deve ser fornecido de forma indireta através das coordenadas do fundo do mar através de uma poligonal irregular representando um fundo não plano. Depois disto, utiliza-se uma mola vertical (vide Figura 2-7) para representar a rigidez de carga e descarga cíclica da Figura 2-8, porém, com a origem no ponto zero. Entretanto, observa-se que o efeito de sucção não é considerado no modelo.

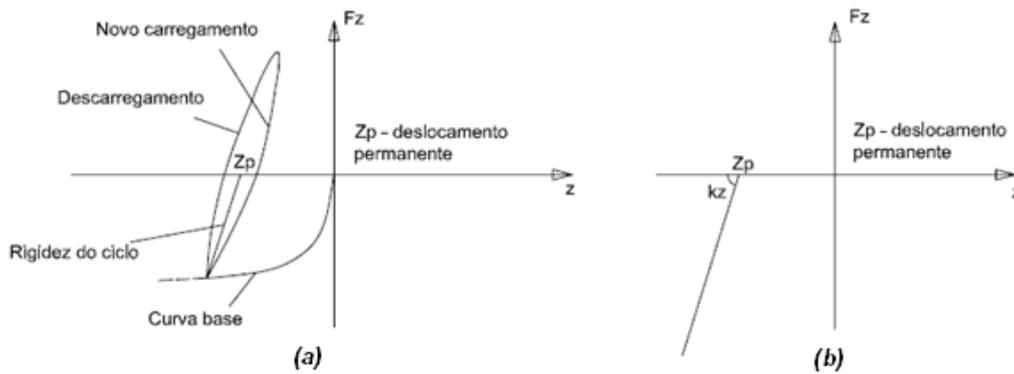


Figura 2-8 – Rigidez vertical do solo. (a) modelo com sucção e (b) idealização sem sucção para o ANFLEX.

A Figura 2-9 ilustra de forma simplificada uma trincheira com um duto acomodado no seu interior. Na versão atual do ANFLEX [4], uma trincheira com uma forma geométrica pré-estabelecida pode ser modelada utilizando as molas descritas acima e a facilidade de representação de fundo irregular. A geometria de trincheira é representada através das coordenadas do fundo irregular

Como já dito anteriormente, o ANFLEX [4] ainda não modela automaticamente o efeito de sucção. Outra facilidade ainda não disponível é a modelagem automática de um possível “gap” entre o duto e as paredes laterais, conforme ilustra na Figura 2-10. É possível, entretanto, através de suas facilidades automáticas, modelar no ANFLEX [4] um *riser* dentro de uma trincheira (ou vala) de geometria conhecida sem ele estar coberto por solo marinho, supondo que ele está perfeitamente “encaixado” dentro da mesma, sem folgas nas laterais. Estas facilidades disponíveis são suficientes para que sejam efetuadas análises paramétricas variando-se forma, profundidade e comprimento de uma trincheira para investigar a influência da mesma sobre a vida à fadiga de um SCR.

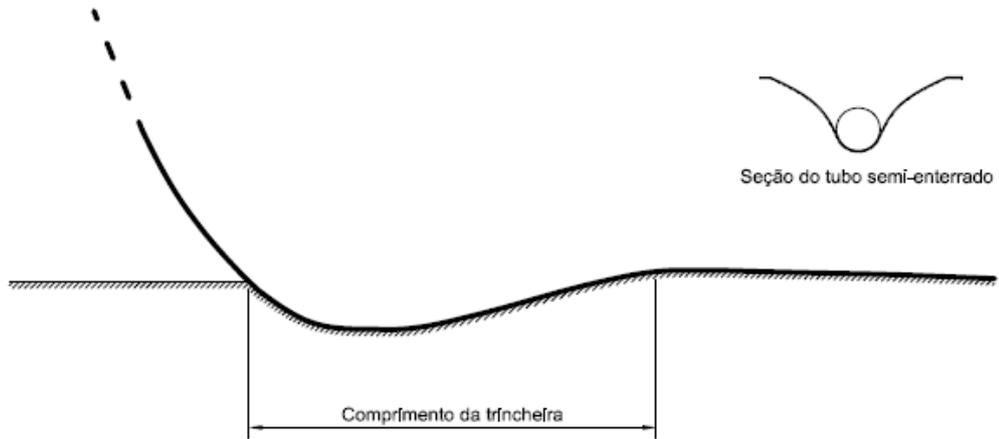


Figura 2-9 – Exemplo de trincheira.

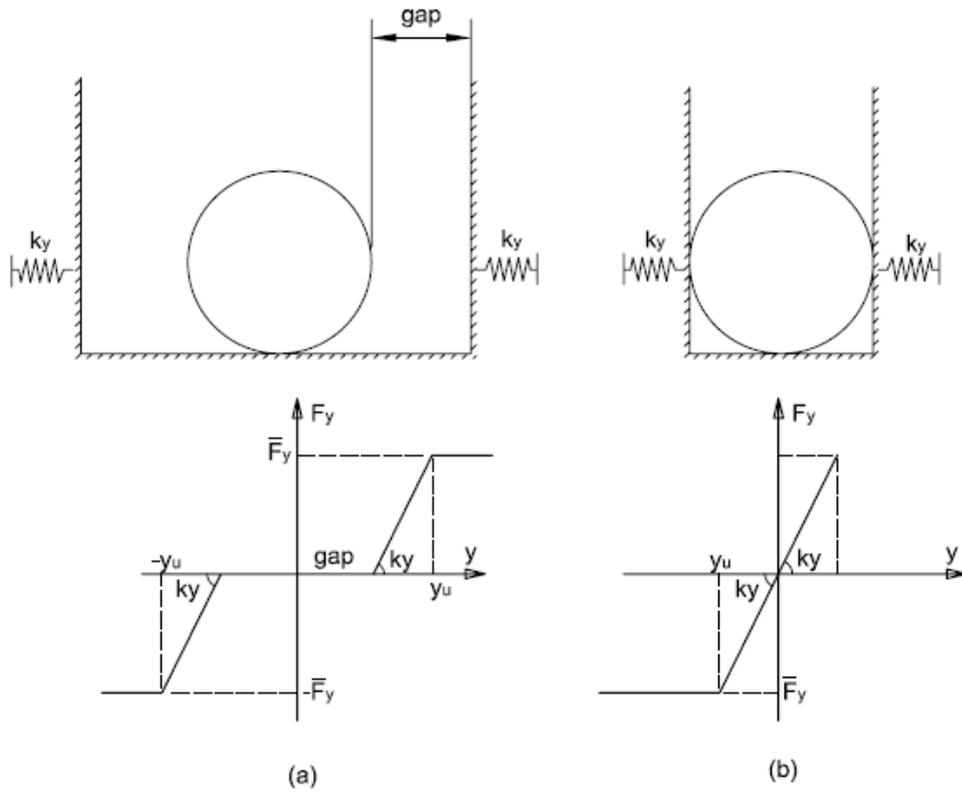


Figura 2-10 – Curvas força vs. deslocamento: (a) com gap, (b) sem gap.

2.3.5 Modelagem da Forma de uma Trincheira

O conhecimento da forma de uma trincheira formada por um *riser* sobre o solo marinho é essencial para que se obtenham valores mais precisos das tensões na região do TDP e, conseqüentemente, valores mais próximos da realidade de predição da vida à fadiga. Como já dito anteriormente, a modelagem feita usualmente nos programas de elementos finitos é considerar o fundo marinho como sendo plano [15], o que acarreta em um acréscimo de tensões no TDP.

Se uma trincheira é formada na região do TDP, o pico de tensões que está ali concentrado será distribuído em uma região maior ao longo do tubo, o que acarreta numa diminuição dos valores de tensão nessa região crítica, fazendo com que se tenha, também, uma diminuição do dano à fadiga e, conseqüentemente, um aumento na vida útil da estrutura. Esta diminuição é uma decorrência de uma menor variação da curvatura do *riser* nesta região.

Um aspecto já mencionado sobre a modelagem de trincheiras é saber qual é a forma de seu perfil, seu comprimento e os mecanismos que levaram à sua formação. Inspeções realizadas por ROVs possibilitam melhor compreensão da geometria e evidenciam os mecanismos de formação de uma trincheira. Essas informações são essenciais para uma modelagem da forma da trincheira mais próxima da real o que possibilita uma distribuição mais homogênea das tensões ao longo da região do TDP e, conseqüentemente, uma melhoria no projeto de SCR's.

Atualmente, existem poucos estudos detalhados disponíveis sobre estes aspectos relativos a trincheiras [16]. Contudo, nos últimos anos, alguns trabalhos trazem estudos realizados em algumas locações de exploração onde foram filmadas e fotografadas formações de trincheiras na região do TDP.

Observa-se, na Figura 2-11 e na Figura 2-12, extraídas da Ref. [16] uma dessas trincheiras. Observa-se, na seqüência de A a F, as vistas em várias secções ao longo do comprimento da mesma os detalhes da largura, profundidade e posição do *riser* dentro da trincheira. Este caso específico é de um *riser* acoplado a uma *Tension Leg Platform* (TLP) localizada no campo de Allegheny no Golfo do México apenas 7 meses após a sua instalação.

Pode-se observar também nas figuras mencionadas anteriormente que a profundidade e a largura da trincheira são dadas em função do diâmetro do *riser* além

de mostrar, na área escura da figura, a região onde há reposição de solo para dentro da mesma.

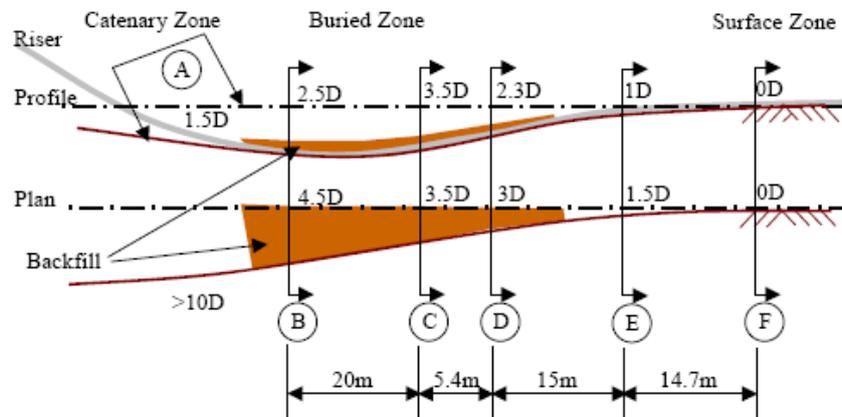


Figura 2-11 – Perfil de um SCR de exportação de gás no Campo de Allegheny, Golfo do México sete meses após sua instalação. Extraído de [16].

No presente trabalho, adotou-se uma forma geométrica baseada numa equação exponencial onde se variou a profundidade máxima da mesma e manteve-se o mesmo comprimento total para que se pudesse ter melhor controle na avaliação dos efeitos da inserção de uma trincheira no modelo de elementos finitos. Detalhes do modelo adotado são apresentados e comentados no Capítulo 4.

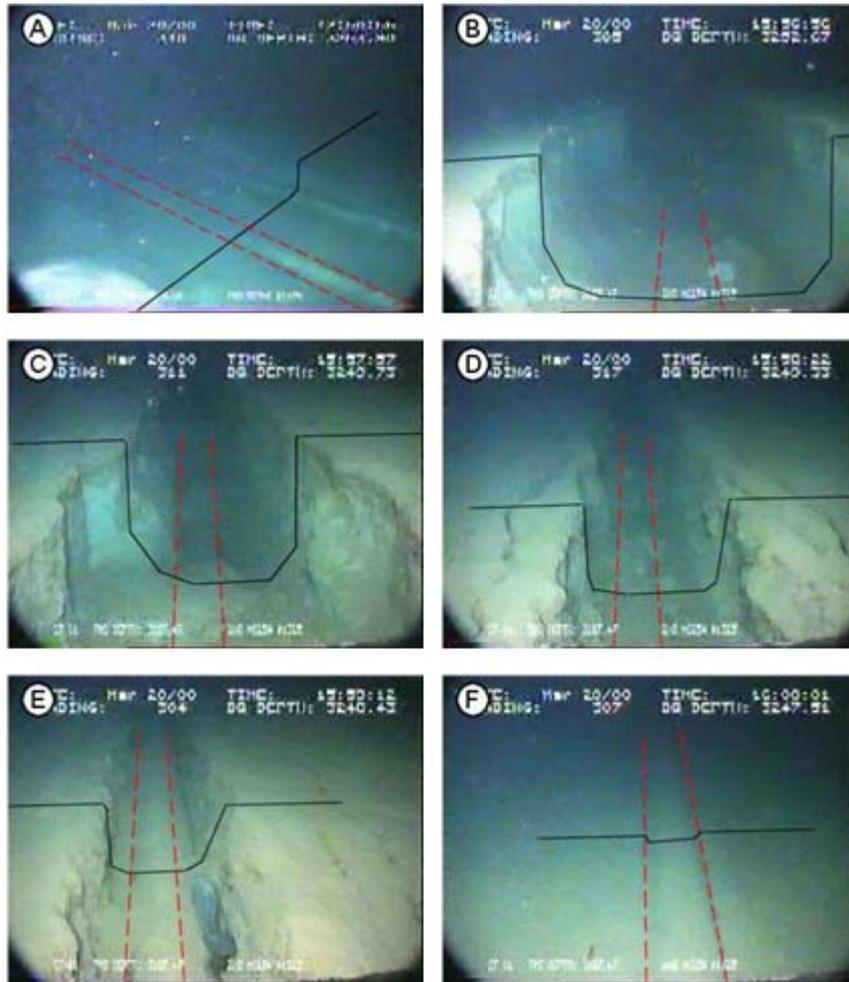


Figura 2-12 – Trincheira na região do TDP sete meses após a instalação do SCR. .

Figuras extraídas de [16].

3. ANÁLISE DE FADIGA

A fadiga pode ser entendida como um processo de redução da capacidade de carga de um material devido à sua ruptura lenta através do avanço quase que infinitesimal de uma trinca inicial a cada ciclo de carregamento. A partir do momento em que uma estrutura é submetida a ciclos de carregamento, pode haver a ocorrência do fenômeno de fadiga, onde pequenas trincas aparecem e, se não houver nenhuma intervenção, estes defeitos podem crescer levando a estrutura à ruptura.

Segundo a Ref. [18], esta é a definição para fadiga: “Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, *progressivo* e *localizado*, que ocorre num material sujeito à condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que podem culminar em *trincas* ou numa *fratura* completa após um número suficiente de variações de carga”, sendo, segundo a Ref. [17]:

- *Progressivo*: indica que o processo de fadiga se verifica durante um determinado período de tempo ou uso;
- *Localizado*: significa que o processo de fadiga se dá em pequenas áreas em vez de ser em toda a peça ou estrutura;
- *Trinca e fratura*: significam que numa zona crítica do material uma trinca cresce até um ponto em que o material restante na seção transversal não é capaz de suportar as tensões aplicadas, dando-se a fratura súbita ou escoamento da seção restante

A fadiga, segundo as Ref. [19, 22 e 23], é a causa de 80 a 90% de todas as ruínas nas peças ou estruturas submetidas a esforços mecânicos e que trabalham a temperatura ambiente.

Diversos autores definem o estudo da fadiga como o estudo completo do comportamento dos elementos ou das estruturas submetidas a carregamentos repetidos. A esses carregamentos repetidos, que podem gerar fadiga, denominam-se carregamentos de fadiga. Estes carregamentos são classificados de duas formas:

- **Baixo ciclo:** a falha por fadiga ocorre para um número de ciclos de carregamento relativamente pequeno, menos de 10^4 ou 10^3 ciclos, dependendo do caso;
- **Alto ciclo:** a falha por fadiga ocorre para um número de ciclos de carregamento relativamente grande, mais de 10^4 ciclos, em alguns casos podendo chegar à ordem de 10^6 a 10^9 ciclos;

Normalmente, as estruturas oceânicas estão sujeitas a carregamentos de fadiga de “alto ciclo”. A fadiga é, em muitos casos, o critério de projeto mais crítico do que qualquer outro na análise de certas estruturas. Os carregamentos mais importantes quando estamos lidando com sistemas flutuantes (Estruturas Offshore) são aqueles relacionados aos parâmetros ambientais de onda, vento e corrente.

A análise de fadiga na prática de projetos de estruturas *offshore* baseia-se principalmente em três aspectos:

- Identificação dos ciclos de tensão;
- Curvas S-N;
- Regra de Miner.

Estes itens serão comentados a seguir.

3.1 Carregamentos de Fadiga – Ciclos de Tensão

A vida à fadiga está associada à variação e ao número de ciclos de tensão. Um ciclo de tensão de fadiga traduz a variação da tensão aplicada com o tempo ou com o número de ciclos da aplicação de um dado carregamento associado à fadiga. Os dois tipos mais comuns de carregamento são o de *amplitude constante* e o de *amplitude variável*.

3.1.1 Amplitude Constante

Como o próprio nome indica, sua faixa de variação de tensão é constante durante todo o carregamento (a amplitude de tensão não varia com o tempo), conforme ilustra a Figura 3-1. Na prática, isto se verifica em mecanismos que operam numa velocidade constante: tirantes, rolamentos, engrenagens, polias, *etc.* A fadiga de amplitude constante geralmente ocorre em peças de máquinas, tais como eixos ou barras que são submetidos a cargas rotativas.

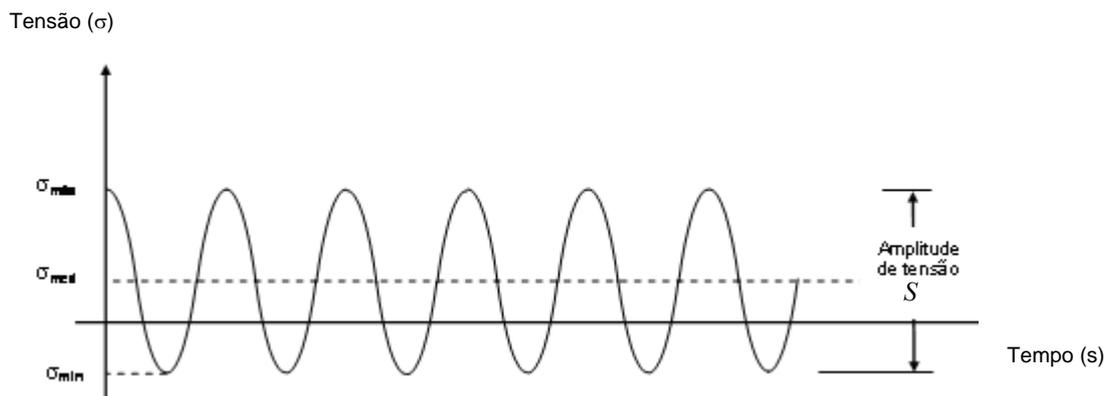


Figura 3-1 - Carregamento com amplitude constante.

A flutuação de tensões varia de σ_{\max} a σ_{\min} , resultando numa ciclo de tensões S igual à diferença algébrica entre os dois valores:

$$S = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad \text{ou} \quad S = 2 \cdot \sigma_{\text{amp}} \quad (3-1)$$

$$\sigma_{\text{amp}} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \text{e} \quad \sigma_{\text{med}} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3-2)$$

sendo,

σ_{amp} : amplitude do sinal de tensão;

σ_{med} : tensão média.

3.1.2 Amplitude Variável

Para muitas estruturas, os carregamentos de fadiga não são de amplitude constante, mas sim de amplitude variável, tais como as estruturas *offshore* [25]. Carregamentos variáveis podem ser impostos durante todas as fases da vida da estrutura e podem, a princípio, ser causados por: onda, vento, corrente, pressão variável, vibração de máquinas, dentre outras. As forças de onda são geralmente as principais causadoras de danos por fadiga em estruturas *offshore* tipo jaqueta.

No caso de *risers*, as tensões atuantes são de amplitude variável, sendo que sua identificação não é simples como no caso anterior. Desta forma, recorre-se a um algoritmo específico para tratar tal dificuldade.

De um modo geral, a maneira como um histórico de amplitudes de tensão varia no tempo é aleatória, sendo obtidas através de uma análise dinâmica no domínio do tempo. Este fato impõe uma dificuldade na identificação da variação de tensão que está ocorrendo em um determinado ponto da estrutura e na contagem do número de ciclos associados ao mesmo. Alguns métodos para a contagem e identificação de ciclos de tensões foram desenvolvidos para a identificação dos ciclos de tensão e, dentre eles, o método de contagem de ciclos Rain-Flow.

O método Rain-Flow consiste na conversão de um histórico no tempo de tensões em um processo de pontos, contendo valores máximos e mínimos (picos e vales) em que a contagem de ciclos é efetuada seguindo a seqüência do fluxo da água escoando por um telhado, como mostra a Figura 3-2 [27]. A vantagem deste método é que ele é capaz de identificar todos os ciclos de tensões, incluindo aqueles associados aos efeitos de altas e baixas frequências, por exemplo, quando estes ocorrem simultaneamente no histórico no tempo de tensões.

Neste trabalho, empregou-se na análise de fadiga o programa POSFAL [5], que possui um algoritmo baseado no método Rain-Flow para identificar e contar os ciclos de tensões.

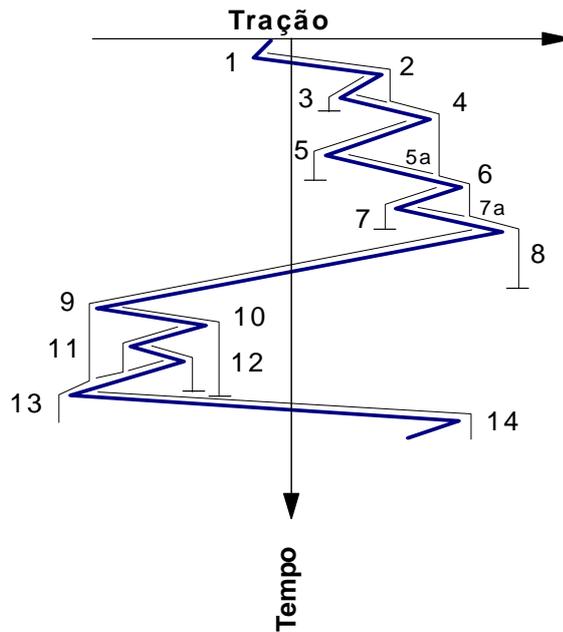


Figura 3-2 - Esquema ilustrativo da utilização do método Rain-Flow [27].

