

DAGNÉ DE LA CARIDAD SUÑÉ CORDOVÉS

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE CABOS
UMBILICAIS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo

2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

DAGNÉ DE LA CARIDAD SUÑÉ CORDOVÉS

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE CABOS
UMBILICAIS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica e Sistemas
Mecânicos

Orientador:
Prof. Titular Dr. Edison Gonçalves

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Suñé Cordovés, Dagné de La Caridad
Análise de confiabilidade estrutural de cabos umbilicais
/ D.L.C. Suñé Cordovés. -- São Paulo, 2008.
134 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Estruturas (Confiabilidade) 2.Cabos umbilicais 3.Fadiga das estruturas 4.Escoamento 5.Tubos flexíveis I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

DEDICATÓRIA

A Deus!!!...

A meu esposo José Angel

A minha mãe Haydeé

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edison Gonçalves pela orientação neste trabalho, à paciência e a confiança depositada em mim.

Ao professor João Roberto Diego Petreche pelos seus ensinamentos, suas críticas e sugestões na elaboração deste trabalho.

Aos Doutores e amigos Cubanos, Francisco Palacios, José Hernández López (Pepe), Daniel Benitez Barrios e José Alberto Benitez, sem o auxílio deles teria sido impossível todo o desenvolvimento de softwares de cálculo empregados neste trabalho.

Ao estimado amigo e professor José Luis Valin Rivera pela amizade e ajuda demonstrada durante muitos anos.

A minha querida amiga Cristina por toda a ajuda prestada incondicionalmente, nos momentos que mais precisei dela nesta etapa da minha vida.

A meu amigo e professor Nelson Cárdenas Olivier por tudo o apoio e a preocupação pela realização deste trabalho.

Aos colegas e ex-colegas do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da Universidade de São Paulo (CENO-USP), Miguel Angel García Dominguez, Miguel Jaime Sandoval, Laércio “o Tigrão”, Antonio “Tonhão” e Gomes pela amizade e a ajuda prestada.

Ao colega Marcelo Acasio Rodrigues pela ajuda prestada na revisão da redação e na ortografia do texto da dissertação.

Ao pessoal do (Laboratório de Fenômenos Superficiais EPUSP), em especial à Dra. María Cristina Moré Farias e aos técnicos Jovânio e Leandro pela colaboração e apoio na realização dos ensaios.

A todos meus amigos, em especial a aqueles que nos momentos mais difíceis sempre acreditaram e nos apoiaram: Palacios, Henry, Giselle, Alain, Alberteris, Julio Cesar Ceballos Aya, Yoel, Carmen, Soraia, Mary, Deisy, Gladys, Mayra; ressaltando que vários dos nomes citados encontram-se muito longe daqui.

A todos os funcionários da Universidade de São Paulo, especialmente a Clarice e a Fátima da Biblioteca da Mecânica pela amizade e apoio brindados.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela ajuda financeira oferecida.

À instituição CENO-USP a qual fez possível a realização deste projeto.

A todas as pessoas e instituições que de uma forma ou outra tiveram a ver com o desenvolvimento deste trabalho. **A TODOS MUITO OBRIGADA!!!**

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	5
1.3	JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO	6
2	CARACTERÍSTICAS DOS CABOS UMBILICAIS.....	7
2.1	COMPONENTES E FUNÇÕES.....	7
2.2	GEOMETRIA DAS ARMADURAS	8
2.3	MATERIAL DAS ARMADURAS.....	9
2.3.1	Composição química.....	9
2.3.2	Microestrutura	10
2.3.3	Propriedades mecânicas.....	12
2.3.3.1	Ensaio de Tração.....	13
2.3.3.2	Resistência à Fadiga.....	16
3	MECANISMOS DE FALHA.....	18
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
3.2	ESCOAMENTO.....	20
3.3	FADIGA	22
3.3.1	Mecanismos de fadiga	26
3.3.2	Ciclos de Tensão	27
3.3.3	Curvas S-N	29
3.3.4	Dano Acumulado.....	32
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	33
4	MODELO PROPOSTO DE CONFIABILIDADE.....	35
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL.....	35
4.2	ANÁLISE DO CARREGAMENTO ATUANTE NA ESTRUTURA.....	38
4.3	ANÁLISE LOCAL DE TENSÕES.....	41
4.4	TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DAS TENSÕES.....	45
4.5	TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DO ESCOAMENTO.....	49
4.6	TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DA TENSÃO ALTERNADA CORRIGIDA	52
4.7	TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA	53
4.8	PROBABILIDADE DE FALHA	55
4.8.1	Considerações	55
4.8.2	Determinação da fdp da tensão estática e da fdp da tensão alternada corrigida a longo prazo	59
4.8.2.1	Determinação do deslocamento vertical do cabo umbilical por estado de mar	60
4.8.2.2	Modelo de elementos finitos do cabo umbilical	65
4.8.2.3	Formulação do modelo físico	65
5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	69
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	69
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO DE CONFIABILIDADE.....	69
6	CONCLUSÕES.....	73
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