3.2 Curvas S-N

As curvas S-N são curvas experimentais que relacionam uma dada variação de tensão ao número de ciclos que leva um dado material ou um componente estrutural à ruptura por fadiga. Estas curvas são obtidas em laboratório onde os corpos-de-prova são testados em várias amplitudes de tensão (amplitude constante) até que uma falha ocorra.

Para valores do número de ciclos de ruptura superiores a 10^4 ou 10^5 , a representação gráfica da tensão alternada em função do número de ciclos de ruptura fornece, geralmente, uma curva, geralmente apresentadas em um gráfico *bilogarítmico* que é a ‘**Curva S-N**’. Essas curvas são utilizadas para se estimar a vida útil em qualquer faixa de tensão.

A região inferior a 10^4 ou 10^5 é denominada zona de *fadiga a baixo número de ciclos* ou *fadiga oligocíclica*, onde as tensões são elevadas e extensões na peça são predominantemente plásticas. Nestes casos, os ensaios são feitos com extensão plástica controlada em vez de carga ou tensão controlada. São observadas em reservatórios sob pressão, turbinas a vapor e reatores nucleares.

Para alguns materiais, tais como aço e titânio, existe uma faixa de tensão abaixo da qual um defeito (trinca) não se propaga definindo o limite de fadiga do material.

Nestes casos, para variações de tensões abaixo desse limite, a fadiga *não é considerada* nem para um número infinito de ciclos. Este comportamento não pode ser generalizado porque em muitos metais ferrosos (como alumínio, magnésio e ligas de cobre), a inclinação da curva S-N decresce gradualmente não tendo um limite de fadiga verdadeiro (visto que a curva nunca se torna horizontal).

A equação de uma curva S-N pode ser apresentada da seguinte forma:

$$N = \frac{A}{(S)^k} \quad (3-3)$$

ou, aplicando logaritmos em ambos os lados da igualdade têm-se:

$$\log(N) = \log(A) - k \log(S) \quad (3-4)$$

onde,

S = variação (ciclo) de tensão na estrutura;

N = número de ciclos de tensões que levam o material à ruptura;

A e k = são constantes do material obtidos em ensaios.

Deve-se observar que, o comportamento à fadiga de um dado material ou componente estrutural depende do ambiente em que ela se desenvolve. A Figura 3-3 e a Figura 3-4 ilustram dois conjuntos de curvas S-N da DNV [26], utilizados na análise de estruturas *offshore*.

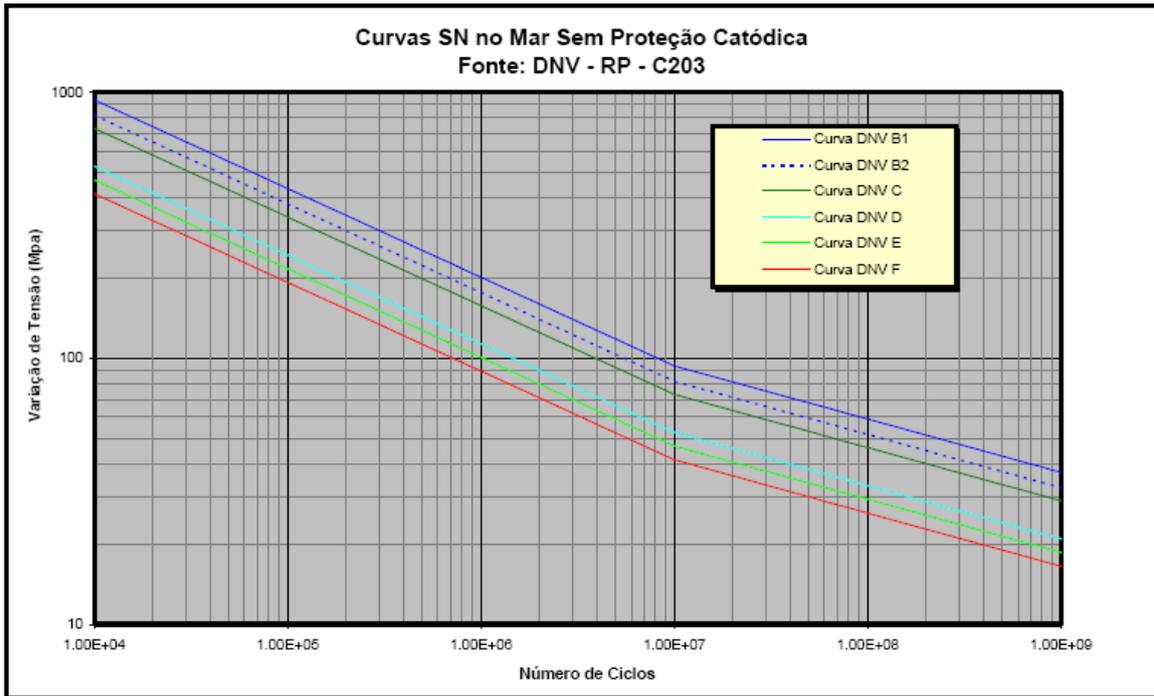


Figura 3-3 – Exemplo de curva S-N típica sem proteção catódica extraída de [26].

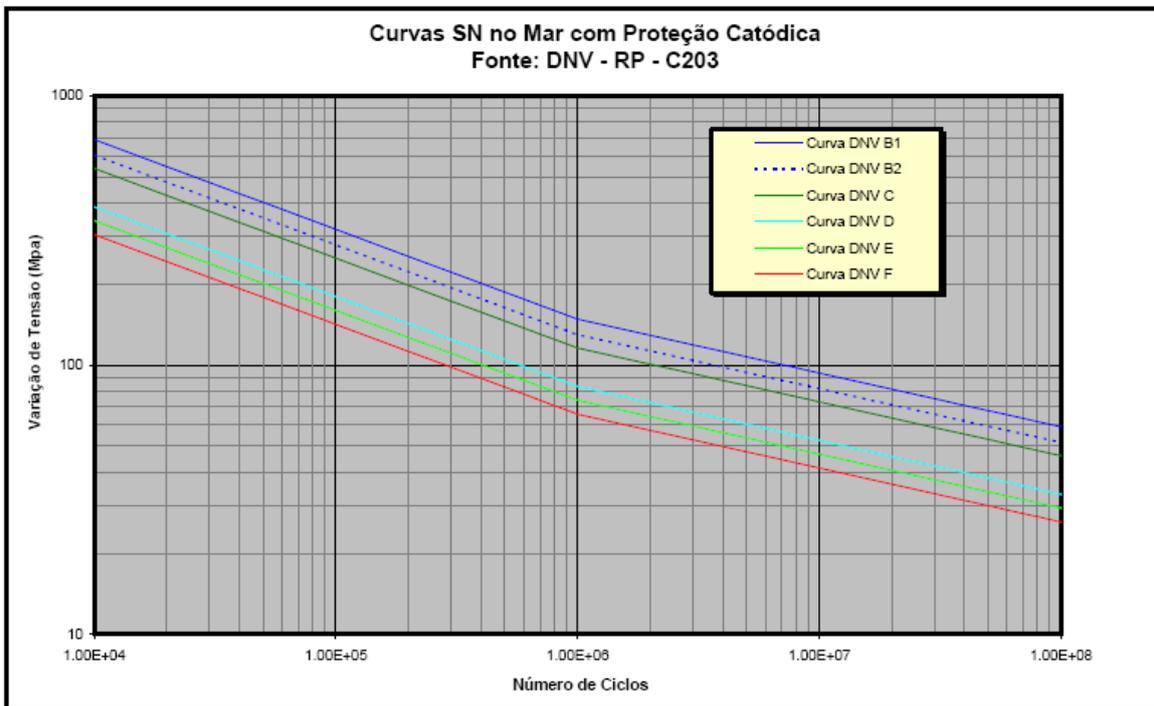


Figura 3-4 – Exemplo de curva S-N típica com proteção catódica extraída de [26].

As curvas S-N são normalmente obtidas tomando-se por base tensões nominais, isto é, sem considerar concentrações de tensão, tensões residuais ou térmicas. No projeto, deve-se levantar e levar em consideração os fatores de concentração de tensão,

principalmente quando se tratar de material base. No caso de soldas, deve-se verificar a origem da curva S-N para saber se a concentração de tensões devido à própria solda deve ou não ser considerada.

Nas solicitações uniaxiais de tração (tração uniforme), a tensão nominal é constante ao longo da espessura e não varia de seção para seção. Nas solicitações de flexão e torção, em que existe um gradiente de tensões nas seções, considera-se que a tensão nominal é a tensão de flexão ou torção máxima na seção transversal onde a trinca se propaga, e numa direção perpendicular à propagação da trinca.

Na grande maioria dos casos, a resistência à fadiga é seriamente reduzida quando existe um acidente geométrico que provoque concentração de tensões. No caso de um concentrador de tensões, as tensões σ para cálculo de fadiga devem ser calculadas como:

$$\sigma = SCF \cdot \sigma_{nom} \quad (3-5)$$

onde:

SCF – fator de concentração de tensão

σ_{nom} – tensão cíclica nominal de cálculo.

3.3 Cálculo do Dano Cumulativo – Regra de Miner

O colapso ou falha por fadiga ocorre devido à ação de carregamentos cíclicos (ou variáveis ao longo do tempo) sobre a estrutura e que ocasionam uma flutuação de tensões que levam ao desenvolvimento e propagação de trincas até a ocorrência do referido colapso, que pode ocorrer a um nível de tensões inferior à tensão máxima admissível do material. O objetivo do projetista é verificar se a vida útil calculada contempla a vida útil desejada para o projeto, respeitando os fatores de segurança definidos em normas específicas.

O dano devido à fadiga depende do histórico completo de tensões ao longo da vida útil da estrutura, devendo-se levar em conta todos os conjuntos de condições de carregamento que podem vir a ocorrer em todas as fases do projeto (fabricação, transporte, instalação e operação).

A abordagem usual de cálculo consiste em se usar resultados de ensaios de amplitude constante (curva S-N) em conjunto com a regra de Miner-Palmgren para prever o comportamento dos elementos submetidos a condições variáveis de carregamento. A hipótese básica da regra de Miner é a de que o dano provocado por um ciclo de tensão S sobre a estrutura por ciclo de carregamento é constante e igual a:

$$D = \frac{1}{N} \quad (3-6)$$

onde $N = AS^k$ é dado pela curva S-N.

A Regra de Miner estabelece também que os danos (isto é, perda de vida de fadiga) se acumulam de modo linear e a aplicação desta consideração permite que o dano acumulado pelas variações de longo prazo de tensões seja avaliado a partir de um histograma de tensões, constituído de um número de ciclos n_i de tensões de amplitude constante S_i identificados por algum algoritmo de contagem de ciclos, por exemplo, o Rain-Flow. Desta forma, o dano total à fadiga é dado por:

$$D_T = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (3-7)$$

onde,

- j = número de diferentes níveis de ciclos de tensão identificados no histograma
- n_i = número de ciclos de tensão com variação de tensão S_i ;
- N_i = vida de fadiga a um nível de variação de tensão de S_i (curva S-N).

A regra de Miner considera de que não existe efeito de seqüência da aplicação da carga, isto é:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_1}{N_1} \quad (3-8)$$

Admite-se que o elemento falha por fadiga quando $D_T \geq 1$ e desta forma a vida à fadiga é dada por:

$$V_u = \frac{L_0}{D_T} \quad (3-9)$$

onde,

L_0 = tempo relativo à contagem do número total de ciclos de tensão do histograma, $n_0 = \sum_{i=1} n_i$ (normalmente, 1 ano);

D_T = somatório total do dano;

V_u = Vida útil.

A regra de Miner é amplamente utilizada na prática devido à sua simplicidade matemática e ao fato de fornecer resultados com certa margem de segurança.

3.4 Carregamentos Ambientais

Para que se possa realizar a análise de fadiga de estruturas *offshore*, é necessário identificar as variações de tensões nas mesmas. Esta variação é resultado da incidência de um ou mais carregamentos ambientais sobre a estrutura durante um determinado período de tempo, específicos para a locação onde se encontra a estrutura e são oriundos de fenômenos ambientais como corrente, onda e vento. Os fenômenos ambientais são caracterizados através de parâmetros que retratam a sua forma de atuação, como a altura de onda ou a velocidade de corrente, representando normalmente períodos de três horas de duração do fenômeno, que estatisticamente são conhecidos por períodos de curto prazo.

Os tipos de carregamentos atuantes em uma estrutura *offshore* que têm mais influência na avaliação de vida à fadiga provêm da ação de fenômenos ambientais, os quais têm natureza aleatória (previsão baseada em estatística), *e.g.*, a variação da superfície do mar e velocidade de corrente.

As correntes marítimas são representadas por perfis de velocidades que variam em intensidade e direção ao longo da profundidade. Para um período de curto prazo, considera-se que esse perfil manter-se-á constante, ou seja, a velocidade da corrente terá sempre a mesma intensidade e direção, independentemente do período de incidência sobre a estrutura.

No curto prazo, a variação da elevação da superfície do mar é tratada estatisticamente como sendo um processo aleatório, estacionário e Gaussiano (de média zero), sendo caracterizado por uma função de densidade espectral dependente de parâmetros como altura significativa de onda (H_s) e período de cruzamento zero (T_z). Estas duas grandezas resultam de um tratamento estatístico dos sinais temporais das elevações do mar que são medidos em campo, conforme mostra a Figura 3-5.

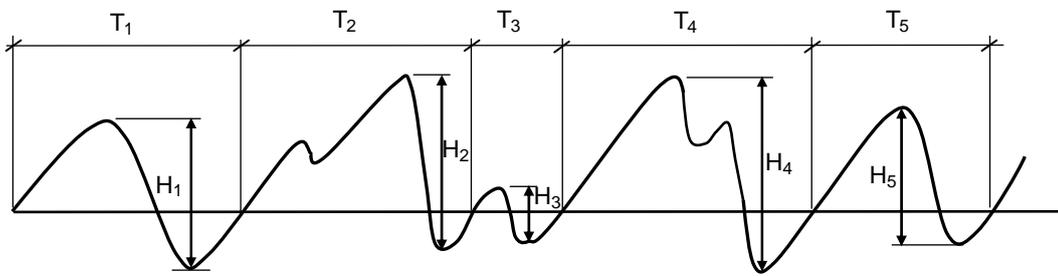


Figura 3-5 – Elevação do mar (ondas) com forma irregular.

A altura significativa de onda (H_s) é o valor médio do terço superior das alturas das ondas medidas e dispostas em ordem crescente de valor. Este parâmetro é dado pela seguinte fórmula:

$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=\frac{2N}{3}}^N H_i \quad (3-10)$$

onde N é o valor de todas as ondas do registro de medição dispostas em ordem crescente e H_i é altura de cada onda individual identificada no registro (vide Figura 3-5).

O valor de T_z é definido como a média aritmética dos períodos de todas as ondas identificadas no registro, i.e.,

$$T_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (3-11)$$

A representação do espectro de mar é modelada a partir de equações matemáticas expressas em função dos parâmetros H_s e T_z [30]. Duas dessas formulações são mais utilizadas na prática. A primeira delas corresponde ao espectro de Pierson-Moskowitz de dois parâmetros, ou ISSC:

$$S_\eta(\omega) = \frac{4\pi^3 H_s^2}{\omega^5 T_z^4} \exp\left(-\frac{16\pi^3}{\omega^4 T_z^4}\right) \quad (3-12)$$

A segunda corresponde ao espectro de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), que foi o espectro utilizado nas simulações feitas nessa dissertação, dado pela equação a seguir:

$$S_\eta(f) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \cdot T_p \cdot \left(\frac{f_p}{f}\right)^5 \cdot (1 - 0.287 \cdot \ln(\gamma)) \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \cdot \gamma^{\exp\left(\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 \cdot f_p^2}\right)} \quad (3-13)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0,07 & \text{para } f \leq f_p \\ \sigma_a = 0,09 & \text{para } f > f_p \end{cases} \quad (3-14)$$

$$\gamma = 6,4 T_p^{-0,491} \quad (3-15)$$

onde, f é a frequência em (Hz), f_p é a frequência de pico em (Hz), γ é o parâmetro de forma do espectro e σ é o parâmetro de largura. Pode-se observar que, no espectro de JONSWAP, utiliza-se o período de pico T_p ($f_p = 1/T_p$), diferentemente do espectro de Pierson-Moskowitz o qual utiliza o período de cruzamento zero T_z , que é obtido diretamente do registro de ondas pela média dos períodos de cada onda. Portanto, faz-se

necessário o uso de uma relação entre os dois períodos para que se possa fazer uso do espectro de JONSWAP nesta dissertação. A relação adotada entre T_P e T_Z é a seguinte:

$$T_Z = T_P \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} \quad (3-16)$$

3.5 Análise Dinâmica Aleatória Global

Para se obter a vida útil em um SCR de uma estrutura *offshore*, que é o foco dessa dissertação, é necessário observar uma série de etapas. Inicialmente, é necessário fazer uma análise dinâmica global de todo o sistema. A análise global pode ser feita de duas maneiras: a forma acoplada, na qual o sistema flutuante é analisado conjuntamente com os dutos em uma forma interativa ou a forma desacoplada, onde a unidade flutuante e dutos são analisados em etapas distintas na qual o duto (*riser*) recebe como deslocamentos prescritos os movimentos impostos pela unidade flutuante. Nessa dissertação, somente foram realizadas análises desacopladas utilizando-se o ANFLEX [4], devido, principalmente, ao custo computacional de uma análise desacoplada ser bastante menor que numa análise acoplada. Em resumo, no presente trabalho foram realizadas análises dinâmicas desacopladas não-lineares aleatórias no domínio do tempo utilizando o ANFLEX [4]. Este tipo de análise representa mais adequadamente as não-linearidades existentes nos modelos do que análises no domínio da frequência.

Para avaliação de fadiga devem ser realizadas análises dinâmicas para todas as condições ambientais previstas para a locação onde o *riser* está ou estará instalado. A primeira etapa de uma análise dinâmica global para obtenção das tensões para avaliação de fadiga é a análise estática, onde é aplicado o carregamento devido à corrente e os offsets estáticos. Nesta dissertação, ambos foram mantidos alinhados e o efeito do vento foi implicitamente considerado através do offset estático.

Na segunda etapa, é feita a análise dinâmica com a atuação do carregamento de onda, o qual resulta em movimentos aleatórios nos seis graus de liberdade do flutuante. Os movimentos gerados pela atuação da onda incidente na unidade flutuante é função do casco e podem ser calculados a partir dos RAOs (*Response Amplitude Operators*) da unidade. Os RAOs são gerados por programa específico para análise de movimentos de

unidades flutuantes [31]. Multiplicando-se o quadrado do RAO para de cada grau de liberdade com o espectro da onda incidente e mediante uso de técnicas de simulação são gerados os movimentos em cada um dos seis graus de liberdade do flutuante, que então são transferidos e impostos ao topo de cada *riser* analisado. A equação representativa da geração dos movimentos de primeira ordem do flutuante é a seguinte:

$$S_R(\omega) = [RAO_R(\omega)]^2 \cdot S_\eta(\omega) \quad (3-17)$$

sendo $S_R(\omega)$ o espectro do movimento prescrito.

Internamente, o ANFLEX transforma automaticamente os RAOs de movimento em séries temporais de movimentos atuantes no topo do *riser* e realiza a análise dinâmica aleatória no domínio do tempo, gerando as séries temporais de esforços ao longo da estrutura que serão usados na análise de fadiga. Neste trabalho, utilizou-se o programa POSFAL [5] para o processamento das análises de fadiga.

O POSFAL [5] automaticamente calcula as séries temporais de tensões, identifica e conta número de ciclos das amplitudes de variação de tensões utilizando o método *Rainflow* e por fim, fazendo uso das curvas S-N, calcula o dano à fadiga e a correspondente vida útil. Outra opção do POSFAL é a leitura direta de histograma de tensões.

3.6 Cálculo das Tensões para Análise de Fadiga

No final da análise dinâmica, o ANFLEX gera séries temporais de esforços ou opcionalmente gera histogramas de tensões que são utilizadas no POSFAL [5] para o cálculo do dano e vida útil em 8 pontos, ou seja, a cada 45° de várias secções transversais ao longo do *riser*. A Figura 3-6 ilustra os pontos da seção transversal da junta, assim como a orientação dos eixos locais Y e Z.

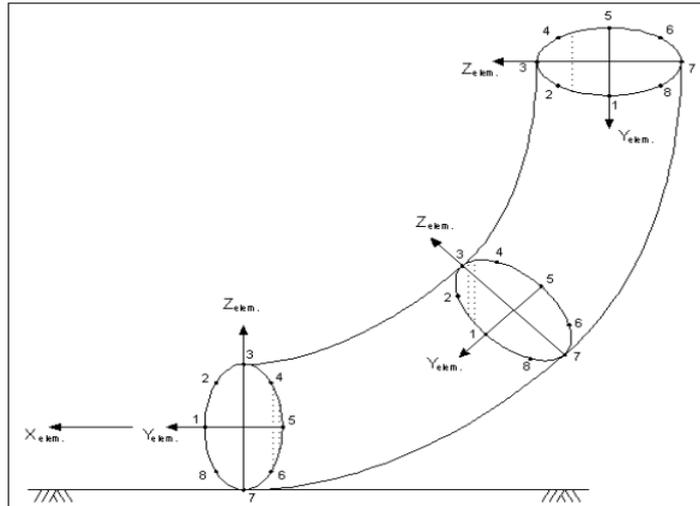


Figura 3-6 - Disposição dos pontos em torno da seção transversal

As tensões são calculadas nos 8 pontos da seção transversal, combinando-se no tempo de esforços axiais e momentos fletores nos dois planos ortogonais à seção transversal do *riser* conforme a seguinte expressão:

$$\sigma^{[i]}(t) = SCF_x^{[i]} \cdot \frac{F_x(t)}{A} + SCF_y^{[i]} \cdot \frac{M_y(t)}{I_y} \cdot Z_i + SCF_z^{[i]} \cdot \frac{M_z(t)}{I_z} \cdot Y_i \quad (3-18)$$

onde $F_x(t)$, $M_y(t)$ e $M_z(t)$ são as séries temporais do esforço axial, momento fletor no plano do *riser* e momento fletor fora do plano do *riser*, respectivamente. As constantes A , I_y e I_z são, respectivamente, a área da seção transversal do *riser* e os momentos de inércia em torno dos eixos Y e Z . Os SCFs são os fatores de concentração de tensões e Y_i e Z_i são as distâncias do ponto de interesse à linha neutra correspondente, sendo medidas ao longo do eixo Z caso opere-se com M_y e ao longo do eixo Y se com M_z , *i.e.*,

$$Y = D \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad Z = D \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ -1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 2 \\ 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 2 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

4. MODELAGEM DE TRINCHEIRA NA ANÁLISE DE FADIGA DE UM SCR

O principal objetivo deste trabalho é a análise de fadiga de SCRs levando em consideração a presença de uma trincheira (vala) na TDZ. Para tal finalidade foram realizadas análises numéricas e paramétricas variando-se:

- a) A geometria de trincheira;
- b) Os parâmetros de rigidez vertical do solo

Como já mencionado anteriormente as análises globais foram realizadas com o programa ANFLEX [4] e as análises de fadiga foram feitas utilizando o programa POSFAL [5]. No estudo paramétrico realizado neste trabalho foi considerado um SCR de 8.625’’ conectado a uma semi-submersível numa lâmina d’água de 600m. A seguir, será descrito o modelo de elementos finitos utilizado para analisar o SCR, assim como os parâmetros ambientais considerados. Também são apresentados os perfis de trincheira e os parâmetros de solo investigados no estudo paramétrico.

4.1 O Modelo Estrutural do SCR.

O *riser* utilizado no estudo paramétrico deste trabalho é um SCR na configuração de catenária livre acoplado a uma plataforma semi-submersível, numa lâmina d’água de 600m. O SCR tem 8.625’’ de diâmetro externo e 0.5’’ de espessura. Para a análise de fadiga, considerou-se uma redução de espessura de 3.2mm. A Figura 4-1 apresenta uma visão geral do modelo.

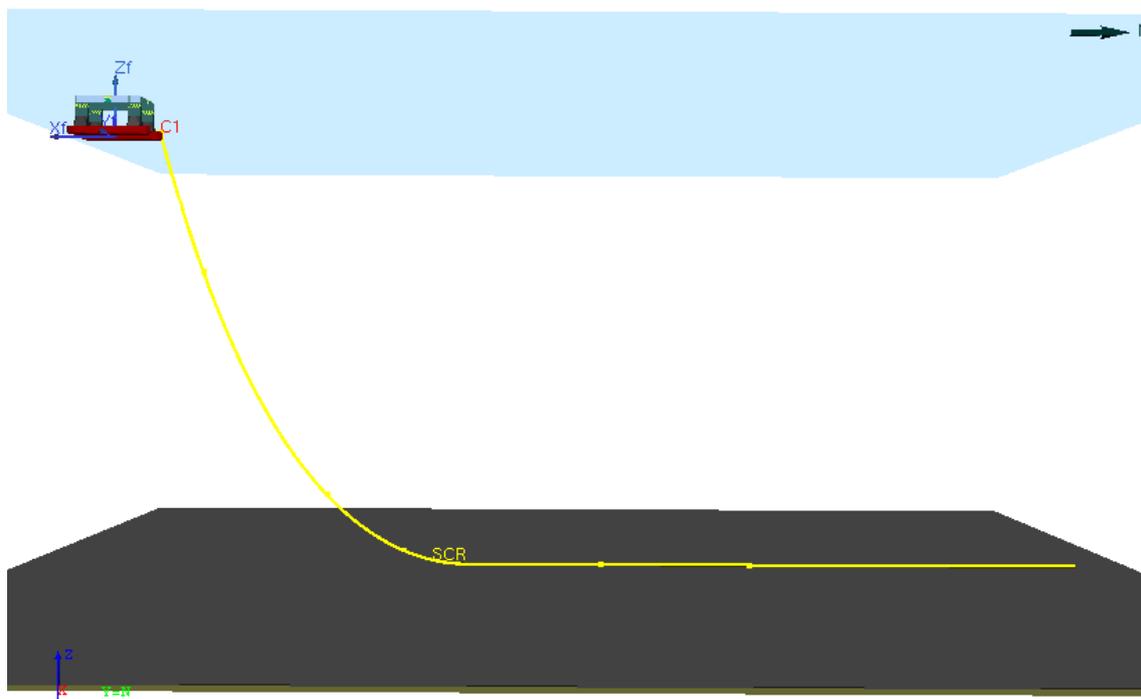


Figura 4-1 - Visão geral do modelo de SCR em elementos finitos.

Os elementos finitos utilizados na construção do modelo foram elementos de pórtico 3-D sendo que, no nó de conexão com a plataforma semi-submersível os movimentos são prescritos e gerados através do cruzamento do RAO da embarcação com o espectro da onda analisada em cada caso, conforme descrito no Capítulo 3. No nó de conexão da âncora, todos os graus de liberdade são restritos, *i.e.*, o nó da âncora está engastado. Todos os outros nós dos elementos ao longo do SCR estão livres em todos os seis graus de liberdade.

A malha utilizada para a realização das análises foi definida de modo que a região do TDP, onde ocorrem as maiores variações de tensões, os elementos fossem suficientemente pequenos para que se pudesse ter uma maior sensibilidade na obtenção dos resultados e, por conseguinte, uma resposta mais precisa na análise de fadiga. A definição dos valores dos tamanhos dos elementos discretizados foi feita com base em valores usuais para análise de fadiga.

O comprimento total do modelo é de 1.590,50 m, com um total de 3.199 elementos finitos. A Tabela 1 mostra com detalhes a discretização da malha de elementos finitos utilizada na modelagem. A malha é dividida em nove segmentos, sendo o primeiro deles correspondente ao trecho em que está o nó da âncora.

Na Tabela 2 estão listadas as propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do SCR. A *stressjoint* (segmento oito) e a *flexjoint* do (segmento nove) do topo têm suas propriedades apresentadas na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 1 – Discretização da malha de elementos finitos do riser

Segmento	Tipo de Elemento	Comprimento (m)	Nº de Elementos Finitos	Comprimento do primeiro elemento (m)	Comprimento do último elemento (m)
1	RIGIDTUBE	441.0	480	1.000	0.837
2	RIGIDTUBE	200.0	352	0.837	0.300
3	RIGIDTUBE	400.0	1333	0.300	0.300
4	RIGIDTUBE	350.0	538	0.300	1.001
5	RIGIDTUBE	100.0	133	1.002	0.502
6	RIGIDTUBE	95.0	317	0.499	0.100
7	RIGIDTUBE	3.0	30	0.100	0.100
8	STRESSJOINT	1.5	15	0.099	0.101
9	FLEXJOINT	0.0	1	0.000	0.000
Total		1590.5	3199		

Tabela 2 – Propriedades físicas, geométricas e hidrodinâmicas do SCR.

Propriedades da Estrutura	SCR 8.625-0.5in
Diâmetro Externo (m)	0.21907
Diâmetro Interno (m)	0.19367
Espessura (m)	0.0127
CM	2.0
CD	1.0
Diâmetro Hidrodinâmico (m)	0.21907
Módulo de Elasticidade (kN/m ²)	207000000
Ângulo de Topo (graus)	15.0
Redução de Espessura (m)	0.0032
Pressão no Topo (kPa)	20684.0
Peso Específico (kN/m ³)	77.0

Tabela 3 – Propriedades da Stressjoint.

Propriedades da Estrutura	STRESS JOINT
Diâmetro Externo Inicial(m)	0.21907
Diâmetro Externo Médio (m)	0.19367
Diâmetro Externo Final (m)	0.0127
CM	2.00
CD	1.00
Diâmetro Interno (m)	0.19368
Módulo de Elasticidade (kN/m ²)	207000000
Peso Específico (kN/m ³)	77.00
Redução de Espessura (m)	0.0032

Tabela 4 – Propriedades da Flex-Joint.

Propriedades da Estrutura	FLEX JOINT
Rigidez X (kN/m)	380400.0
Rigidez Y (kN/m)	380400.0
Rigidez Z (kN/m)	380400.0
Rigidez RX (kNm/deg)	6.441
Rigidez RY (kNm/deg)	10.28
Rigidez RZ (kNm/deg)	10.28

4.2 Casos de Carregamento Utilizados nas Análises

Para a análise paramétrica de fadiga foram utilizados os nove estados de mar apresentados na Tabela 5. Nesta tabela, são apresentados, para cada estado de mar, os parâmetros de altura significativa de onda (H_s), período de cruzamento zero (T_z), período de pico (T_p) (obtido conforme item 3.4), os parâmetros alfa e gamma relativos ao espectro de JONSWAP, o número de ocorrências de cada estado de mar no período de um ano e a sua respectiva frequência relativa (em porcentagem) de ocorrência.

Esta tabela também apresenta os *offsets* estáticos da unidade flutuante associados a cada estado de mar. Estes *offsets* foram estimados através de uma relação linear entre altura significativa e *offset* estático tomando como base um *offset* de 4.75% da lâmina d'água para um estado de mar de 4.75m.

Tabela 5 – Estados de mar utilizados nas análises de fadiga.

Scatter Diagram									
Estados de mar	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)	Alfa	Gama	Nº de Ocorrências (ano)	% de ocorrência	Offset estático (m)	% de offset em relação à LDA
MAR_1	0.75	6.0	8.07	0.000004	2.296	65	2.23%	4.5	0.75%
MAR_2	1.25	6.5	8.76	0.001063	2.205	747	25.58%	7.5	1.25%
MAR_3	1.75	6.5	8.76	0.002084	2.205	1137	38.94%	10.5	1.75%
MAR_4	2.25	7.0	9.46	0.003493	2.123	573	19.62%	13.5	2.25%
MAR_5	2.75	8.0	10.86	0.005347	1.984	256	8.77%	16.5	2.75%
MAR_6	3.25	8.2	11.14	0.007501	1.959	95	3.25%	19.5	3.25%
MAR_7	3.75	8.5	11.56	0.010051	1.924	23	0.79%	22.5	3.75%
MAR_8	4.25	9.0	12.27	0.013043	1.869	19	0.65%	25.5	4.25%
MAR_9	4.75	10.0	13.67	0.016596	1.772	5	0.17%	28.5	4.75%
Total:						2920			

Associado a cada um destes estados de mar, foi considerado um perfil de corrente triangular com velocidade na superfície do mar de 0,6m/s e no fundo de 0,0m/s. Nas análises realizadas neste trabalho, a corrente e a onda, assim como os movimentos do flutuante, foram considerados colineares. Considerou-se também, somente uma direção de incidência para o carregamento ambiental. Esta direção é ilustrada na Figura 4-2.

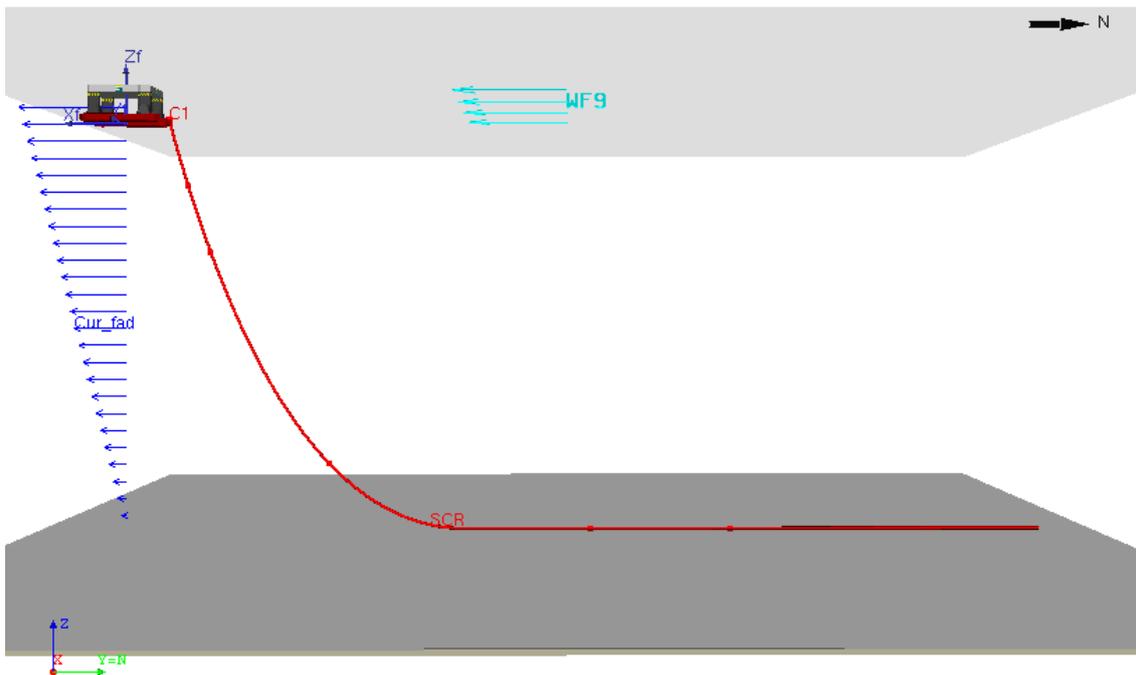


Figura 4-2 – Aplicação do carregamento ambiental sobre o sistema *riser*-flutuante.

4.2.1 Parâmetros Utilizados na Modelagem do Solo Marinho.

Outra motivação dos estudos paramétricos realizados neste trabalho foi a de verificar também a influência das rigidezes do solo no dano à fadiga do SCR, ou seja, avaliar se uma mudança de tipo de solo tem ou não uma influência significativa na avaliação do dano à fadiga do *riser*. Para tanto, se optou por utilizar três diferentes modelos de solo com valores diferenciados de rigidez vertical e de parâmetros de atrito.

Os valores dos parâmetros do solo utilizados no trabalho foram obtidos com base nas formulações da norma da DNV [32]. Com base na Tabela 7-2 da referida norma, adotou-se os três tipos argila: dura (*hard*), firme (*firm*) e mole (*soft*). Os valores

de rigidez vertical, coeficientes axial e lateral de atrito e deslocamentos de mobilização obtidos para estes três tipos de solo são mostrados na Tabela 6. Para os parâmetros como μ_{axial} e μ_{lat} utilizou-se recomendações da norma da ASCE [33] e, para o cálculo do valor do deslocamento de mobilização foi utilizada a recomendação da OTC 16628 [13].

Tabela 6 – Parâmetros de solo utilizados nas análises

Tipo	Parâmetros de Solo			
HARD	Su (kN/m ²)	γ_{solo} (kN/m ³)	v	e_s
	13.0	13.0	0.45	0.9
	Kv (kN/m ²)	μ_{axial}	μ_{lat}	Desl. mob. (m)
	3972.0	1.79	1.00	0.005477
FIRM	Su (kN/m ²)	γ_{solo} (kN/m ³)	v	e_s
	7.0	10.0	0.45	1.5
	Kv (kN/m ²)	μ_{axial}	μ_{lat}	Desl. mob. (m)
	1478.0	1.17	0.69	0.005477
SOFT	Su (kN/m ²)	γ_{solo} (kN/m ³)	v	e_s
	2.0	6.0	0.45	2.2
	Kv (kN/m ²)	μ_{axial}	μ_{lat}	Desl. mob. (m)
	315.0	0.53	0.40	0.005477
Legenda	γ_{solo} - peso específico do solo			
	μ_{axial} - coeficiente de atrito axial			
	μ_{lat} - coeficiente de atrito lateral			
	v - coeficiente de poisson			
	e_s - índice de vazios do solo			
	Su - Resistência não-drenada do solo			
	Kv - rigidez vertical do solo			
Desl. Mob. - Deslocamento de mobilização				

4.3 Definição e Validação do Modelo de Trincheira

A modelagem da trincheira é uma das partes mais importantes deste trabalho, pois é nesta etapa onde se define qual a forma do perfil da mesma, *i.e.*, onde serão definidas as características geométricas da mesma, tais como: profundidade e comprimento.

Como dito anteriormente, é praticamente impossível saber qual será a forma que a trincheira irá ter após o início de sua formação devido, principalmente, aos movimentos dinâmicos na região do TDP do *riser*, às condições e tipo de solo, histórico de instalação e uso do SCR *etc.* Portanto, a forma estabelecida neste trabalho para o perfil da trincheira é a de uma curva dada por uma função analítica exponencial que é ajustada às condições do problema [34]. A seguir, será detalhado o procedimento utilizado neste trabalho para moldar o perfil da trincheira.

A condição adotada para definir o comprimento da trincheira foi tomar a distância entre os TDPs dos estados de mar com maior e menor *offset* estático, respectivamente. A posição do ponto mais profundo do perfil da trincheira foi associada à posição do TDP estático para o estado de mar mais freqüente, o qual corresponde ao estado de mar 3 (vide Tabela 5). Imagina-se, desta maneira, que a forma da trincheira é decorrente da maior repetitividade dos efeitos de carga e descarga em cada um dos seus pontos.

A função analítica adotada neste trabalho para modelar uma trincheira tem a seguinte expressão, baseada em [34]:

$$z(x) = -axe^{(-bx^2)} \quad (4-1)$$

onde z é a profundidade da trincheira, a e b são parâmetros que devem ser definidos em função da profundidade e comprimento da trincheira, conforme descrito a seguir.

Para o ajuste dos coeficientes a e b , neste trabalho, adotou-se os seguintes passos:

- Definir L_1 como a distância medida entre a posição do TDP relativo ao estado de mar com menor *offset* estático e o TDP do estado de mar mais freqüente;

- Definir L_2 como a distância medida entre a posição do TDP relativo ao estado de mar mais freqüente e o estado de mar com maior *offset* estático;
- A profundidade da trincheira é máxima no TDP do estado de mar mais freqüente, vide Figura 4-3;
- A profundidade da trincheira no TDP do estado de mar com menor *offset* estático é praticamente nula;
- A profundidade da trincheira no TDP do estado de mar com maior *offset* estático corresponde a 5% do valor da profundidade máxima;
- A profundidade máxima da trincheira é sempre dada em função do diâmetro externo do *riser*.

Com os critérios definidos acima, cria-se um sistema de duas equações e duas incógnitas (a e b) dadas por:

$$P_{\max} = a \cdot L_1 \cdot e^{(-b \cdot L_1^2)} \quad (4-2)$$

$$0.05 \cdot P_{\max} = a \cdot L_2 \cdot e^{(-b \cdot L_2^2)} \quad (4-3)$$

Resolvendo-se este sistema, obtém-se a expressão analítica da trincheira e com isto a profundidade da mesma nas diferentes posições.

A Figura 4-4 ilustra as distâncias L_1 e L_2 para o *riser* e os estados de mar investigados neste trabalho. Observa-se que L_1 e L_2 são calculados considerando o fundo do mar inicialmente plano. Todos os parâmetros calculados estão em detalhes no Anexo A.

No estudo paramétrico realizado nessa dissertação, adotou-se como referência, cinco valores de profundidade máxima (P_{\max}) para os perfis de trincheira, (1D, 2D, 3D, 4D e 5D), onde D é o diâmetro externo do *riser*.

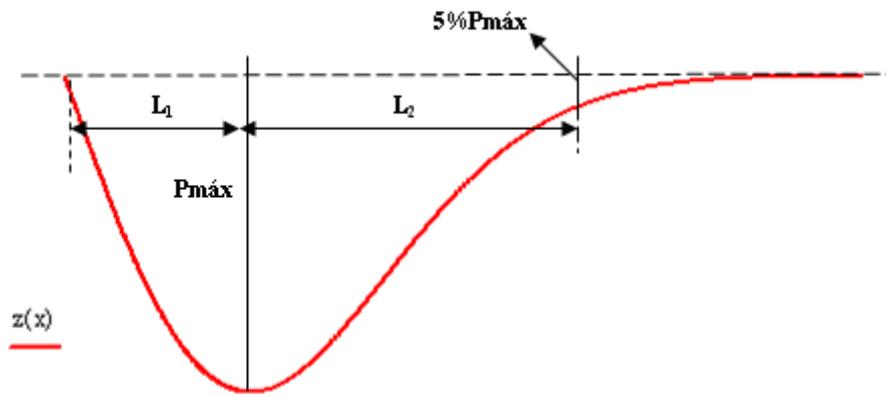


Figura 4-3 – Definição dos parâmetros de profundidade da trincheira.