ANEXO A	VALORES DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS	80
ANEXO B	PROGRAMAS MATLAB	82
ANEXO C	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (PROGRAMA EM ALGOR)	91
ANEXO D	GRÁFICOS DAS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE CURTO PRAZO DE PICOS E FLUTUAÇÕES DA TENSÃO	131
ANEXO E	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA PROBABILIDADE DE FALHA POR FADIGA E POR ESCOAMENTO	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Plataforma semi-submersível localizada na Bacia de Campos (http://www.clickmacae.com.br).....	2
Figura 1.2 - Cabos umbilicais usados nos sistemas de produção flutuantes	3
Figura 1.3 - Configurações utilizadas em <i>risers</i> e cabos umbilicais.....	4
Figura 1.4 - Secções típicas de um cabo umbilical	5
Figura 2.1 - Estrutura típica de um cabo umbilical (seção transversal).....	8
Figura 2.2 - Fotomicrografia correspondente à microestrutura do aço galvanizado em que se observam grãos de ferrita e de perlita	11
Figura 2.3 - Imagem de microscopia óptica da camada galvanizada de zinco (seção transversal da amostra)	12
Figura 2.4 - Arranjo experimental para ensaio de tração (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)	13
Figura 2.5 - Variáveis geométricas da seção da amostra (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)	14
Figura 2.6 - Gráfico de probabilidade Normal (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006).....	16
Figura 2.7 - Modelo clássico de curva S-N (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)	17
Figura 3.1 - Gráfico representativo de Tensão x Deformação do aço galvanizado (LÉPORE, 2003) ..	20
Figura 3.2 - Alongamento axial e contração lateral de duas barras carregadas à tração longitudinal: (a) seção retangular (POPOV,1978); (b) seção circular (as deformações foram exageradas)(CARDENAS, 2007)	21
Figura 3.3 - Ciclos de fadiga cíclicos a) Tensões alternadas puras b) Tensão média diferente de zero c) Aleatório (DUARTE DE LEMOS, 2005)	28
Figura 3.4 - Curvas S-N para diferentes materiais	30
Figura 3.5 - Critérios de falha por fadiga.....	32
Figura 3.6 - Curva S-N da regra Miner.....	33
Figura 4.1 - Representação das distribuições de probabilidade da resistência mecânica e da solitação externa (SOUZA, 2003; SUNDARARAJAN, 1995; THOFT-CHRISTENSEN, 1986)	37
Figura 4.2 - Geração de uma onda irregular a partir do espectro de ondas (HUGHES, 1988)	40
Figura 4.3 - Distribuição de tensões no arame.....	42
Figura 4.4 - Tensão atuante no arame devido à carga axial.....	43
Figura 4.5 - Diâmetro interno e externo da armadura de tração externa.....	43
Figura 4.6 - Exemplo de contagem de picos e flutuações sobre um histórico típico da força dinâmica de curto prazo, numa dada condição ambiental (PETRECHE, 1990).....	46
Figura 4.7 - Distribuição de densidade de probabilidade gama generalizada (SOUZA, 1994)	48
Figura 4.8 – Propriedades de escoamento e ruptura (ASM Handbook, 1978).....	49
Figura 4.9 - Função densidade de probabilidade do limite de escoamento.....	51
Figura 4.10 - Função densidade de probabilidade do limite de resistência à fadiga.....	55
Figura 4.11- Representação gráfica do cálculo da probabilidade de falha a partir de $f_{R,S}(R,S)$	58
Figura 4.12 - Esquema de trabalho para a determinação das funções de densidade de probabilidade da tensão estática $f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$ e da tensão alternada corrigida $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$	59
Figura 4.13 - Modelo de elementos finitos, onde se apresenta a distribuição do peso do cabo umbilical em cada nó, o deslocamento vertical assumido como carregamento e as condições de contorno consideradas na modelagem	67
Figura 4.14 - Distribuição de tensões considerando a carga axial mais o efeito da flexão (Pa).....	68
Figura 5.1 - Metodologia de aplicação do modelo de confiabilidade.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química de aço empregado nas armaduras de tração.....	10
Tabela 2.2 - Limite de resistência mecânica do material.....	15
Tabela 3.1 - Razões de tensões.....	31
Tabela 4.1 - Valores de tensão de escoamento do material.....	50
Tabela 4.2 - Valores do limite de resistência à fadiga do material.....	54
Tabela 4.3 - Resposta em frequência para o movimento vertical da plataforma.....	61
Tabela 4.4 - Estados de mar da Bacia de Campos (PETRECHE, 1990).....	62
Tabela 4.5 - Ângulos de fase aleatória (θ).....	63
Tabela 4.6 - Valores do deslocamento no tempo para cada estado de mar $h(t,k)$	64
Tabela 4.7 - Propriedades do aço.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
fdp	Função de densidade de probabilidade
HDPE	Polietileno de alta densidade
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MEF	Método de elementos finitos
RAO	Operador de resposta da amplitude
SPF	Sistema de produção flutuante

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
$a_{(w,k)}$	Amplitude dos harmônicos que compõem o deslocamento da plataforma para cada estado de mar k
A	Área da seção transversal das armaduras
A_a	Área da seção transversal do arame
A_0	Área da seção inicial
a_i	Amplitude de onda
c	Parâmetro da função gama generalizada
C.S	Coefficiente de segurança
D	Diâmetro externo da armadura
d	Diâmetro interno da armadura
F	Força
$f(S_e)$	Fdp da tensão de escoamento
$f(S_f)$	Fdp do limite de resistência à fadiga do material
$f_{(\sigma_a)_{ck}}(\sigma_a)$	Fdp de flutuações de curto prazo em cada estado de mar k
$f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)$	Fdp de flutuações de longo prazo (tensão alternada corrigida)
F_a	Força aplicada na direção normal no arame
$f_R(\cdot)$	Função densidade de probabilidade da resistência mecânica
$F_R(\cdot)$	Função distribuição acumulada da resistência mecânica
$f_S(\cdot)$	Função densidade de probabilidade da solicitação externa
$F_S(\cdot)$	Função distribuição acumulada da solicitação externa
F_t	Força axial no cabo umbilical
$f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$	Fdp de picos de longo prazo (tensão estática)
$f_{\hat{\sigma}_{estk}}(\hat{\sigma}_{est})$	Fdp de picos de curto prazo em cada estado de mar k
$h(t,k)$	Deslocamento vertical no tempo da plataforma para cada estado de mar k
$H_{1/3}$	Média do terço das maiores alturas de ondas = altura significativa das ondas para cada estado de mar k
H_s	Altura significativa das ondas = média do terço das maiores alturas de ondas
m	Parâmetro da função gama generalizada
M_f	Momento fletor
m_n	Momento de ordem n do espectro de energia
N	Número de ciclos
n_a	Número total de arames