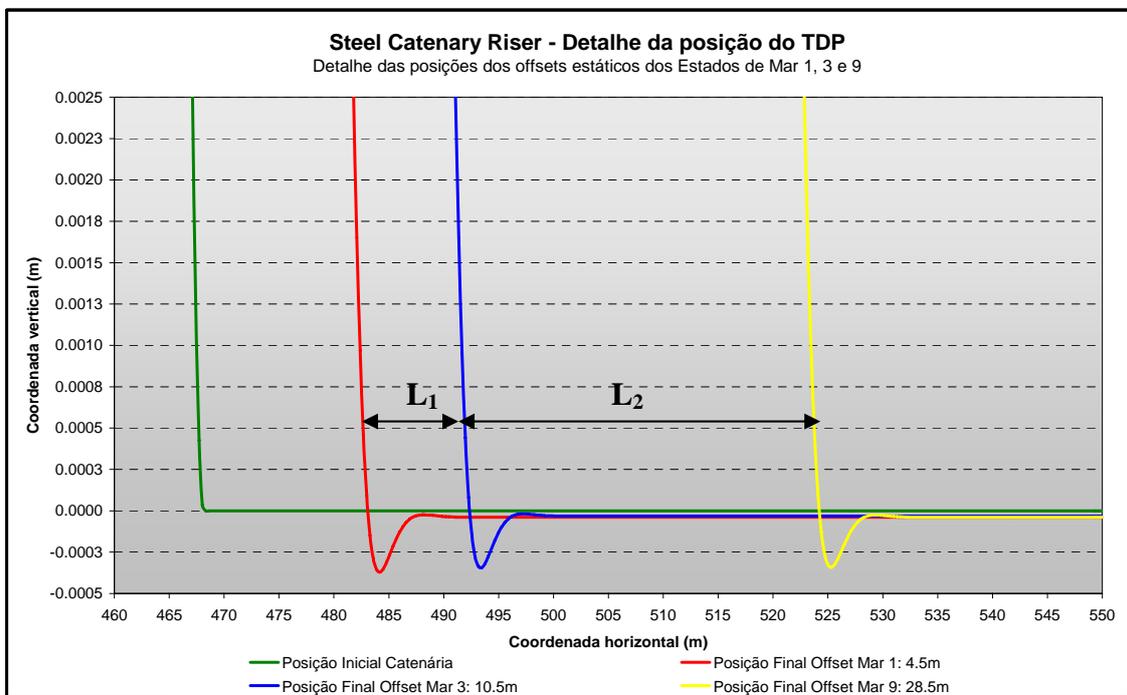


Figura 4-4 – Offsets aplicados ao SCR para definição do comprimento da trincheira (Escala vertical ampliada).

Uma vez definido a forma do perfil da trincheira, torna-se necessário verificar se a mesma irá realmente acomodar o riser, *i.e.*, verificar se o riser se encaixa dentro da trincheira. No presente trabalho, a trincheira foi modelada no ANFLEX [4] através do recurso disponível no programa para representar um perfil irregular para o fundo marinho. Para cada uma das cinco trincheiras, foram feitas análises estáticas, impondo ao riser o *offset* estático correspondente a cada um dos estados de mar e foi observada a

geometria do mesmo na região do TDP. Os resultados obtidos são apresentados da Figura 4-5 até a Figura 4-9.

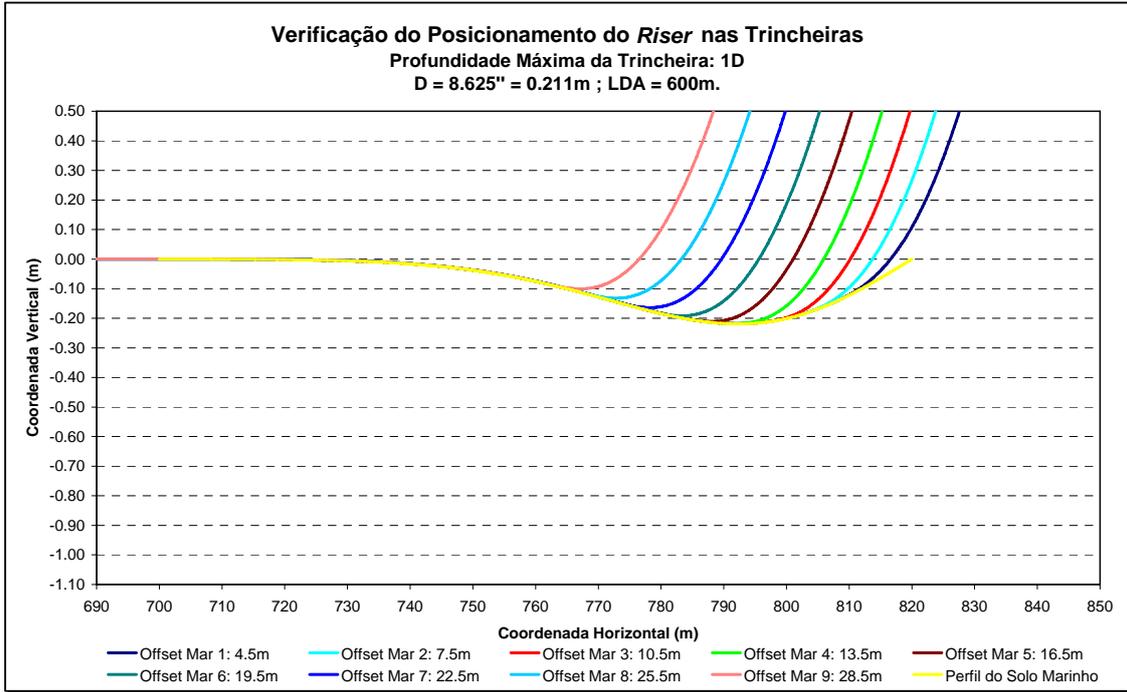


Figura 4-5 – Trincheira e geometria do *riser* na região do TDP (profundidade de trincheira 1D, D = 0.211m).

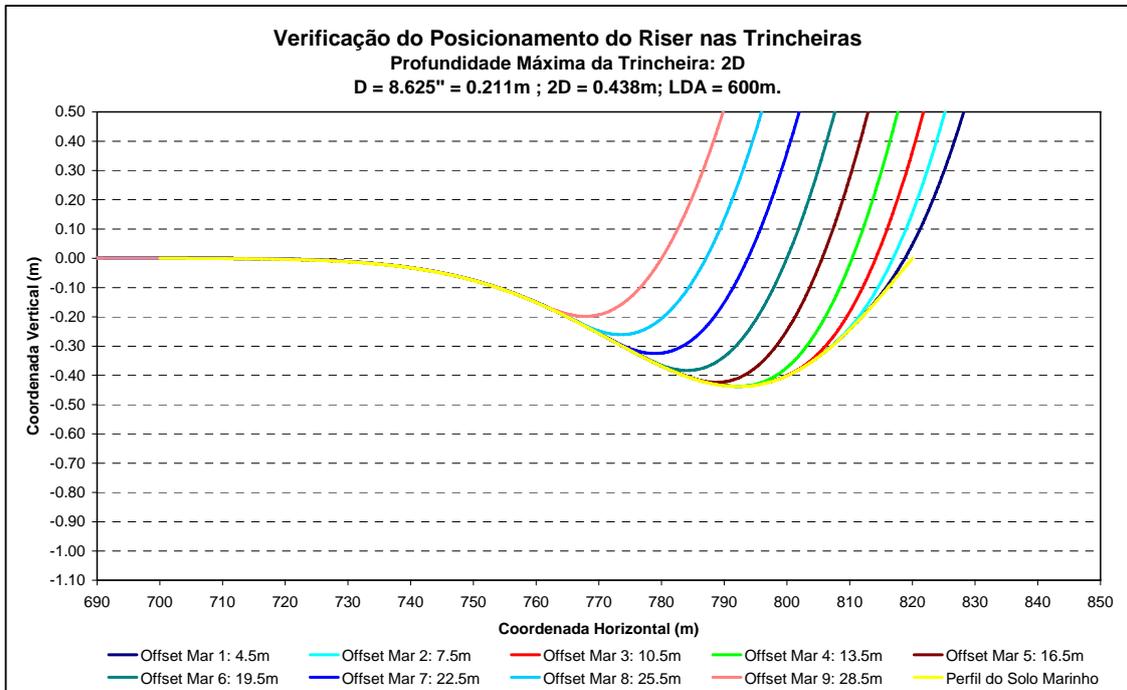


Figura 4-6 – Trincheira e geometria do *riser* na região do TDP (profundidade de trincheira 2D, D = 0.211m).

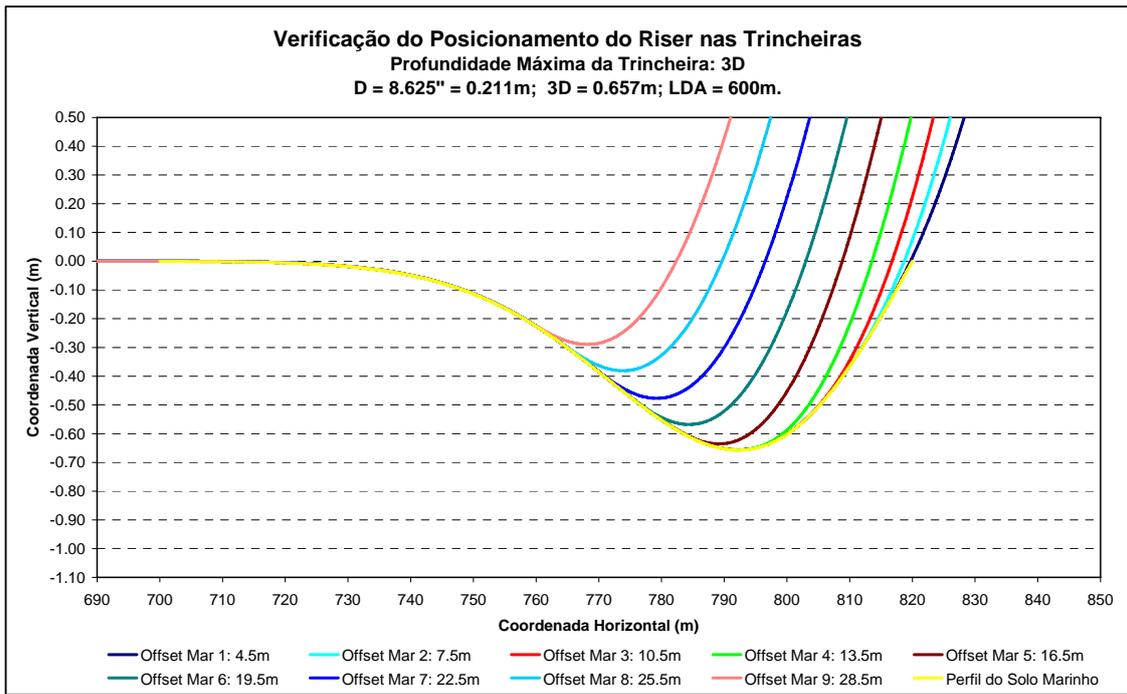


Figura 4-7 – Trincheira e geometria do *riser* na região do TDP (profundidade de trincheira 3D, D = 0.211m).

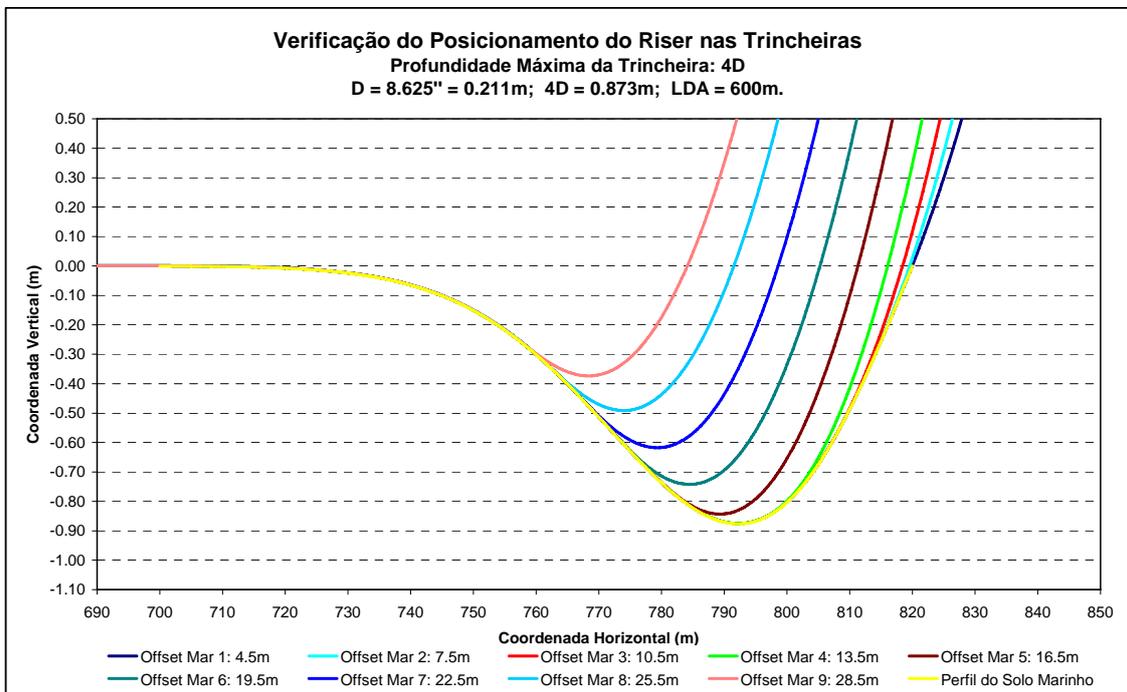


Figura 4-8 – Trincheira e geometria do *riser* na região do TDP (profundidade de trincheira 4D, D = 0.211m).

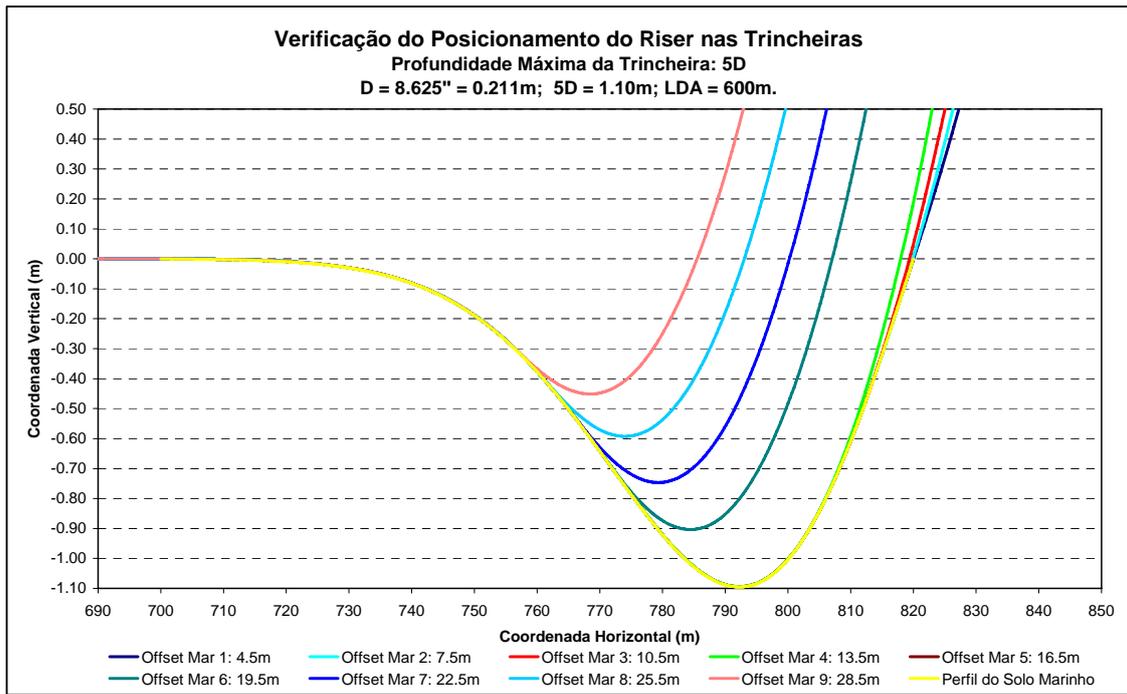


Figura 4-9 – Trincheira e geometria do *riser* na região do TDP (profundidade de trincheira 5D, D = 0.211m).

Pode-se observar, nas Figura 4-5 a Figura 4-9, que o *riser* tem rigidez flexional suficiente para que o mesmo se acomode no fundo da trincheira. Observa-se, entretanto que o offset *far* suposto nas análises faz com que apenas uma parte do SCR fique em contato com a trincheira nos estados de mar com maiores offsets estáticos.

Como será apresentado no capítulo seguinte, neste trabalho, também foi efetuada uma análise de fadiga considerando todos os *offsets* associados aos estados de mar como sendo idênticos e iguais ao do estado de mar mais freqüente (estado de mar 3). Nesta situação, o *riser* permanece praticamente todo o tempo totalmente encaixado dentro da trincheira.

5. ANÁLISES E RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e comentados os resultados das análises de fadiga do SCR definido no Capítulo 4, variando-se a profundidade da trincheira e os parâmetros de solo.

Os históricos de esforços/tensões ao longo do SCR em cada estado de mar para o cálculo do dano à fadiga são oriundos de uma análise dinâmica aleatória no domínio do tempo, considerando um tempo total de simulação de 2.200 segundos realizada no ANFLEX [4]. Estes históricos servem de entrada para o processamento de cálculo do dano à fadiga realizada no POSFAL [5]. No presente trabalho, empregou-se a facilidade de geração automática de tensões, contagem e identificação de ciclos disponíveis no ANFLEX [4]. Os dados são transferidos para processamento no POSFAL [5] através de arquivos de histogramas de tensões.

Nas análises de fadiga, foi utilizada a curva E bi-linear da DNV [26] considerando proteção catódica e não foi considerado nenhum fator de concentração de tensões.

Para o estudo paramétrico realizado nesta dissertação, foram realizadas 324 análises aleatórias no domínio do tempo com duração de aproximadamente 2.83 horas cada uma, perfazendo aproximadamente 918 horas de processamento.

5.1 Análise de Fadiga sem Considerar Trincheira

Serão apresentados a seguir, os resultados obtidos para a vida à fadiga do SCR sem considerar a presença de trincheira na região do TDP, *i.e.*, o fundo do mar foi considerado plano. Nesta etapa, foram feitas análises de fadiga considerando os três diferentes tipos de solo apresentados no Capítulo 4. A Figura 5-1 apresenta os valores de vida à fadiga ao longo de todo o *riser* onde estão em destaque as regiões de maior interesse, que são a região do TDP e do topo. Detalhes destas duas regiões são apresentados, respectivamente, na Figura 5-2 e na Figura 5-3. Os resultados apresentados contemplam os estados de mar, com *offsets* estáticos e frequências de ocorrência apresentados na Tabela 5 do Capítulo 4.

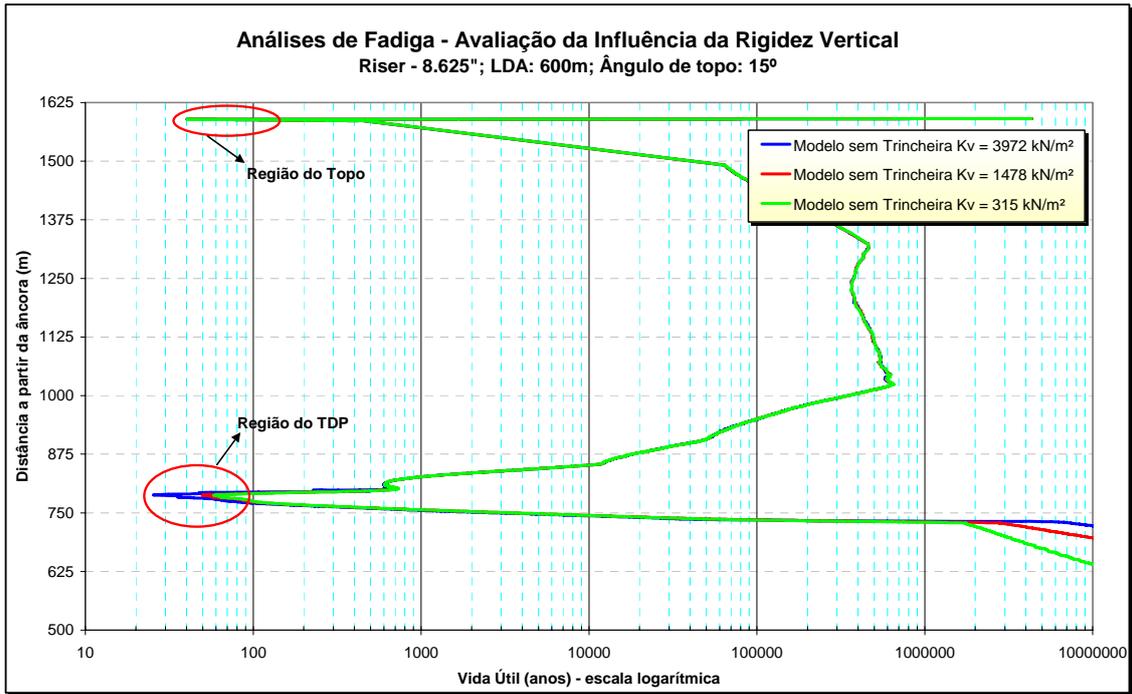


Figura 5-1 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do riser em função variação da rigidez vertical do solo marinho.

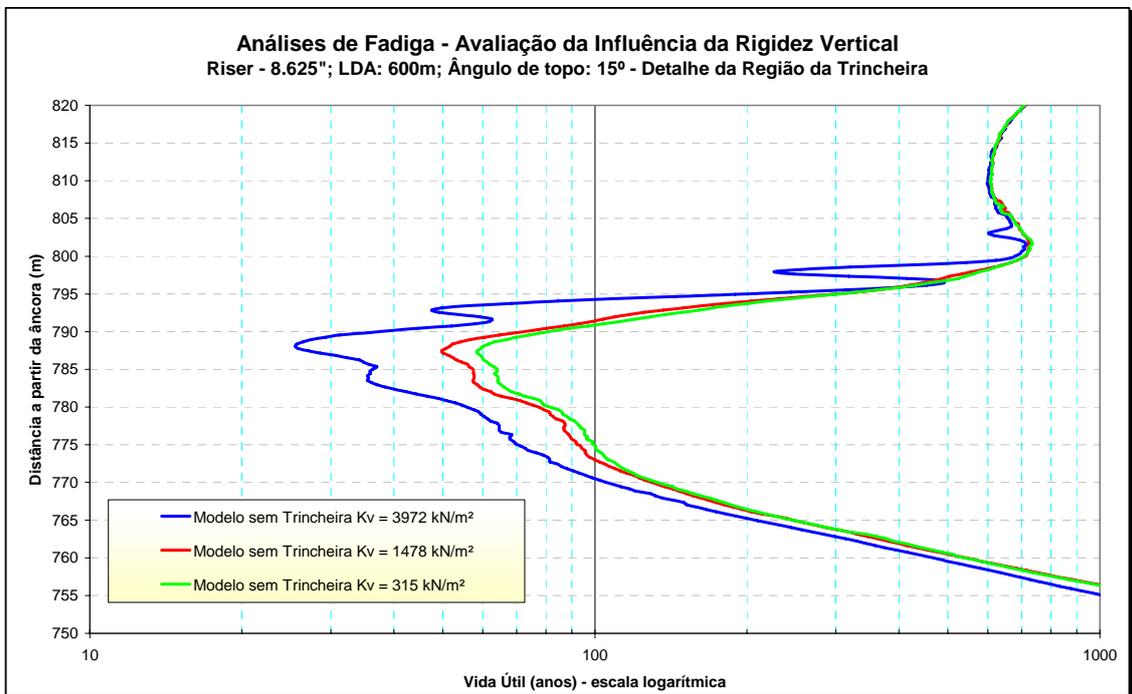


Figura 5-2 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função variação da rigidez vertical do solo marinho.

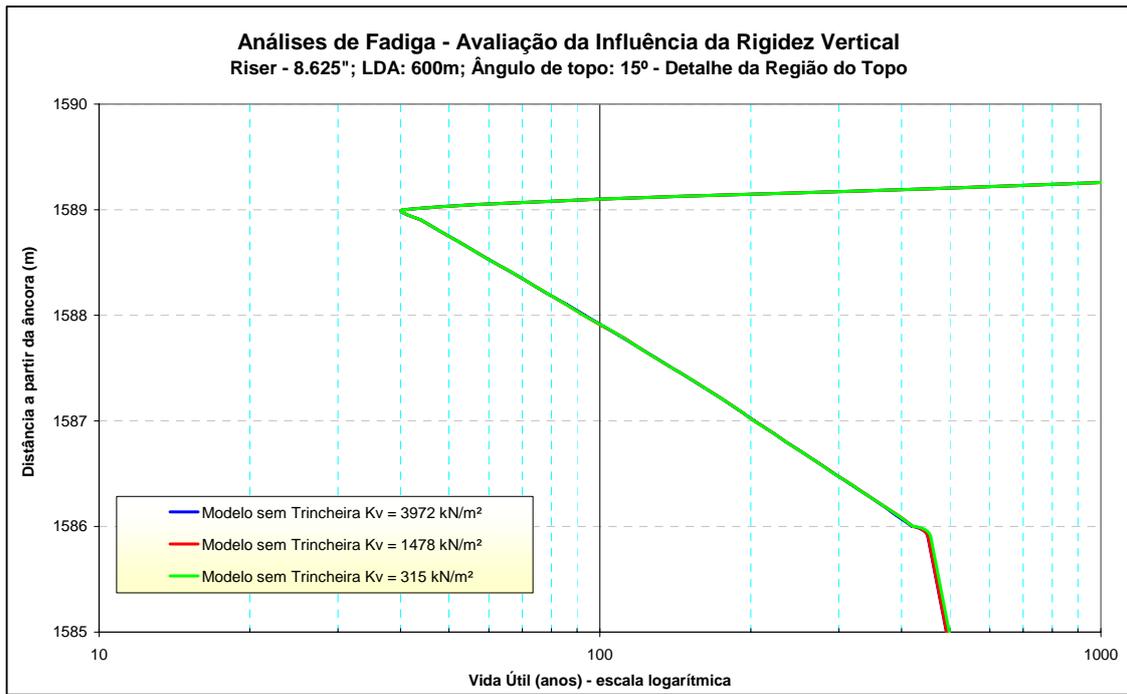


Figura 5-3 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função da variação rigidez vertical do solo marinho.

Pode-se notar na Figura 5-2, que a região do TDP é, realmente, a mais crítica em relação ao dano à fadiga e também a mais influenciada pelas variações da rigidez do solo marinho. A rigidez do solo não afeta o comportamento à fadiga do SCR na região do topo.

Observa-se também na Figura 5-2 uma variação significativa na vida à fadiga na região do TDP em função do valor da rigidez do solo, ou seja, quanto mais rígido for o solo, maior será o dano à fadiga. Para o solo que tem a maior rigidez vertical ($K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$), o menor valor de vida útil nessa região é de 25.5 anos; já para o modelo com $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$ de rigidez, o menor valor de vida útil é de 49.7 anos, *i.e.*, quase o dobro da vida útil observada no modelo anterior. No modelo de solo com $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$; o menor valor observado para vida útil é de 58.4 anos.

Observa-se, portanto, que o valor de rigidez do solo marinho tem influência significativa no comportamento de um *riser* quando se quer avaliar sua vida útil na região do TDP. Deve-se ter bastante critério na determinação de tais valores, devido à sua grande influência nos resultados de vida à fadiga de um SCR. Este mesmo tipo de conclusão também já foi observado em outros trabalhos [6, 11, 13, 12].

5.2 Análise de Fadiga Considerando Trincheira

Nesta seção, são apresentados os resultados de vida à fadiga considerando a presença de uma trincheira na região do TDP. O modelo de trincheira utilizado foi definido no capítulo anterior, conforme a Figura 4-3. Para o *riser* e as condições ambientais consideradas, as dimensões L_1 e L_2 , resultaram respectivamente em 10,0m e 90,0m. Nas análises de fadiga com trincheira foram consideradas profundidades distintas para a mesma: 1D, 2D, 3D, 4D e 5D, sendo D o diâmetro externo do SCR igual a 8,625 polegadas.

A Figura 5-4 apresenta os resultados de vida à fadiga ao longo do SCR sem a presença de trincheira e também, resultados de modelos com as trincheiras de diferentes profundidades, considerando o solo com a rigidez vertical mais alta. Na Figura 5-5 e na Figura 5-6, são apresentados em detalhes os resultados de vida à fadiga na região do TDP e no topo, respectivamente. As Figura 5-7, Figura 5-8 e Figura 5-9, apresentam os resultados correspondentes ao solo firme ($K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$) e as Figura 5-10, Figura 5-11 e Figura 5-12, para o solo considerado mole ($K_v = 315 \text{ kN/m}^2$).

A Figura 5-13 apresenta um resumo comparativo dos resultados mais críticos de vida à fadiga em todas as situações analisadas.

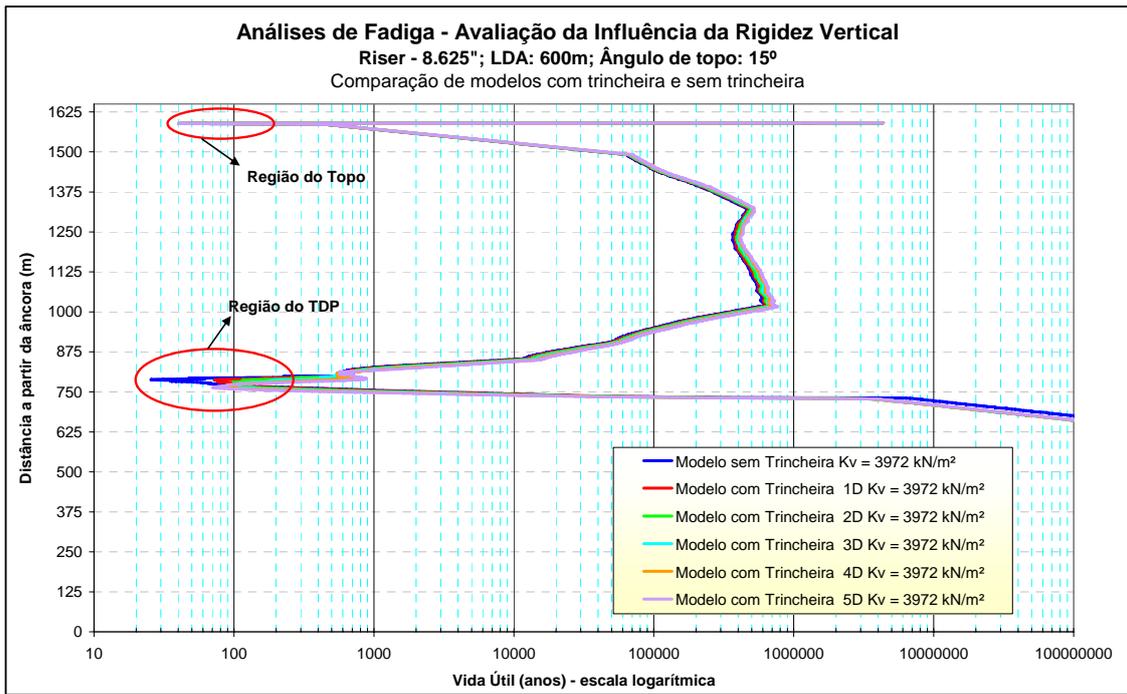


Figura 5-4 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do *riser* em função da profundidade da trincheira. Rigidez do solo: $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$.

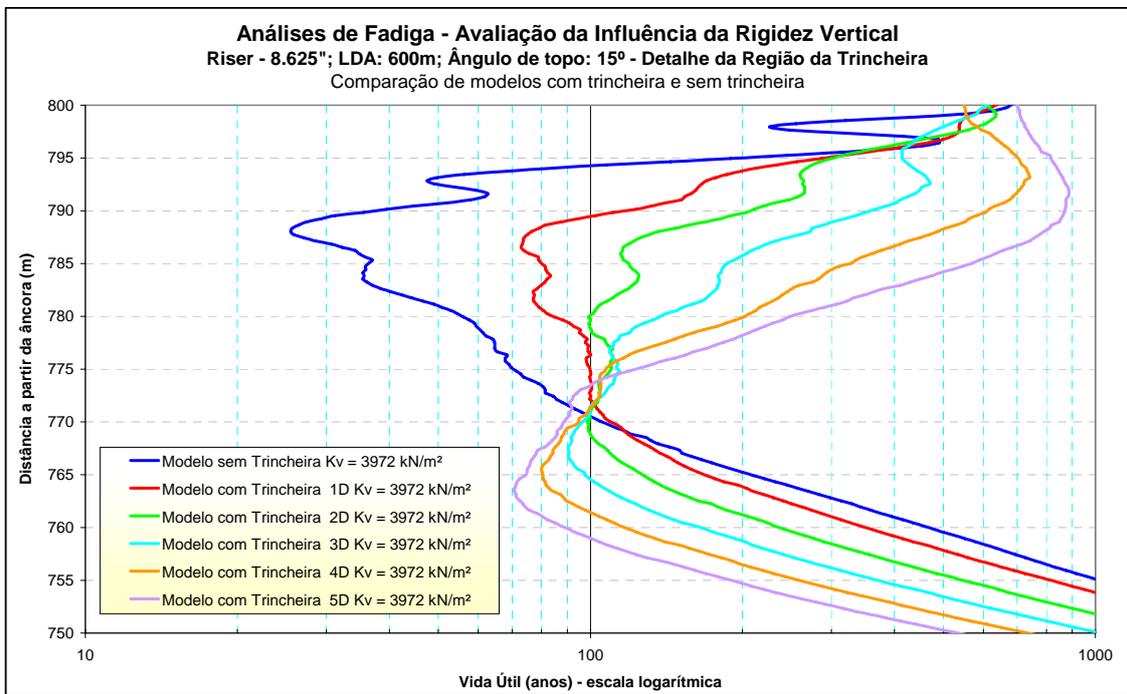


Figura 5-5 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$.

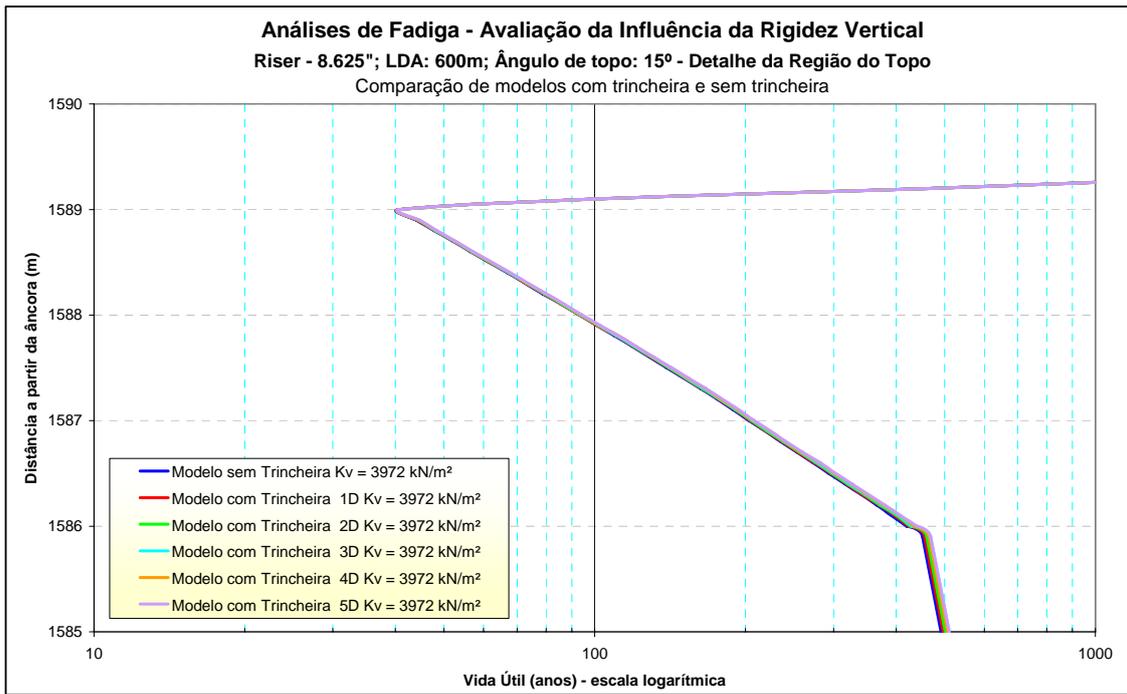


Figura 5-6 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do riser em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$.

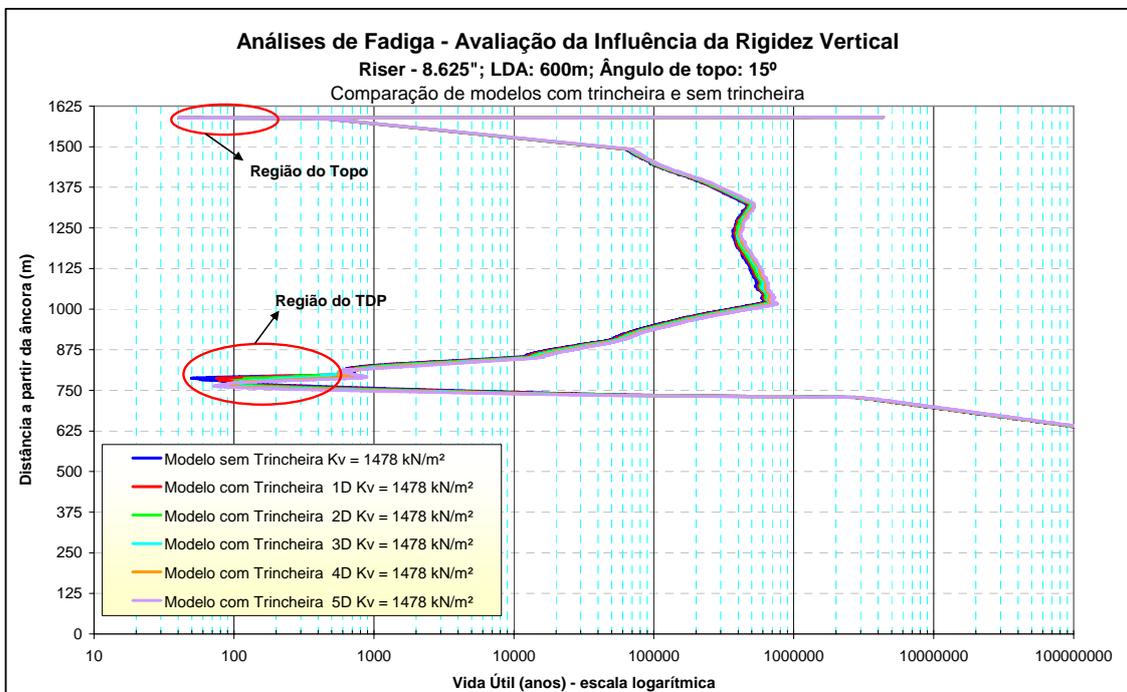


Figura 5-7 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$.

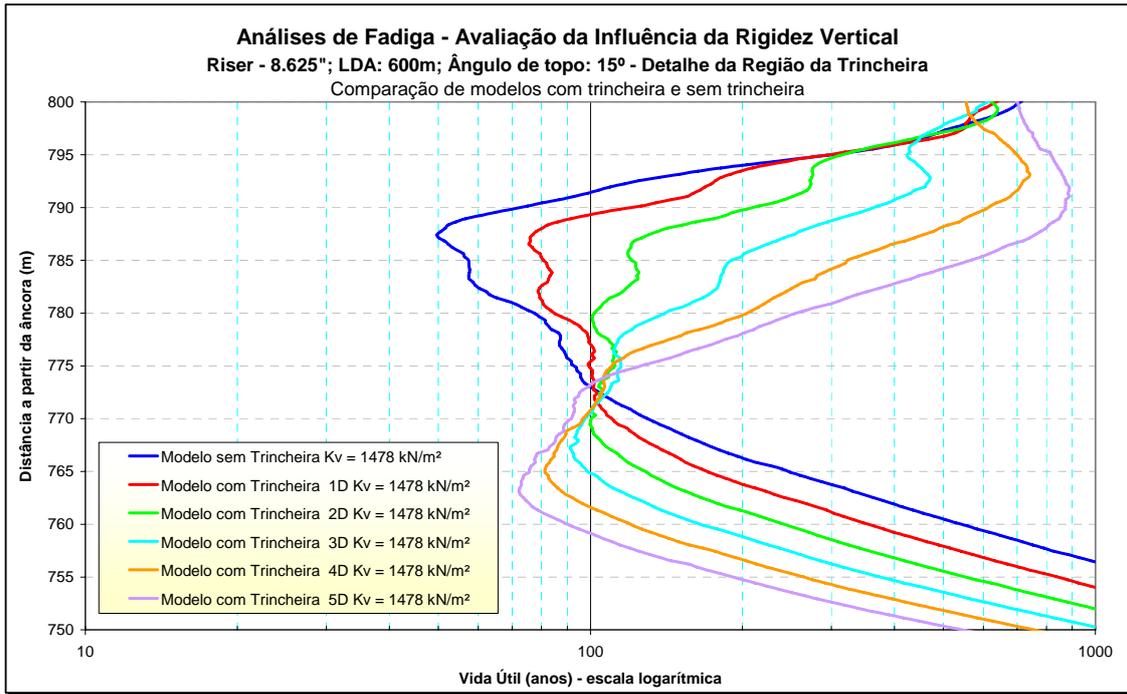


Figura 5-8 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo. $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$.

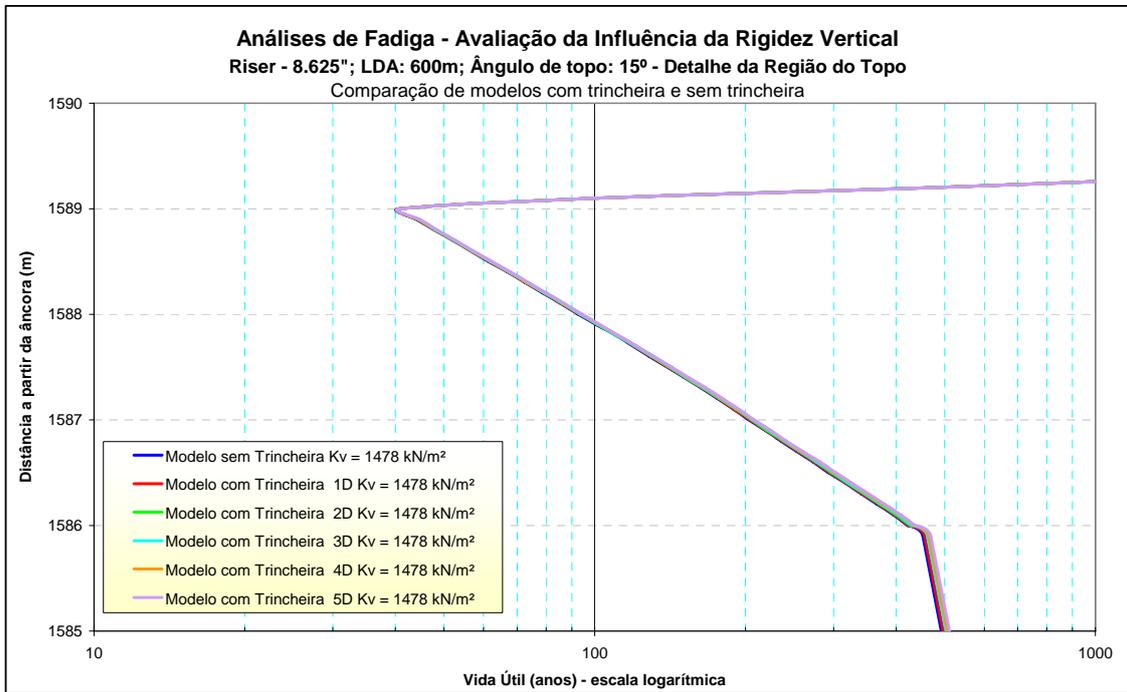


Figura 5-9 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo. $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$.