n_{Ak}	Número de flutuações da tensão observadas durante o tempo de simulação no estado de mar k
n_k	Número de picos, acima da tensão média observados durante o tempo de simulação no estado de mar k
P_{Bk}	Probabilidade de ocorrência do estado de mar k
$P_{F \text{ Escoamento}}$	Probabilidade de que ocorra falha por escoamento
$P_{F \text{ Fadiga}}$	Probabilidade de que ocorra falha por fadiga
P_f	Probabilidade de falha
$P(A)$	Probabilidade de falha por escoamento
$P(B)$	Probabilidade de falha por fadiga mecânica
$(P(A \cup B))$	Probabilidade de que ocorra falha por fadiga e/ou falha por escoamento
R	Resistência mecânica
R_c	Confiabilidade ou probabilidade de sobrevivência
R_N	Resistência nominal
S	Solicitação externa
$S(w,k)$	Função de densidade espectral da onda do mar para cada estado de mar k
S_e	Limite de escoamento
S_f	Limite de resistência à fadiga
$S_h(w,k)$	Função de densidade espectral do deslocamento na plataforma para cada estado de mar k
S_N	Solicitação nominal
S_u	Limite de resistência mecânica do material
T	Tempo de simulação
T_k	Tempo de simulação da tensão no estado de mar k
T_z	Período médio das ondas
w_i	Frequência cíclica
Z	Função de desempenho
Λ	Parâmetro da função gama generalizada
α	Ângulo de disposição do arame no cabo umbilical
Γ	Função gama generalizada
ν	Coefficiente de Poisson
$(\sigma_a)_c$	Tensão alternada corrigida
$\sigma(t)$	Histórico de tensões no tempo
$\sigma(t,k)$	Tensões no tempo para cada estado de mar k
$\phi(w_i)$	Operador de resposta da amplitude (response amplitude operator, RAO)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
σ_a	Tensão alternada
σ_{eq}	Tensão equivalente de Von Mises

σ_{est}	Tensão estática
σ_f	Tensão normal devido à flexão no cabo umbilical
$\theta_{i,k}$	Ângulo de fase aleatória distribuído uniformemente entre $0-2\pi$ para cada estado de mar k
ε_L	Deformação longitudinal
σ_m	Tensão média
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_r	Intervalo de variação de tensões
σ_t	Tensão normal devido à tração no cabo umbilical
ε_T	Deformação transversal
δw_i	Largura da faixa de frequência ao redor de cada componente

RESUMO

O presente trabalho propõe um modelo para avaliar a confiabilidade estrutural do cabo umbilical, levando em consideração os mecanismos de falha por escoamento e por fadiga mecânica. Esta análise é focada na avaliação estrutural das armaduras metálicas, dado que estes elementos suportam quase toda a carga à tração e limitam as deformações axiais da estrutura sem prejudicar significativamente a flexibilidade; desconsidera-se, portanto, o efeito estrutural do núcleo electro-óptico e das camadas polimérica interna e externa.

Para esta finalidade são consideradas as tensões originadas pelos carregamentos das ondas do mar atuantes no cabo umbilical durante sua vida em serviço (plataforma semi-submersível GVA 4500 que opera na Bacia de Campos numa lâmina d' água de 1000 m), assim como a geometria e as propriedades mecânicas das armaduras de tração utilizadas nos umbilicais dessas plataformas.

Através da formulação de um modelo do cabo umbilical feito pelo Método dos Elementos Finitos determinou-se o histórico de tensões atuantes na estrutura, foram estimadas as funções de densidade de probabilidade da tensão estática e da tensão alternada corrigida para curto e longo prazo, as quais caracterizam o carregamento atuante provocado pelas ondas do mar.

A caracterização do material é alcançada através de análise química e ensaios de tração. Finalmente, a metodologia proposta, que considera os mecanismos de falha por escoamento e por fadiga mecânica é implementada na prática.

Palavras chave: Confiabilidade. Cabo umbilical. Armadura de tração. Falha. Fadiga. Escoamento.

ABSTRACT

A model to evaluate the structural reliability of the umbilical cable, taking into accounts the failure mechanism for yield strength and mechanical fatigue is proposed in this work. This analysis is focused on the structural evaluation of the metallic armors, given that these elements almost support the whole tensile load and they limit the axial deformations of the structure without harming the flexibility significantly, therefore, the structural effect of the electro-optical nucleus and the internal and external polymeric layers are not considered.

For this purpose, the tensions originated by the loading of the waves of the active sea in the umbilical during its service life are considered (semi-submergible platform GVA 4500 that operates in “*Bacia de Campos*” into 1000 meters water depth), as well as the geometry and the mechanical properties of the tensile armors used in the umbilical of this platform.

Through the formulation of a model for the umbilical cable, developed by the Finite Elements Method, the sequence of active tensions in the structure was determined and then the functions of density of probability of the static tension and of the alternate tension corrected for short and long period were estimated, which characterize the active loading caused by the waves of the sea.

The characterization of the material is achieved through chemical analysis and tensile test. Finally, the proposed methodology, which considers the failure mechanisms by yields and mechanical fatigue is implemented in practice.

Keywords: Reliability. Umbilical cable. Tensile armor. Failure. Fatigue. Yield.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A engenharia oceânica estuda todos os aspectos referentes à prospecção e exploração de petróleo no mar. A mesma tem-se mostrado como uma área de desenvolvimento onde, muito freqüentemente, os empreendimentos adiantam-se à fronteira do conhecimento e da tecnologia. Particularmente durante os últimos trinta anos, com a descoberta de grandes jazidas de petróleo e gás em águas de grande profundidade, conceitos e técnicas até então considerados como seguros e convencionais tiveram que ser reavaliados, adaptados ou até mesmo inovados integralmente.