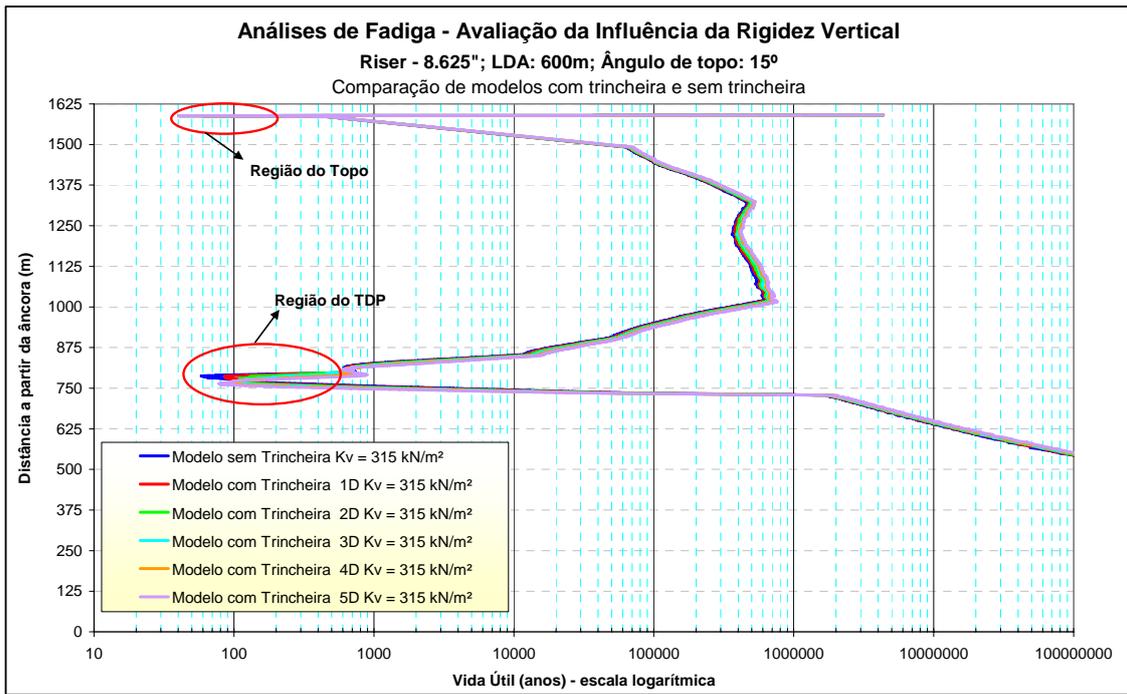


Figura 5-10 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$.

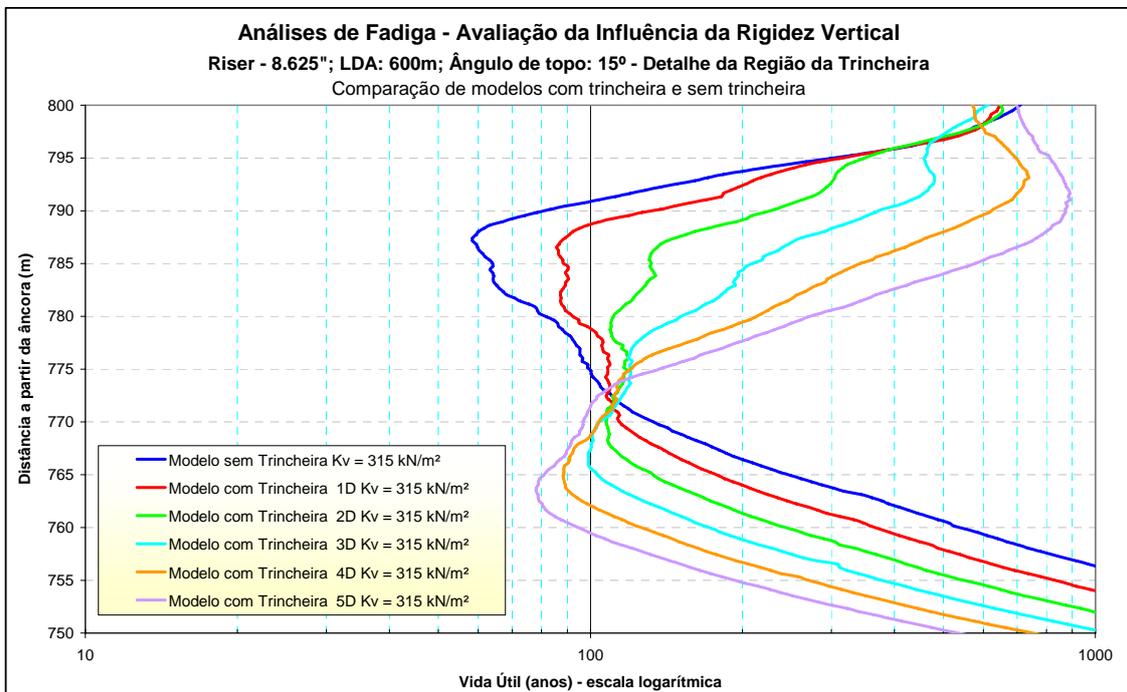


Figura 5-11 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$.

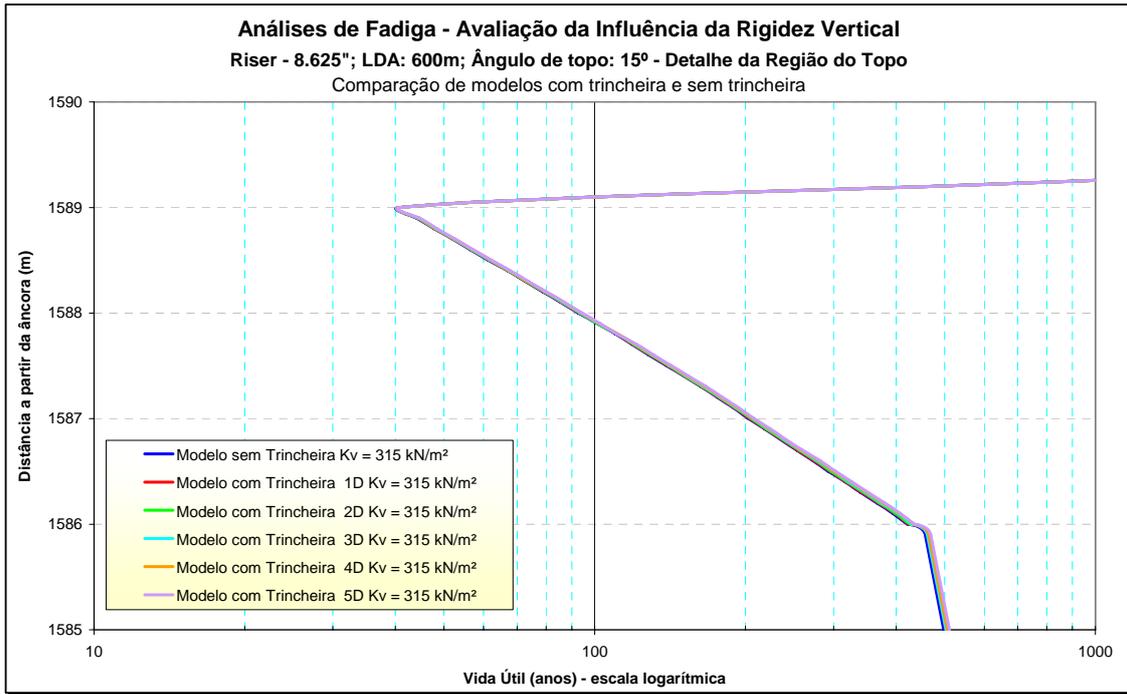


Figura 5-12 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do riser em função da profundidade da trincheira. Rigidez vertical do solo: $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$.

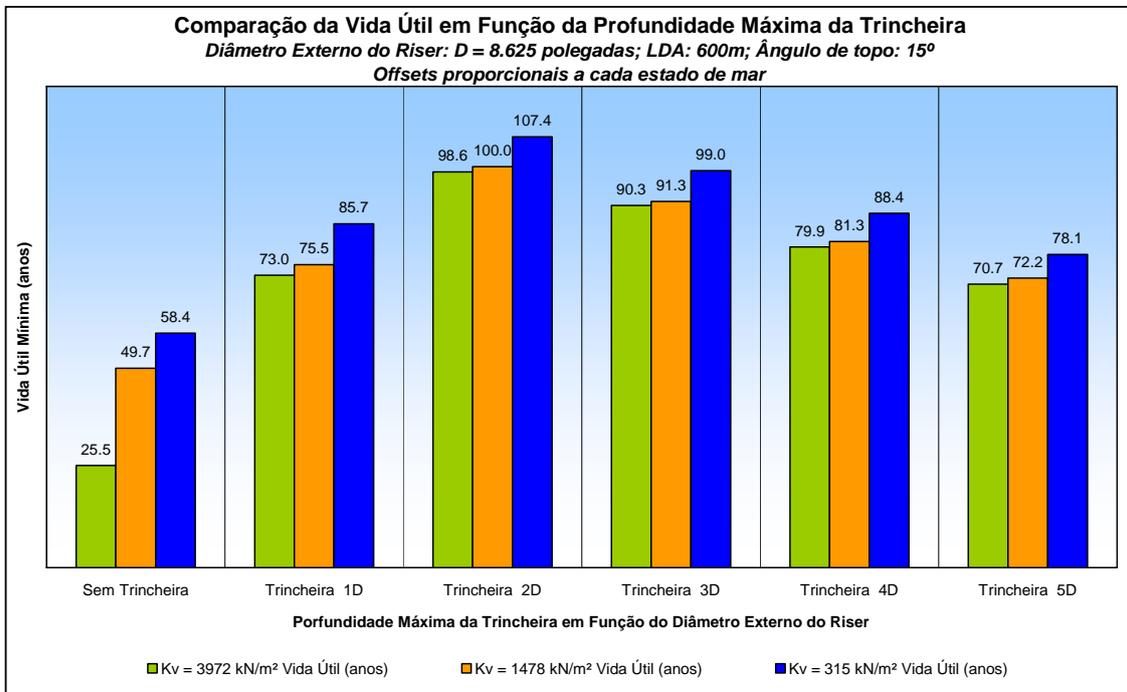


Figura 5-13 – Gráfico comparativo dos valores mínimos de vida útil na região do TDP.

Pelos resultados apresentados, observa-se que a vida à fadiga na região do TDP sofre alterações devido à presença da trincheira e, a vida a fadiga na região do topo do *riser* não é alterada pela presença da mesma e por variações nos parâmetros de resistência/rigidez do solo marinho. Porém, na TDZ, a vida à fadiga tem um aumento significativo devido à presença de uma trincheira, *i.e.*, as variações de curvaturas na TDZ são amenizadas acarretando em um ganho na vida à fadiga.

Analisando os resultados considerando o solo mais rígido ($K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$), o valor mínimo de vida útil vai dos inicialmente 25.5 anos, do modelo sem utilização de trincheira, para 73.0, 98.6, 90.3, 79.9 e 70.7 anos para os perfis de trincheira com profundidade de 1D, 2D, 3D, 4D e 5D ($D = 8.625''$), respectivamente. Considerando o solo firme ($K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$), o valor mínimo de vida útil vai dos inicialmente 49.7 anos, do modelo sem utilização de trincheira, para 75.5, 100.0, 91.3, 81.3 e 72.2 anos para os perfis de trincheira com profundidade de 1D, 2D, 3D, 4D e 5D ($D = 8.625''$), respectivamente. Tomando o solo mole ($K_v = 315 \text{ kN/m}^2$), o valor mínimo de vida útil vai dos inicialmente 58.4 anos, do modelo sem utilização de trincheira, para 85.7, 107.4, 99.0, 88.4 e 78.1 anos para os perfis de trincheira com profundidade de 1D, 2D, 3D, 4D e 5D ($D = 8.625''$), respectivamente.

Na observação desses resultados, nota-se um fato interessante. Há um aumento considerável no valor de vida útil quando se utiliza um perfil com profundidade até 2D e a partir da profundidade de 3D em diante os valores tendem a diminuir, vide Figura 5-13. Isto pode ser explicado pelo fato de que todos os perfis de trincheira utilizados nas análises terem a mesma extensão total - para que se pudesse manter um padrão - fazendo apenas variar a profundidade máxima, o que leva o perfil de solo a ter diferentes raios de curvatura medidos no fundo da trincheira. Para o perfil de profundidade 1D, por exemplo, o raio de curvatura calculado na parte mais profunda do perfil é de 1758,0m e este diminui gradativamente para 878.9m, 586.0m, 439.5m e 351.6m nos perfis que tem profundidades máximas de 2D, 3D, 4D e 5D ($D = 8.625''$), respectivamente. Mesmo assim, a presença da trincheira é favorável em relação à melhora no dano à fadiga nesta região, pois mesmo para o caso mais desfavorável observado, relacionado à trincheira com a profundidade de 5D, o valor mínimo de vida útil observada (70.7 anos) ainda é muito melhor que o observado no modelo sem presença de trincheira (25.5 anos).

Nota-se também que toda a região onde estão os menores valores de vida útil ao longo do *riser* está localizada dentro da trincheira que vai posição 700,0m até 820,0m ao longo do *riser* a partir da âncora.

Embora a vida à fadiga tender sempre a ser maior quanto menor for a rigidez do solo marinho, na presença de uma trincheira, a influência do valor da rigidez não é tão significativa quanto no caso de fundo plano.

Outra observação importante é que, para o SCR analisado, a presença da trincheira faz com que a região do topo se torne a mais crítica à fadiga do que a região do TDP.

5.3 Análise de Fadiga com Trincheira e Offsets Estáticos Fixos

A seguir, serão apresentados os resultados de vida à fadiga tomando um *offset* estático único para todos os estados de mar considerados. O *offset* adotado foi de 0,58% da lâmina d'água, correspondente ao estado de mar 3. Nesta situação, o TDP estático não muda de lugar e na dinâmica o SCR estaria sempre encaixado o máximo possível dentro da trincheira.

A Figura 5-14 apresenta os resultados de vida à fadiga ao longo do *riser* considerando o fundo plano, *i.e.*, sem a presença de trincheira. A Figura 5-15 e a Figura 5-16 apresentam detalhadamente os valores de vida à fadiga na região do TDP e do topo do SCR, respectivamente.

Neste caso, por não haver “espalhamento do dano”, os resultados de vida à fadiga são mais críticos que nos casos com *offsets* variáveis. Além disto, a influência da rigidez vertical do solo não é tão significativa quanto no caso anterior (*offset* variável). Entretanto, qualitativamente, tem-se a mesma conclusão que a vida à fadiga no TDP aumenta à medida que a rigidez do solo diminui e a região do topo não é influenciada pelas características do solo.

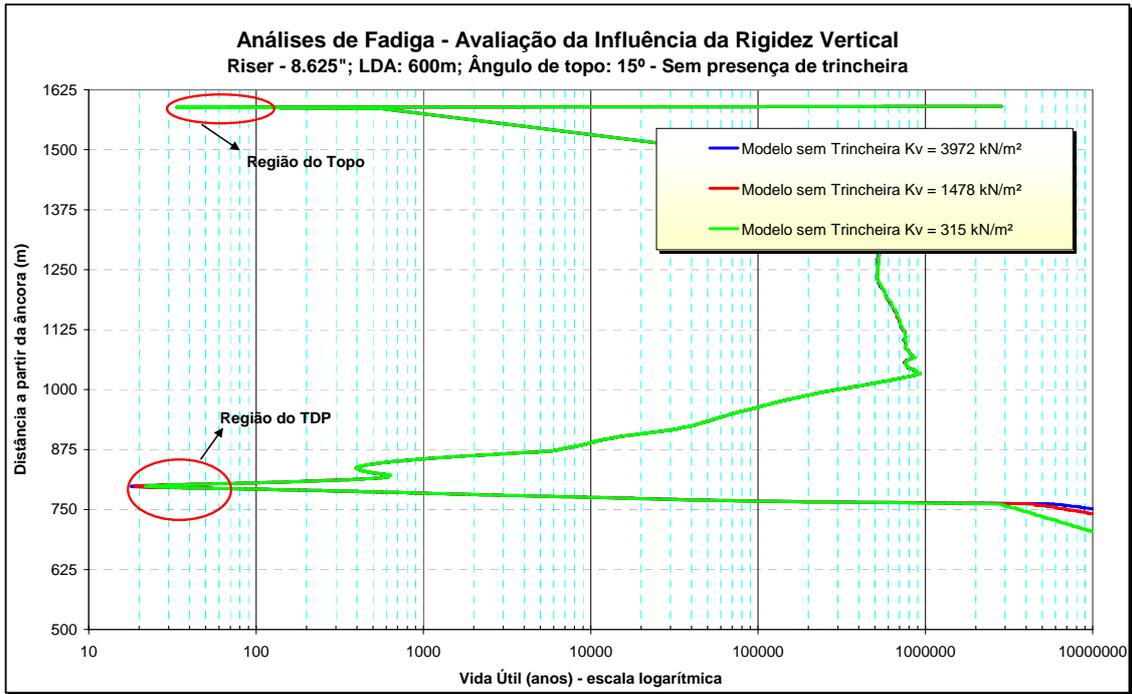


Figura 5-14 – Modelo sem trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da rigidez vertical do solo marinho (*offsets* estáticos iguais).

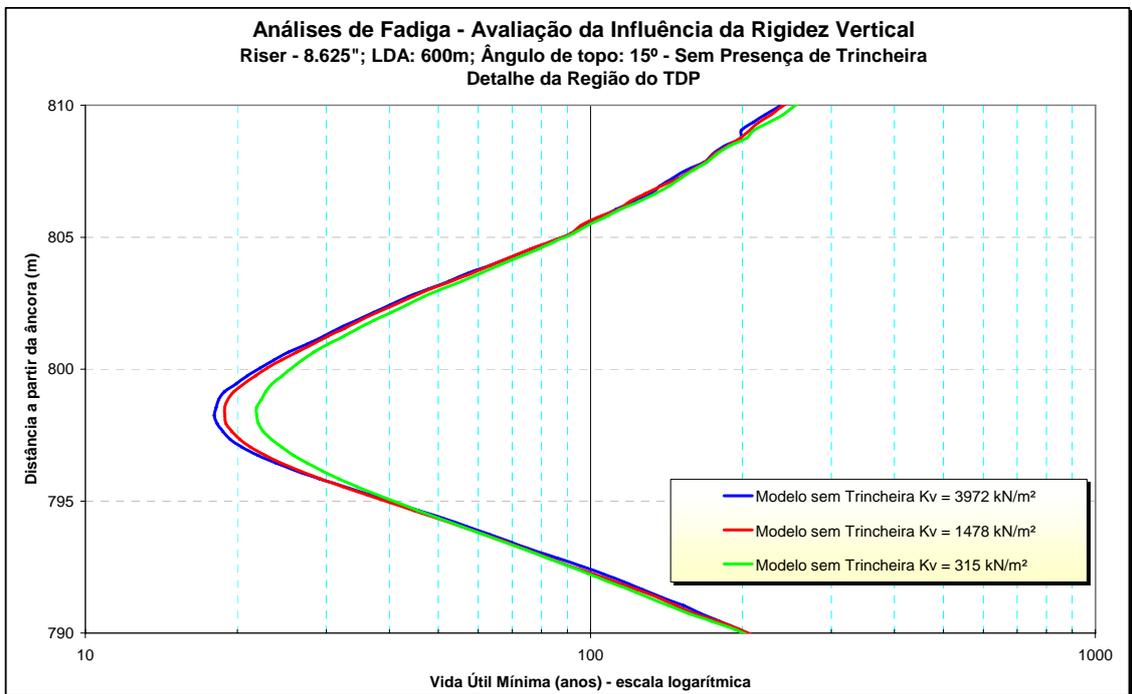


Figura 5-15 – Modelo sem presença de trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da rigidez vertical do solo marinho (*offsets* estáticos iguais).

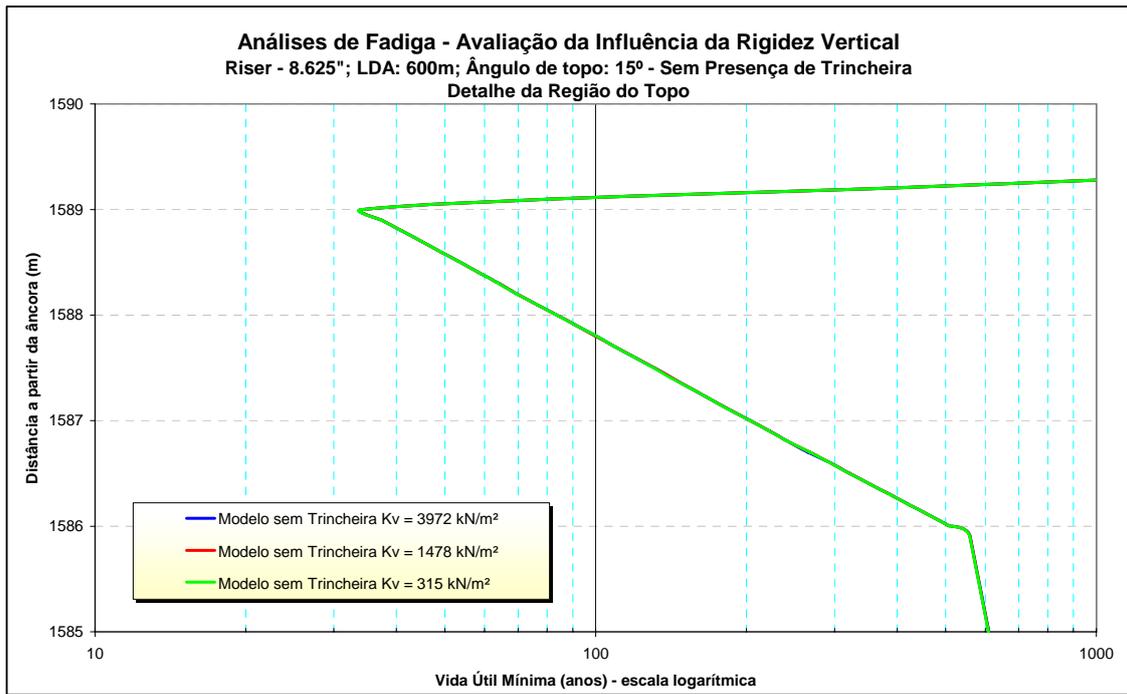


Figura 5-16 – Modelo sem trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do riser em função da rigidez vertical do solo marinho (*offsets* estáticos iguais).

Nas Figuras 5-17 a 5-19, são apresentados os resultados de vida à fadiga considerando a presença de uma trincheira (com diferentes profundidades) e um solo marinho mais rígido ($K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$). Resultados similares são apresentados nas Figuras 5-20 a 5-22 para um solo firme ($K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$) e para um solo marinho mole ($K_v = 315 \text{ kN/m}^2$) são apresentados nas Figuras 5-23 a 5-25.

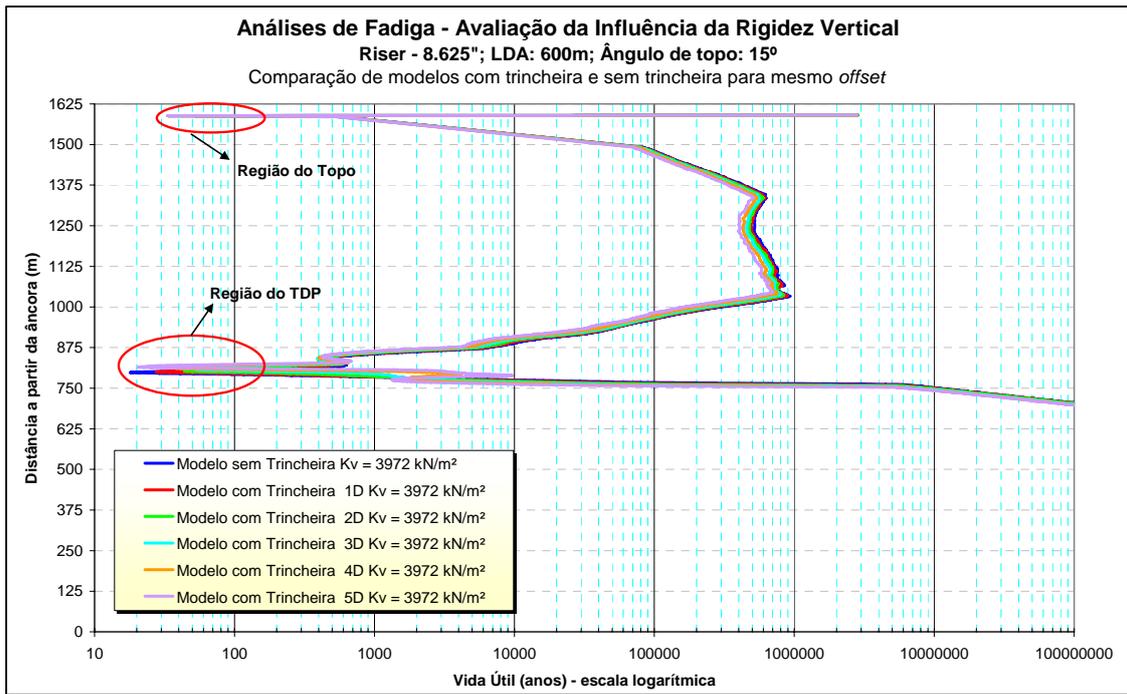


Figura 5-17 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$).

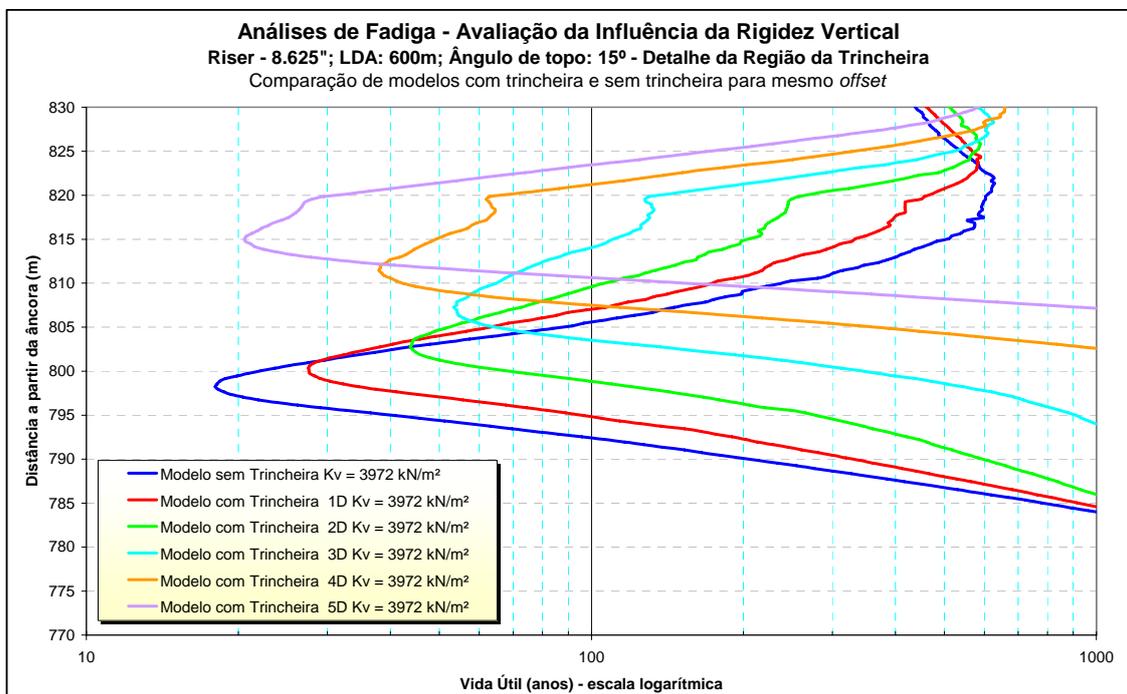


Figura 5-18 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$).

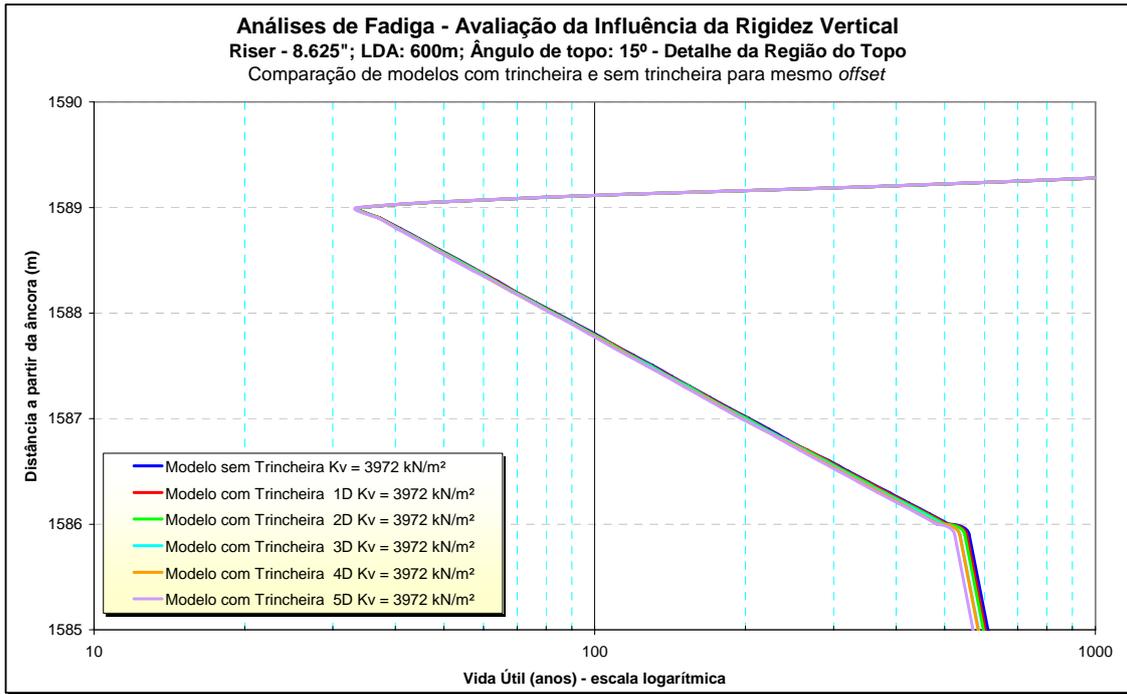


Figura 5-19 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topod o SCR em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 3972 \text{ kN/m}^2$).

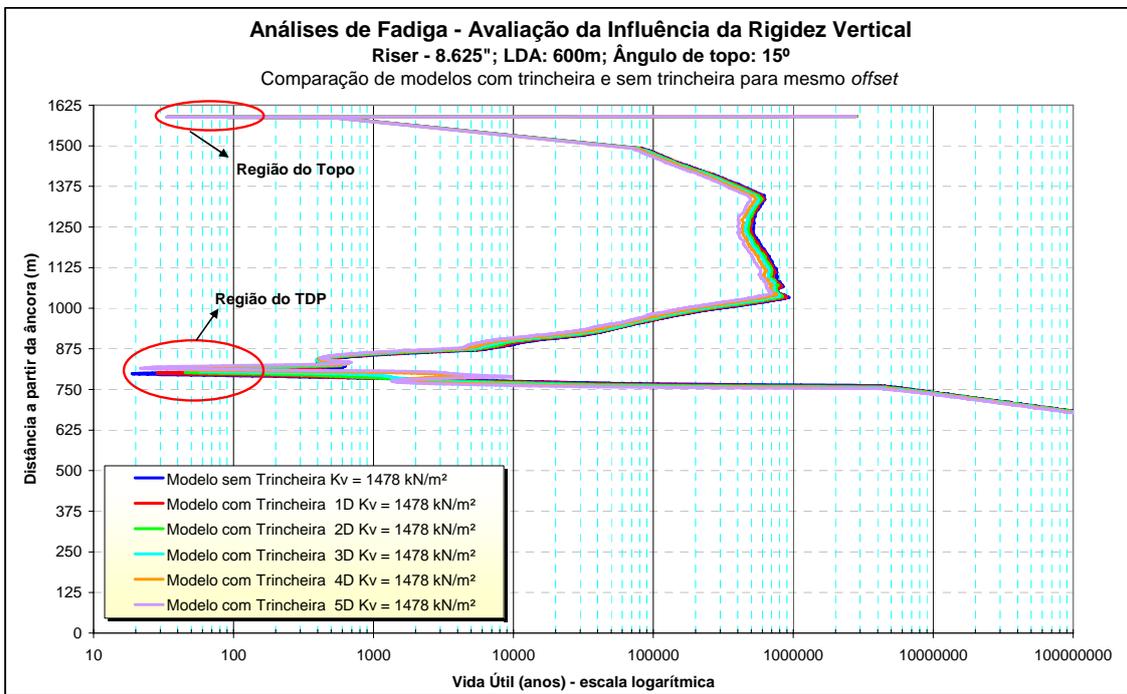


Figura 5-20 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$).

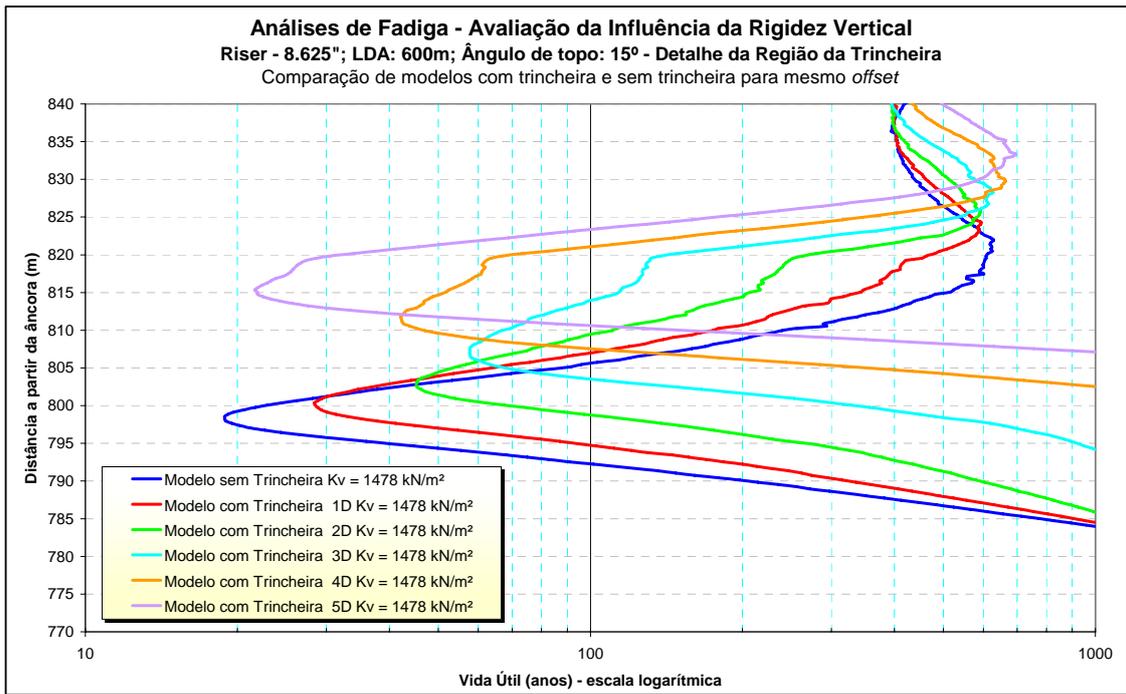


Figura 5-21 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$).

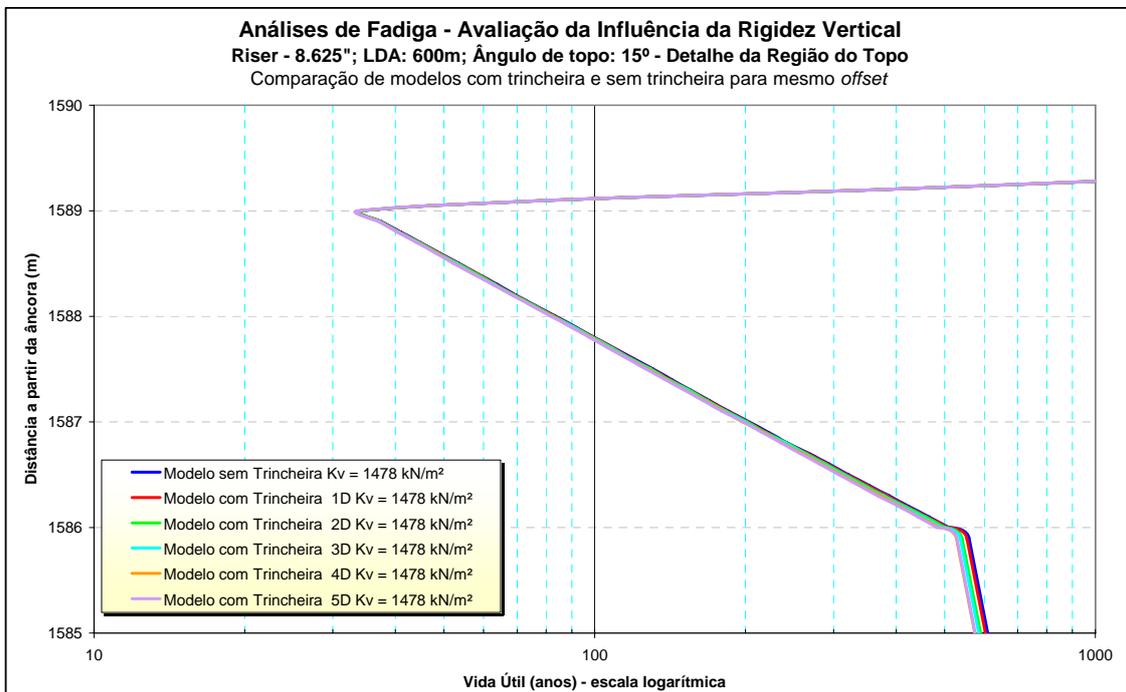


Figura 5-22 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 1478 \text{ kN/m}^2$).

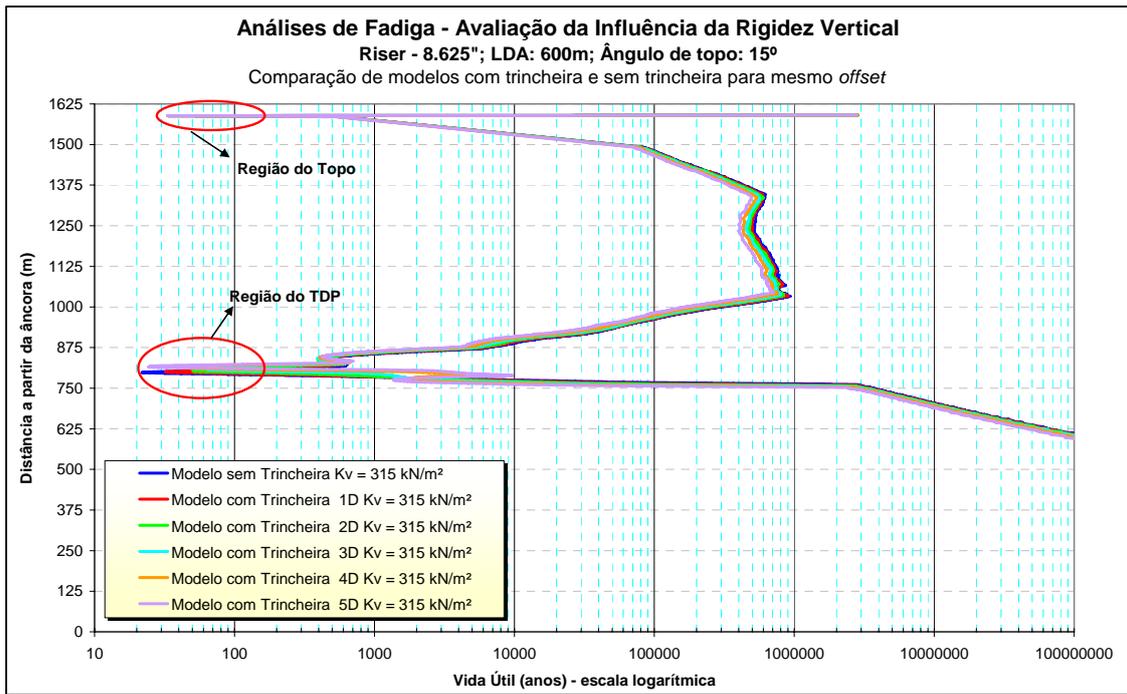


Figura 5-23 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga ao longo do SCR em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$).

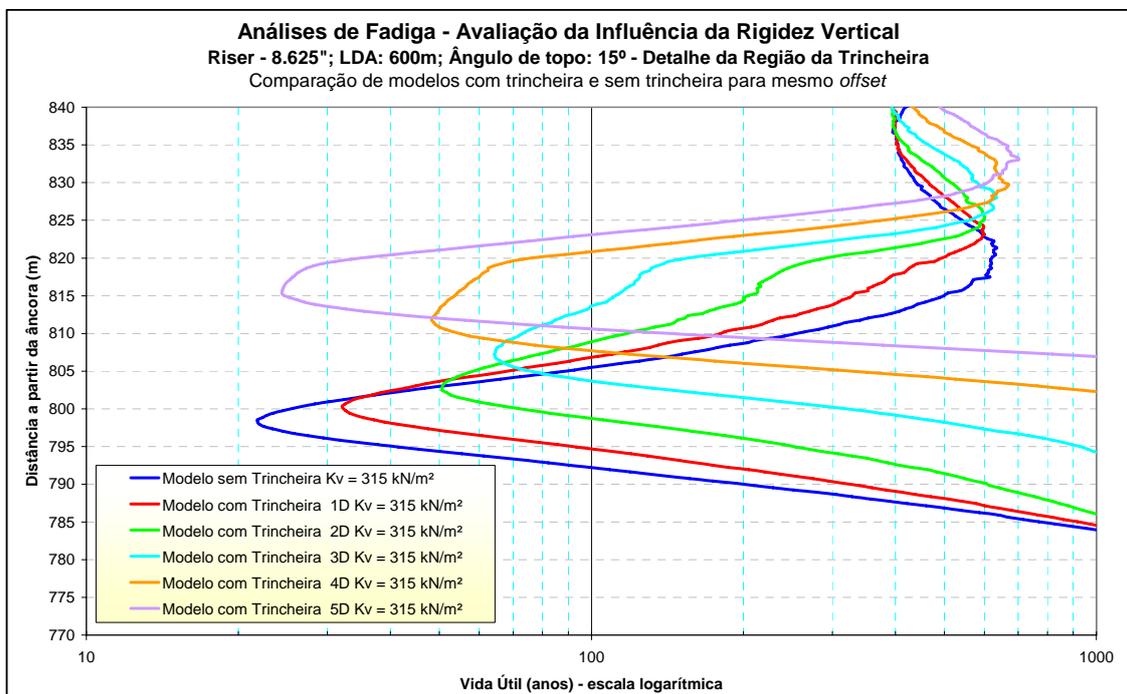


Figura 5-24 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do TDP em função da profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$).