As primeiras atividades de exploração de petróleo no Brasil iniciaram-se em 1968, na Bacia de Sergipe, mais precisamente no Campo de Guaricema, situado em uma lâmina d'água (profundidade marítima) de cerca de 30 m, na costa do Estado de Sergipe, região nordeste. Para o desenvolvimento na Bacia de Sergipe aplicaram-se as técnicas convencionais da época para campos de pequeno a médio porte: plataformas fixas e rígidas de aço, cravadas no solo através de estacas, projetadas somente para produção e teste de poços, denominadas jaquetas.

Já em 1974 houve a primeira descoberta de petróleo na Bacia de Campos, atualmente a principal província petrolífera do Brasil, localizada na parte marítima do Estado do Rio de Janeiro. Entretanto, a atividade de produção somente começou em agosto de 1977, na segunda descoberta, com o Campo de Enchova, em lâmina d'água de 120 m. Até 1977 as atividades de produção de petróleo no Brasil limitaram-se às áreas do nordeste brasileiro em lâminas d'água de até 50 m (DE OLIVEIRA, 2004).

Desde 1984, a Bacia de Campos começou a mostrar seu completo potencial, com a descoberta de campos gigantes, cujas profundidades variam entre 1000 m e 2000 m (águas profundas) e acima de 2000 m (águas ultraprofundas).

Das plataformas fixas de produção, técnica e economicamente viáveis até profundidades de cerca de 500 m, passou-se às plataformas semi-submersíveis, na Figura 1.1 é apresentada uma foto de uma plataforma semi-submersível localizada na Bacia de Campos.



Figura 1.1 - Plataforma semi-submersível localizada na Bacia de Campos
(<http://www.clickmacae.com.br>)

Recentemente, começou o emprego de Sistemas de Produção Flutuantes (SPF), como se ilustra na Figura 1.2. Estes sistemas são constituídos por plataformas de produção, navios convertidos para o mesmo fim e subsistemas, tais como, cabos umbilicais, *risers* de produção flexíveis e não flexíveis, linhas de ancoragem, entre outros.

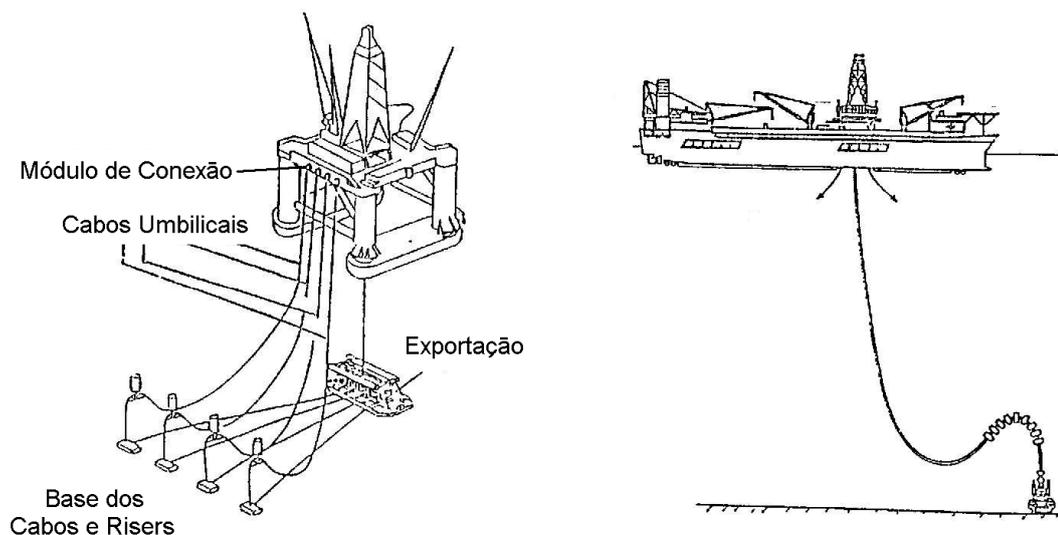


Figura 1.2 - Cabos umbilicais usados nos sistemas de produção flutuantes

A introdução de linhas flexíveis tem sido cada vez mais freqüente, iniciando-se na década de setenta (70) e estabelecendo-se como alternativa usual e segura na década de noventa (90). Os cabos submarinos eletro-ópticos ou cabos umbilicais, tema específico deste trabalho, possuem também ampla utilização. Tais linhas são estruturalmente similares aos tubos flexíveis. Ambos são elementos de fundamental importância nas atividades de exploração petrolífera, particularmente em águas de grandes profundidades.

Os cabos umbilicais empregados nos sistemas de produção flutuantes (SPF) para a exploração de petróleo, constituem de fato uma estrutura muito complexa, desde o ponto de vista de sua geometria e materiais, que interagindo fazem com que o cabo envie sinais de controle e forneça energia elétrica ao conjunto de válvulas (Árvore de Natal), que se encontra instalado na cabeça do poço de petróleo no fundo do mar.

O cabo, uma vez instalado consta de duas zonas que estão sobre solicitações muito diferentes. A primeira é aquela parte que fica suspensa desde a unidade de produção até o fundo do mar, e a segunda é aquela parte do cabo que se encontra assentada no leito marinho. Na primeira zona as cargas atuantes são de natureza dinâmica, originadas pelas ondas, correnteza, ventos, movimentações do sistema de produção flutuante; já na segunda zona as cargas atuantes são quase sempre estáticas. Pode-se acrescentar que na zona onde o cabo permanece suspenso, é

onde se evidencia a diversidade e complexidade dos carregamentos a que estão submetidos os umbilicais durante sua vida em serviço.

Os cabos umbilicais são fabricados por material composto de baixa rigidez flexional. A resistência ao movimento vertical é muito menor, pois a configuração de equilíbrio destas estruturas e do tipo catenária livre.