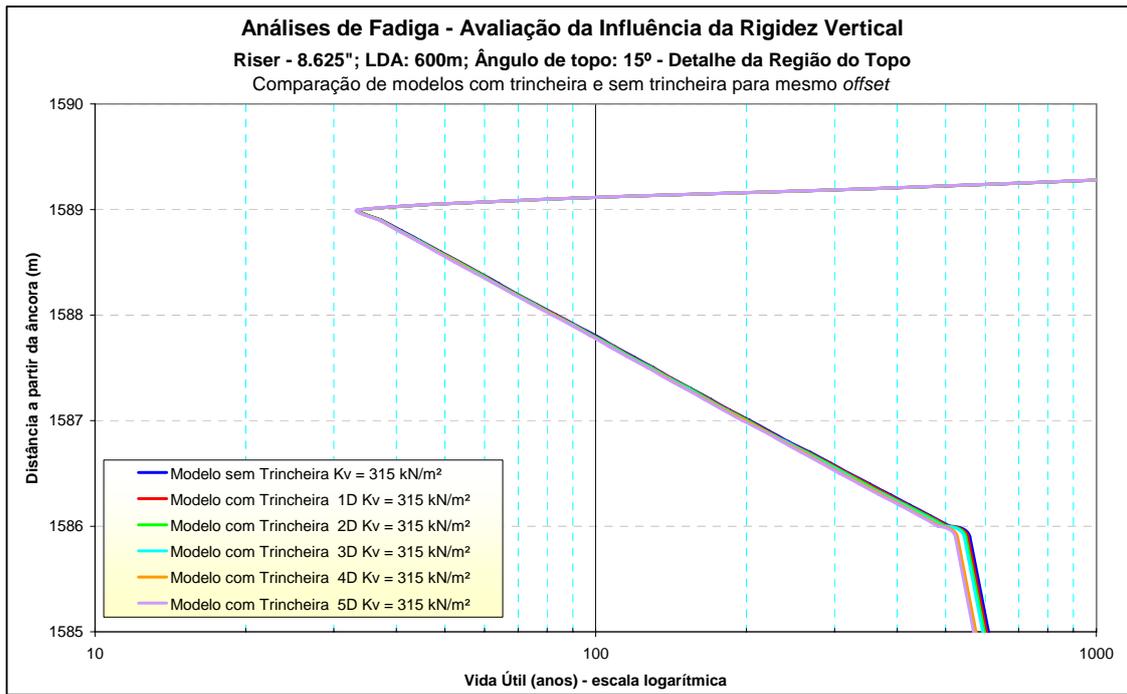


Figura 5-25 – Modelo com trincheira. Valores de vida à fadiga na região do topo do SCR em função profundidade da trincheira (*offsets* iguais e $K_v = 315 \text{ kN/m}^2$).

A Figura 5-26 apresenta um resumo considerando todos os casos de solo e profundidade de trincheira analisados quando foi tomado um mesmo *offset* estático para todos os estados de mar na análise de fadiga.

No presente caso, observa-se também que considerando um comprimento fixo para a trincheira, a profundidade da mesma tem influência nos resultados, sendo que para o caso 3D, têm-se os maiores valores de vida à fadiga do SCR na região do TDP. Porém, a vida útil observada considerando-se a presença de uma trincheira sempre foi superior ao caso sem trincheira. A região do topo não sofre influência nenhuma devido às variações de resistência do solo e presença de trincheira no TDP.

Qualitativamente, no caso de um *offset* fixo, foram observados os mesmos resultados obtidos para o caso com *offsets* específicos para cada estado de mar.

De um modo geral, pelos resultados apresentados, a presença de uma trincheira, estando o *riser* totalmente acomodado dentro dela ou não em todo o período de análise, trás benefício para a vida útil do SCR na região do TDP.

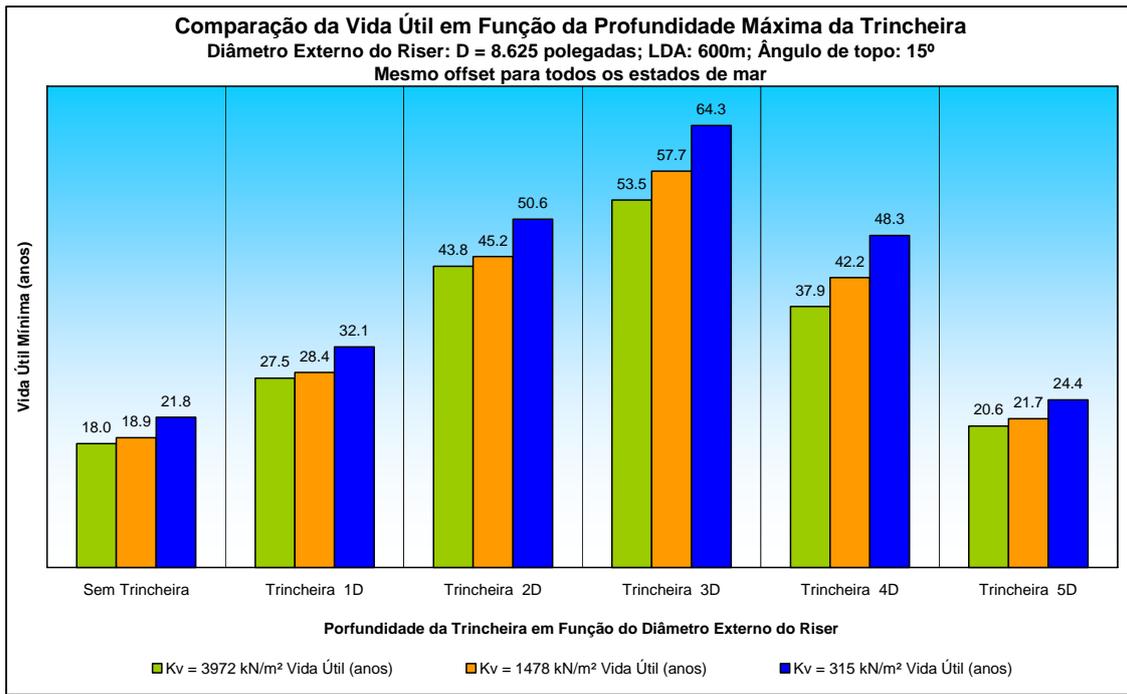


Figura 5-26 – Gráfico comparativo dos valores mínimos de vida útil na região do TDP.
 (Offset estático igual para todos os estados de mar)

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A interação solo-estrutura é um aspecto físico que não é simples de ser modelado numa análise global de um SCR, por exemplo. Normalmente, as reações do solo, tanto axial, lateral e vertical, são modeladas através de molas. Evidências observadas em inspeções *in loco* têm mostrado a presença de trincheiras na região do TDP de *risers* devido à movimentação dinâmica dos mesmos, induzidos normalmente pelos movimentos da unidade flutuante.

Neste trabalho, foi feita uma avaliação de alguns aspectos da interação solo-estrutura sobre o cálculo de fadiga de um SCR. Foram feitas, para um SCR de 8,625 polegadas instalado em uma semi-submersível em 600,0m de lâmina d'água, análises paramétricas objetivando conhecer a influência de diferentes tipos de solo argiloso (rígido, firme e mole) e da presença ou não de trincheira na região do TDP (com várias profundidades) sobre a sua vida útil à fadiga. As análises foram realizadas utilizando-se os programas ANFLEX [4] e POSFAL [5].

A forma geométrica de uma trincheira normalmente não é conhecida. Neste trabalho, a trincheira foi modelada a partir de uma função exponencial, sendo que o comprimento da mesma foi definido em função das variações do TDP estático (considerando fundo plano) nos estados de mar da análise de fadiga. A profundidade máxima da trincheira foi tomada arbitrariamente como sendo função do diâmetro externo do SCR, variando-se de uma até cinco vezes o valor do próprio diâmetro. Uma vez definida qual seria a forma da trincheira a ser adotada no modelo, foram feitas análises de fadiga considerando diferentes *offsets* estáticos para os diferentes estados de mar da análise de fadiga e um *offset* único para todos os casos.

Uma primeira observação a respeito dos resultados das análises feitas neste trabalho é que a vida à fadiga na região do topo do SCR não é afetada, nem pela variação de rigidez do solo marinho, nem pela presença de uma trincheira na região do TDP.

Outra observação é que rigidez vertical do solo tem influência sobre a vida útil do SCR na região do TDP. Independentemente da presença ou não de trincheira, a vida

útil aumenta à medida que a rigidez vertical do solo diminui. O aumento é maior no caso de um fundo plano.

Um dos resultados mais importantes do presente trabalho foi o de observar que, a presença de uma trincheira, independentemente do valor da rigidez do solo, conduz a uma vida útil maior na região do TDP quando comparado a um valor de vida útil obtido numa análise com fundo plano. No modelo de trincheira utilizado, que tem comprimento fixo, observa-se que a vida a fadiga teve um aumento mais significativo para uma profundidade da mesma entre 2D e 3D, diminuindo fora destas profundidades, porém, mantendo-se sempre maior que os valores de vida útil nas análises com fundo plano.

O acréscimo de vida à fadiga na região do TDP está diretamente relacionado com a variação de curvatura do *riser* nesta região. No caso de um fundo plano, as taxas de variação de curvatura em função das variações de movimento do flutuante são maiores que num fundo com trincheira e, conseqüentemente, as variações de tensões também são maiores. A partir do momento em que o *riser* está dentro de uma trincheira, ele já possui uma curvatura inicial na região do TDP que faz com que a taxa de variação de curvatura durante a movimentação dinâmica da análise seja menor e, portanto, a influência dos movimentos do *riser* no TDP será bastante atenuada em relação ao acúmulo de danos de fadiga.

Os resultados de análises apresentados neste trabalho, embora com muitas simplificações, apontam que a presença de uma trincheira na região do TDP pode ser um aspecto favorável na análise e projeto de SCRs. Isto sugere continuar com a investigação para contemplar outros aspectos que não foram abordados no presente estudo. Neste sentido, algumas sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- Avaliação de outros tipos de perfis de trincheiras (forma geométrica, comprimento, *etc.*);
- Inclusão dos efeitos de sucção nas análises;
- Inclusão de carregamento tridimensional e;
- Modelagem da reação lateral da parede da trincheira.
- Avaliação do efeito da presença de trincheiras e parâmetros de solo em SCRs conectados a outros tipos de unidades flutuantes;

- Realização de estudos do efeito de trincheira em lâminas d'água com maiores profundidades;
- Avaliação do efeito da presença de trincheiras e parâmetros de solo em SCRs com diferentes configurações, *e.g.*, Lazy Wave.
- Levar em consideração os efeitos dos movimentos de baixa frequência da unidade flutuante neste tipo de estudo.
- Análise da presença de trincheiras e variação dos parâmetros de solo em análises determinísticas com mar regular.

Uma grande contribuição na modelagem de trincheiras, principalmente com relação à forma geométrica das mesmas, seria a obtenção de resultados de inspeções por ROV em *risers* já instalados.

7. REFERÊNCIAS

- [1] SONG, R., KEKHA, B., SEBASTIAN, A., “*Independent Design Verification of SCRs for Ultra Deepwater IHF Development*”, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2006-92502, Hamburgo, Alemanha, 2006.

- [2] SHANKS, J. M., and MANSON, C., “*Review of SCR VIV fatigue assessment by modal methods*,” Deep & Ultra-Deepwater Riser Conference, Houston, Texas, October, 2001.

- [3] HAHN, G. D., SHANKS, J. M., and MANSON, C. “*An Assessment of Steel Catenary Riser Trenching*”. Deep Offshore Technology (DOT) International Conference, November 19-21, Marseille, France, 2003.

- [4] ANFLEX, *Manual de Utilização*, PETROBRAS, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, SUPEN, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.

- [5] POSFAL, *Manual do Usuário*, PETROBRAS, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, SUPEN, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

- [6] THETHI, R.; MOROS, T., *Soil Interaction Effects On Simple Catenary Riser Response*. Deepwater Pipeline & Riser Technology Conference, Houston, Texas, March 2001.

- [7] “STRIDE JIP – *TDP Global Dynamics Study*” – 1200-RPT-022, September, 2H Offshore Engineering, Woking, UK, 1999.

- [8] “CARISIMA – *CAtenary Riser Soil Interaction Model for global riser Analysis – JIP Proposal*” – T99-70.003, Marintek, Trondheim, Norway, March 1999.
- [9] POULOS, H. G. *Marine Geotechnics*. Londres, Unwin Hyman, 1988.
- [10] “STRIDE JIP – *TDP Parametric Study*” – 1200-RPT-027, 2H Offshore Engineering, Woking, UK, January 2000.
- [11] NAKHAE, A., ZHANG, J. “*Dynamic Interaction Between SCR and the Seabed*”. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE, San Diego, California, USA, 10-15 June, 2007.
- [12] AUBENY, C., BISCONTIN, G., ZHANG, J. “*Seafloor Interaction with Steel Catenary Riser*”. Final Report for MMS/OTRC Project # 1435-01-04-CA-35515, 2006.
- [13] BRIDGE, C., LAVER, K., CLUKEY, E., and EVANS, T. “*Steel Catenary Riser Touchdown Point Vertical Interaction Model*”. OTC 16628 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2004.
- [14] DUNLAP, W., BHOHANALA, R. “*Burial of Vertically Loaded Offshore Pipelines*”. Offshore Technology Conference, OTC 6375, Houston, Texas, 1990.
- [15] STRIDE JIP – “*Effects of Riser/Seabed Interaction on SCR's*”, 2H Offshore Engineering Ltd., Report N°: 1500-RPT-008, Rev. 2, 2002.

- [16] BRIDGE, C. D., HOWELLS, H. A., “*Observations and Modeling of Steel Catenary Riser Trenches*”, Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007.
- [17] LIMA, E. C. P.; ELLWANGER, G. B.; JACOB, B. P.; SAGRILO, L. V. S., *Tecnologias de Exploração de Petróleo*. Apostila desenvolvida para o MBP (Pós-Graduação Executiva em Petróleo), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- [18] American Society for Testing and Materials – ASTM, “*Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*”, New York, USA, Desig. E756, pp 779-785, 1993.
- [19] WILLEMS, EASLEY, ROLFE, Resistência dos Materiais, Editora Mc. Graw-Hill, capítulo 14, 1983.
- [20] SKEMPTON, A. W., “*The Bearing Capacity of Clays*”, Proceedings Building Research Congress, 1951.
- [21] 2H Offshore Engineering Ltd – “*Soil Stiffness Study*”, Report N° 1662-RPT-001, Rev 01, January, 2004.
- [22] MOURA BRANCO, CARLOS AUGUSTO GOMES DE, “*Mecânica dos Materiais*”, 3ª edição, Serviço de Educação Fundação Calouste Gulbenkian/Lisboa, capítulos 10 e 14, novembro de 1998.
- [23] MOURA BRANCO, CARLOS AUGUSTO GOMES DE; FERNANDES, ANTÓNIO AUGUSTO; CASTRO, PAULO MANUEL SALGADO TAVARES DE, “*Fadiga de Estruturas Soldadas*”, edição de Fundação Calouste Gulbenkian, Setembro de 1986.

- [24] MENDONÇA, S. M., *Análise Da Estrutura De Suportação De Um Riser Rígido Em Catenária Em Uma Plataforma Semi-Submersível*; Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Setembro de 2005.
- [25] DNV – Guidelines and Classification Notes – Vol. 2 - Fatigue Assessment of Ship Structures, Det Norske Veritas, Norway, 1998.
- [26] DNV-RP-C203 – Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures, Det Norske Veritas, Norway, October 2001.
- [27] WIRSCHING, P. H.; SHEHATA, A. M., *Fatigue Under Wide Band Random Stresses Using the Rain-Flow Method*. Journal of Engineering Materials and Technology, pp. 205-211, 1977.
- [28] FALTINSEN, O.M., *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge University, 1999.
- [29] CHAKRABARTI, S.K., *Nonlinear Methods in Offshore Engineering*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1990.
- [30] CHAKRABARTI, S.K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications, Wessex, England, 1987.
- [31] WAMIT - Wave Analysis MIT, “*WAMIT Theory Manual*”, Massachusetts, 1995.
- [32] DNV Recommended Practice RP-F 105, *Free Spanning Pipelines*, 2006.
- [33] American Society of Civil Engineers, “*Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*”, 2001.

- [34] PASSANO, E., “*The CARISIMA Trench Procedure*” Norwegian Marine Technology Research Institute, MARINTEK, Norway, 2001.
- [35] CARDOSO, C.O., “*Metodologia para Análise e Projeto de Dutos Submarinos Submetidos a Altas Pressões e Temperaturas via Aplicação do Método dos Elementos Finitos*”. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [36] VERLEY, R., LUND, K. M., “*A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Clay Soils*”, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE, Pages 1-7, 2000.

ANEXO - A

PLANILHA PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS TRINCHEIRAS

Para o cálculo dos parâmetros geométricos das trincheiras (comprimento e profundidade máxima) utilizou-se da seguinte marcha de cálculo utilizando o Mathcad:

Primeiramente são dados os parâmetros de entrada que são os seguintes:

- Diâmetro externo do *riser*;
- Comprimentos L_1 e L_2 como definido em 4.3;
- Constantes a e b dadas como “chute” inicial para posterior uso na interação da função ‘given’.

portanto,

$$a := 1 \quad b := \frac{0}{m^2}$$

$$D := 8.625 \text{ in} \quad D = 0.219075 \text{ m}$$

$$L_1 := 10 \text{ m} \quad L_2 := 90 \text{ m}$$

Com os parâmetros iniciais estabelecidos, substituem-se os mesmos na função do perfil da trincheira ($z(x) = a \cdot x \cdot e^{(-bx^2)}$) como definido em 4.3, obtendo-se assim os valores das constantes a e b .

Given

$$3D = a \cdot L_1 \cdot e^{(-b \cdot L_1^2)} \quad 0.05 \cdot 3D = a \cdot L_2 \cdot e^{(-b \cdot L_2^2)}$$

$$\text{resp} := \text{Find}(a, b) \quad a := \text{resp}_0 \quad b := \text{resp}_1$$

Obtidas as constantes a e b , obtém-se a forma ajustada ao caso específico de profundidade do perfil da trincheira que se deseja como, por exemplo, para a profundidade de três vezes o diâmetro externo do *riser*, fazendo-se ainda necessário um

ajuste final por tentativa e erro com um coeficiente para que se tenha exatamente na menor cota da trincheira a profundidade desejada. Portanto a forma final da função ajustada é a seguinte:

$$z(x) = 0,55672 \cdot a \cdot x \cdot e^{(-bx^2)}$$

Para verificar se o valor da cota mais profunda da trincheira é realmente o valor desejado, faz-se uso da derivada primeira e derivada segunda da função ajustada ao perfil da trincheira.

$$D_{1z}(x) := \frac{d}{dx} z(x) \quad D_{2z}(x) := \frac{d^2}{dx^2} z(x)$$

$$\text{root}\left(\frac{d}{dx} z(x), x, 0\text{m}, 70\text{m}\right) = 27.753724519 \text{ m}$$

$$z\left(\text{root}\left(\frac{d}{dx} z(x), x, 0\text{m}, 70\text{m}\right)\right) = -0.657225 \text{ m} \quad 3D = 0.657225 \text{ m}$$

$$D_{1z}\left(\text{root}\left(\frac{d}{dx} z(x), x, 0\text{m}, 70\text{m}\right)\right) = 9.996 \times 10^{-8}$$

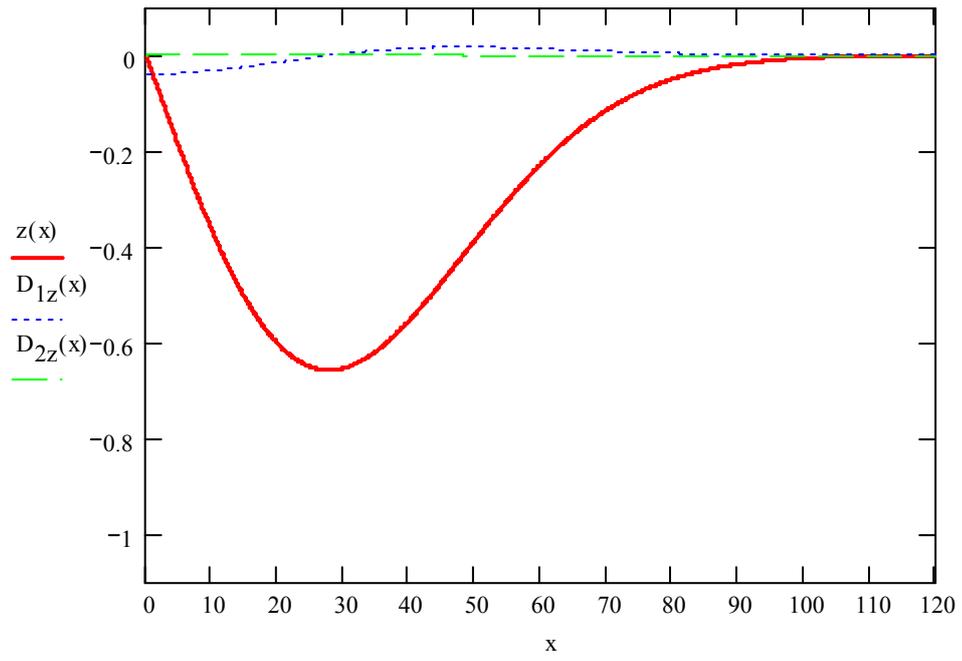
Com esses dados ainda é possível saber qual é o raio de curvatura na parte mais profunda do perfil de trincheira.

$$\text{root}\left(\frac{d^2}{dx^2} z(x), x, 0\text{m}, 70\text{m}\right) = 0 \text{ m} \quad \text{Raiz} := \text{root}\left(\frac{d}{dx} z(x), x, 0\text{m}, 70\text{m}\right)$$

$$\text{Curv}(x) := \frac{\frac{d^2}{dx^2} z(x)}{\left[1 + \left(\frac{d}{dx} z(x)\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{Curv}(\text{Raiz}) = 1.706 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$$

$$\text{Raio} := \frac{1}{\text{Curv}(\text{Raiz})} \quad \text{Raio} = 586 \text{ m}$$

Com isso, obtém-se a forma do perfil da trincheira visualizada no gráfico abaixo e também os pontos com os valores das cotas ao longo do perfil da trincheira necessários para a entrada de dados no programa ANFLEX.



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)