O *riser* flexível em forma de catenária livre, só é empregado em águas relativamente rasas. Em águas moderadamente profundas se emprega uma bóia intermediária com o objetivo de atenuar o peso do comprimento suspenso do *riser*, estabelecendo-se uma dupla catenária *lazy-s*. Já em águas profundas o uso de bóias vinculadas ao fundo do mar se torna inviável, e se empregam então flutuadores de espuma colocados ao longo do comprimento do *riser*. Estas configurações se chamariam: *lazy wave* e *steep wave*.

Na Figura 1.3, são ilustradas as configurações empregadas em *risers* e umbilicais.

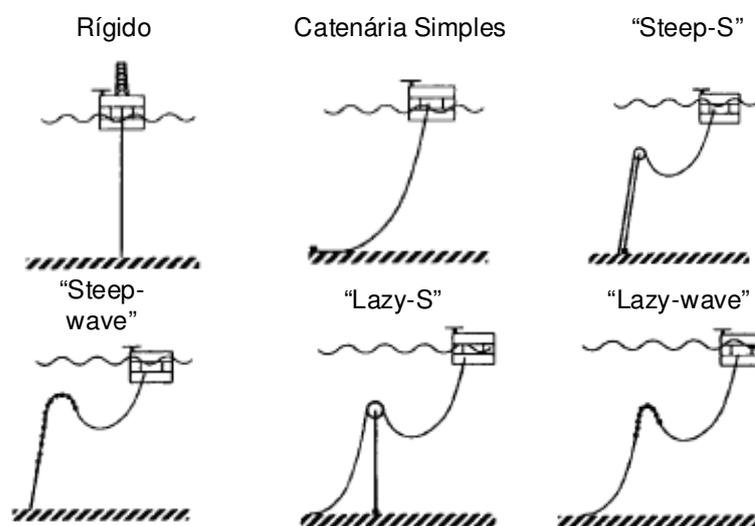


Figura 1.3 - Configurações utilizadas em *risers* e cabos umbilicais

A concepção estrutural dos cabos umbilicais é o resultado da superposição de camadas plásticas, que proporcionam estanqueidade interna e externa, e de camadas metálicas com caráter estrutural, além de um núcleo funcional, onde seus componentes podem ser mangueiras para comando hidráulico, cabos elétricos para transmitir energia, cabos ópticos encarregados pelo envio de sinais e linhas de injeção química. A ação conjunta desta diversidade de materiais deve atender todas as especificações de funcionamento para as quais o cabo foi projetado. Os materiais

usualmente empregados na fabricação de cabos umbilicais são: polímeros, metais e algumas vezes fibras cerâmicas para aplicações especiais, variando segundo o fabricante.

Na Figura 1.4, são apresentadas diferentes seções típicas empregadas em cabos umbilicais.

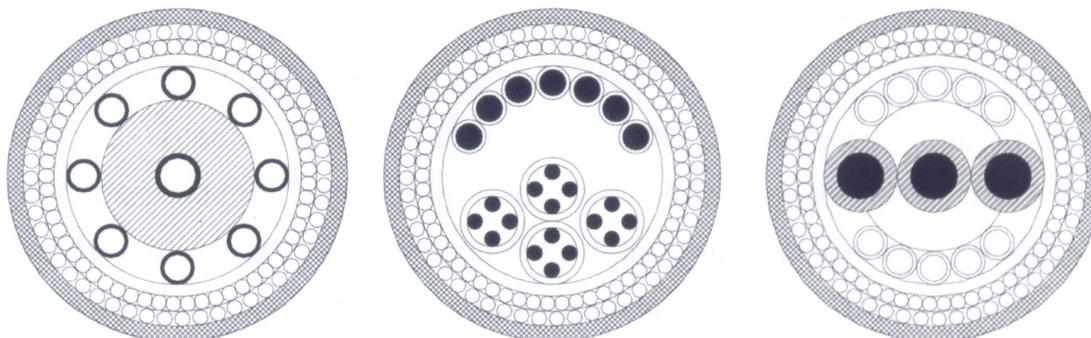


Figura 1.4 - Seções típicas de um cabo umbilical

O fato dessas estruturas encontrarem-se submetidas à ação de ondas, ventos, e correntezas durante seu tempo de utilização, provoca deslocamentos laterais das plataformas e movimentações ao longo da linha, o que provoca uma série de esforços de tração, flexão e torção, implicando na ocorrência de diversas falhas de caráter estrutural.

Os cabos submarinos eletro-ópticos, como parte integrante do sistema de exploração de petróleo, têm sua vida útil estimada entre 20 e 30 anos (PETRECHE,1990). Devido aos grandes prejuízos que podem ocorrer, econômicos, ecológicos e mesmo de vidas humanas, tem-se desenvolvido trabalhos e ações objetivas para reduzir a probabilidade de falha destas estruturas, através do emprego de considerações sobre confiabilidade estrutural, pelo que estas estruturas devem ser avaliadas antes de ser colocadas em funcionamento.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um modelo para estimar o nível de confiabilidade estrutural em cabos umbilicais empregados em operações de engenharia oceânica, sob a influência dos mecanismos de falha por escoamento e

fadiga mecânica. Através da formulação de um modelo do cabo umbilical feito pelo Método dos Elementos Finitos será determinado o histórico de tensões atuantes na estrutura para estimar as funções de densidade de probabilidade da tensão estática e da tensão alternada corrigida para curto e longo prazo, as quais caracterizam as tensões originadas pelo carregamento atuante provocado pelas ondas do mar; assim como as funções de densidade de probabilidade da tensão de escoamento e o limite de resistência a fadiga que caracterizam o material objeto de estudo, sendo neste caso o aço carbono galvanizado.

Esta análise de confiabilidade é conduzida através da avaliação estrutural apenas das armaduras metálicas, uma vez que estes elementos suportam quase toda a carga a tração e limitam as deformações axiais da estrutura sem prejudicar significativamente a flexibilidade; desconsidera-se, portanto, o efeito estrutural do núcleo electro-óptico e das camadas polimérica interna e externa.

1.3 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

Existe a necessidade cada vez mais crescente do emprego de cabos umbilicais em águas cada vez mais profundas. Recentemente foi feita a descoberta de petróleo no campo de Tupi na Bacia de Santos, o que deverá requerer o aumento da utilização destas estruturas pela indústria petrolífera do Brasil.

Com a análise de todos estes fatos, pode-se chegar à conclusão da real importância que assume a confiabilidade destas estruturas, devido a que as condições ambientais e de operação serão cada vez mais complexas, pelo que a previsão da sua falha torna-se de extrema importância. Pode-se acrescentar que o colapso dos cabos umbilicais ocasiona enormes perdas econômicas, devido à paralisação das atividades de prospecção de petróleo.

2 CARACTERÍSTICAS DOS CABOS UMBILICAIS

2.1 COMPONENTES E FUNÇÕES

O cabo umbilical, como comentado no capítulo introdutório deste trabalho, têm a função de transmitir sinais de controle e alimentar com energia os sistemas de válvulas instalados nas cabeças dos poços petrolíferos no fundo do mar. Sua estrutura, composta por materiais metálicos e poliméricos, garante sustentabilidade e flexibilidade mecânica e possibilita uma fabricação contínua de longos segmentos de cabos. A principal vantagem, é que eles apresentam maior tolerância ao movimento lateral dos sistemas flutuantes de produção. Como desvantagem, tem-se a dificuldade de fabricação, pois envolvem a utilização de diferentes geometrias e materiais.

A estrutura dos cabos umbilicais varia de fabricante para fabricante, possuindo diferenças nas concepções construtivas. No entanto, pode-se dizer que a estrutura típica de um cabo umbilical, apresentada na Figura 2.1, é composta basicamente de uma superposição de camadas plásticas e metálicas de caráter estrutural, cabos de cobre, os quais têm como função conduzir energia elétrica e um cabo de fibra óptica responsável pela transmissão de sinais. A seguir descrevem-se as diferentes partes do cabo umbilical.

- Camada Plástica Externa: É fabricada de polietileno de alta densidade (*High Density Polyethylene* - HDPE) normalmente extrudada sobre a armadura de tração externa, o que proporciona estanqueidade ao cabo, proteção à estrutura interna contra danos de corrosão, abrasão e impacto, além de ajudar a manter o resto dos componentes do cabo na posição correta, assegurando a forma cilíndrica deste (CÁRDENAS; GONÇALVES, 2004);
- Camada Plástica Interna: É fabricada de polietileno de baixa densidade (*Low Density Polyethylene* - LDPE) e extrudada sobre o elastômero que atua como isolante e protege os condutores de cobre e da fibra óptica. Esta camada é capaz de transmitir os esforços das pressões de contato entre a camada metálica e o elastômero adjacente. (CÁRDENAS, 2002; LÉPORE, 2003);

- Núcleo eletro-óptico: Composto por cabos de cobre encarregados de transmitir energia, um cabo de fibra óptica com a função de transmitir sinais e por um enchimento de elastômero de propileno - etileno que atua como isolante para as outras camadas do cabo. (CÁRDENAS, 2002; LÉPORE, 2003);
- Armaduras de tração: O material empregado na fabricação dos arames que compõem a armadura é o aço carbono galvanizado. As armaduras de tração normalmente são compostas por um número par (normalmente dois) de camadas de arames. Esses arames de seção circular ou retangular são enrolados de forma helicoidal em sentidos opostos. As armaduras de tração interna e externa têm como principais funções resistir quase toda a carga de tração axial e pressão externa, oferecendo também rigidez à torção ao cabo umbilical, pelo que constitui de fato o elemento estrutural preponderante na estrutura do cabo. (WITZ; TAN, 1992), (TORRES, 1996), (LÉPORE, 2003).
- As partes componentes desta estrutura são as seguintes:

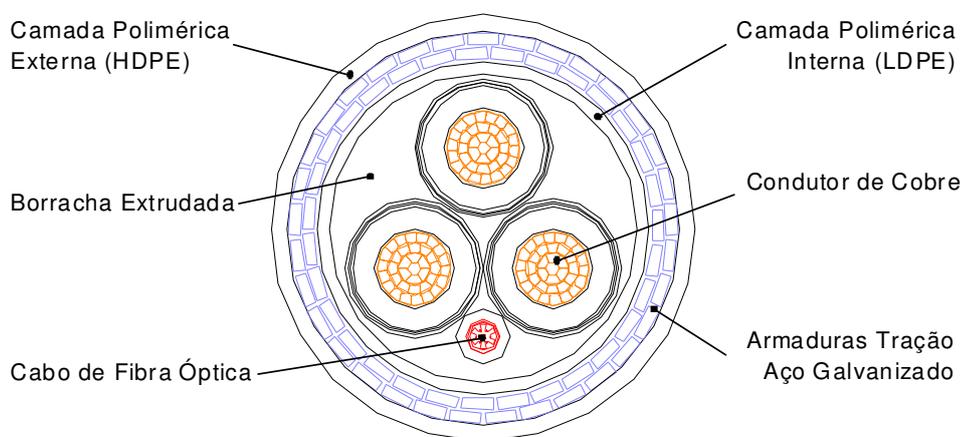


Figura 2.1 - Estrutura típica de um cabo umbilical (seção transversal)

2.2 GEOMETRIA DAS ARMADURAS

As armaduras são normalmente constituídas de duas camadas superpostas de arame, conformadas helicoidalmente na direção longitudinal dos umbilicais. A seção transversal do arame empregado em umbilicais, normalmente é de seção retangular.

O ângulo de assentamento dessas armaduras determina o balanço entre a rigidez axial e torcional do tubo. Portanto, os fatores que influenciam e determinam a

escolha de um determinado ângulo de assentamento das armaduras são sua rigidez à tração e à torção.

O ângulo entre as helicoidais dos arames das duas camadas geralmente varia entre 15° e 55° (VIGNOLES, 2002). Nota-se que os umbilicais cujas armaduras de tração têm ângulos de assentamento menores (15° a 24°) apresentam uma maior resistência à tração com um peso total relativamente menor, porém com baixa resistência à torção. Já os arames enrolados em ângulos maiores, constituem camadas com pouca resistência e rigidez à tração, embora limitem a torção e resistam melhor à pressão externa. (LÉPORE, 2003).

2.3 MATERIAL DAS ARMADURAS

Os arames das armaduras de tração podem ser fabricados em aço, de baixo, médio ou alto teor de carbono. Outros materiais, como as fibras de vidro, fibra de carbono e aramida, já foram testados como alternativas de utilização.

Na conformação desses arames durante a fabricação das armaduras, um razoável trabalho a frio é introduzido no material por meio do equipamento industrial denominado “*armoring machine*”, de maneira que o valor do limite de escoamento é aproximado ao valor máximo da tensão de ruptura. Tal fato é comprovado quando são realizados testes laboratoriais de caracterização de amostras destes arames (LÉPORE, 2003). O material para este tipo de aplicação deve apresentar algumas características básicas, como: alto limite de ruptura (acima de 800 MPa) e baixa deformação na ruptura (menos de 20%) (LÉPORE, 2003).

2.3.1 Composição química

A composição química dos materiais das armaduras pode ser determinada com a utilização de espectrômetro de absorção atômica e analisador de carbono e enxofre. Determinaram-se os teores de carbono, silício, manganês, níquel, cromo, molibdênio, cobre, fósforo e enxofre. Na Tabela 2.1, apresenta a composição química do aço empregado na fabricação das armaduras de tração. Esses valores foram comparados com os da literatura (www.matweb.com; ASM Handbook, 1993).

Tabela 2.1 - Composição química de aço empregado nas armaduras de tração

Elemento	Aço-carbono	
	Armadura Interna	Armadura Externa
C	0,66	0,68
Si	0,18	0,19
Mn	0,64	0,65
Ni	0,02	0,02
Cr	0,01	0,01
Mo	0,01	0,01
Cu	0,06	0,06
P	0,015	0,013
S	0,013	0,014

Com os resultados obtidos da análise química foram feitas pesquisas com o objetivo de encontrar um aço com propriedades químicas similares as obtidas.

Através do www.matweb.com, se comprovou que um provável aço empregado na fabricação das armaduras de tração pode ser o aço carbono AISI 1060, cuja composição química é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição química do aço AISI 1060 (www.matweb.com)

Elemento	Composição Química (% massa)
C	0,550 - 0,660
Fe	0,9835 - 0,9885
Mn	0,600 - 0,900
P	< 0,0400
S	< 0,0500

2.3.2 Microestrutura

Com o intuito de determinar a microestrutura do aço galvanizado utilizado nas armaduras de tração, foi realizada sua caracterização metalográfica, que consistiu da seqüência de etapas seguinte:

- 1 - Cortes com cortadeira metalográfica de precisão (modelo ISOMET 4000, marca Buehler) para a obtenção dos corpos-de-prova. Foram obtidas amostras para análise tanto na superfície quanto na direção transversal.
- 2 - Embutimento a quente com resina termoplástica (Isofast, marca Struers).
- 3 - Lixamento inicial (grosseiro) com lixa de granulometria 320 de carvão de silício (SiC), seguido de lixamento fino com solução diamantada de 9 μm .
- 4 - Polimento inicial com solução diamantada de 3 μm e polimento final com sílica coloidal 0,25 μm . O lixamento e polimento foram realizados em lixadeira e politriz (modelo APL-2, marca Arotec), utilizando discos abrasivos e panos de polimento magnéticos (Magnetic Disc System – MD system, marca Struers).
- 5 - Ataque químico com Nital 2% para revelar a microestrutura do material.
- 6 - Observação da microestrutura utilizando microscópio óptico BX60M Olympus.

Na Figura 2.2, apresenta-se a microestrutura do aço galvanizado. Observa-se a presença de uma matriz predominantemente perlítica, com poucas áreas de ferrita o que denota a presença de um aço hipoeutetóide (ferrita + perlita), de médio ou alto teor de carbono.

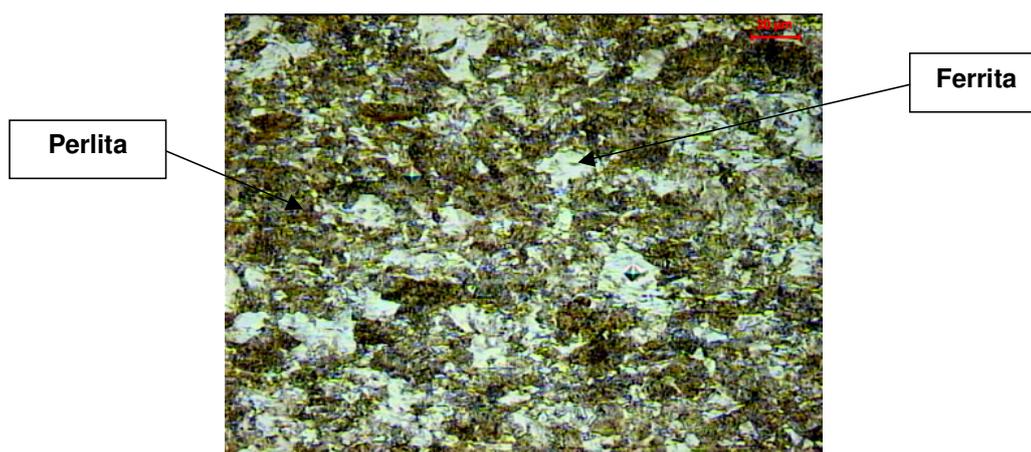


Figura 2.2 - Fotomicrografia correspondente à microestrutura do aço galvanizado em que se observam grãos de ferrita e de perlita

A análise metalográfica mostrou que o aço galvanizado apresenta um banho de zinco, cuja espessura, determinada com o auxílio do microscópio óptico, teve um valor de 40 μm , aproximadamente, conforme pode ser observado na Figura 2.3.

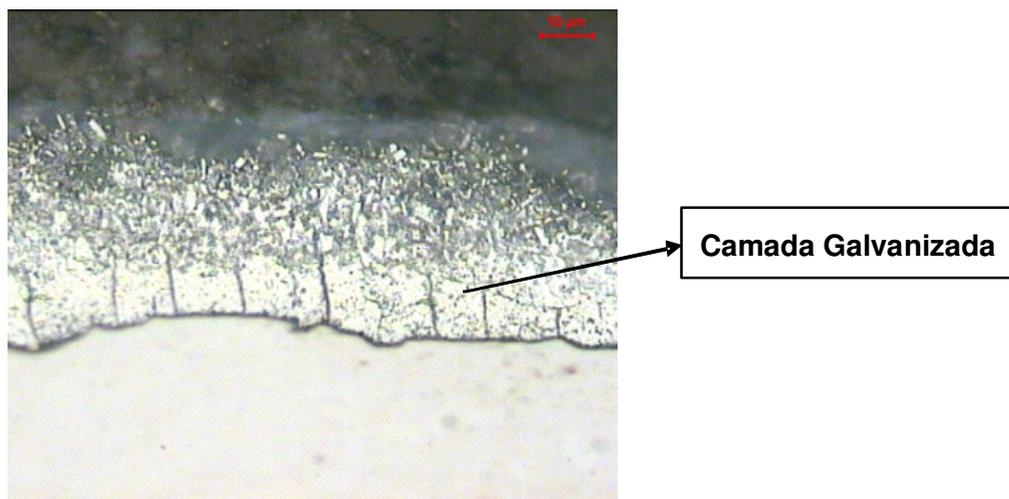


Figura 2.3 - Imagem de microscopia óptica da camada galvanizada de zinco (seção transversal da amostra)

A camada galvanizada de zinco neste aço têm a função de proteção contra a corrosão. Segundo PANOSSIAN (2003), este revestimento foi obtido, provavelmente, pelo processo contínuo de imersão a quente. Esse processo é o mais utilizado para a aplicação de revestimentos de zinco, principalmente em peças destinadas à exposição em ambientes externos e para tubulações de condução de água, onde o aspecto decorativo não é um requisito importante. É um processo que permite revestir peças relativamente pequenas e peças grandes.

De modo geral, camadas galvanizadas são obtidas por processos de eletrodeposição, imersão a quente e aspersão térmica. No processo de eletrodeposição, podem ser obtidas espessuras de camada de até 40 µm. Já no processo de imersão a quente não-contínuo podem ser obtidas espessuras acima de 35 µm, enquanto que para o processo contínuo a espessura dos revestimentos encontra-se entre 4,2 µm e 54,6 µm. Para o processo de aspersão térmica os valores de espessura encontram-se entre 50 µm e 200 µm. A partir desta informação e do resultado experimental obtido neste trabalho, considerou-se que a camada galvanizada foi obtida, provavelmente, pelo processo de imersão a quente, contínuo.

2.3.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas relevantes ao presente estudo, são aquelas associadas ao limite de resistência do aço, ao escoamento e limite de resistência à fadiga

mecânica. Estas propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios de tração.

2.3.3.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração considerados neste estudo foram realizados por HOUGAZ e GONÇALVES (2006). Os mesmos ensaiaram cinquenta (50) amostras de arames das armaduras, onde os corpos-de-prova preparados tiveram 300 mm de comprimento.

As garras da máquina de ensaio de tração prendem 40 mm em suas extremidades deixando livre para a tração 220 mm, tal como se apresenta na Figura 2.4.

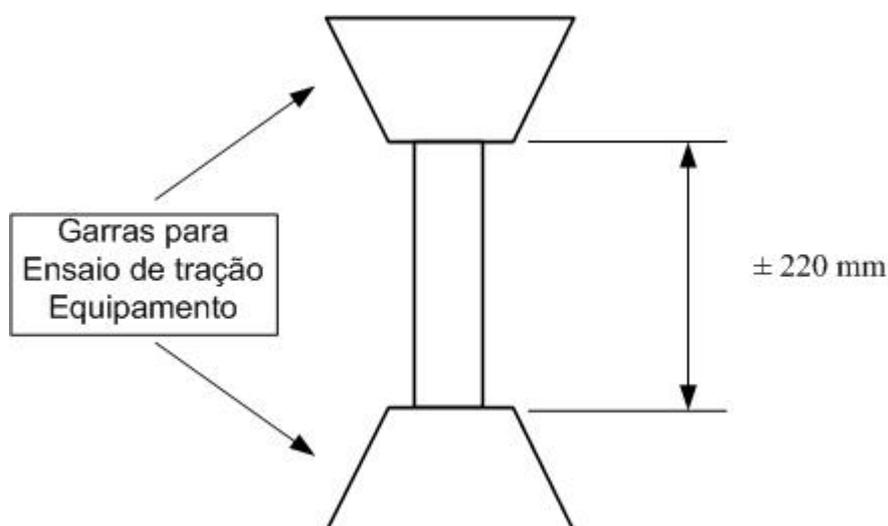


Figura 2.4 - Arranjo experimental para ensaio de tração (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)

A secção transversal do arame pode ser observada na Figura 2.5. A avaliação da área dessa secção transversal é realizada através de medições de sua largura e espessura ao longo de 6 pontos do seu comprimento. Na Tabela A 1 do ANEXO A, são apresentados os valores das variáveis geométricas das cinquenta (50) amostras utilizadas.

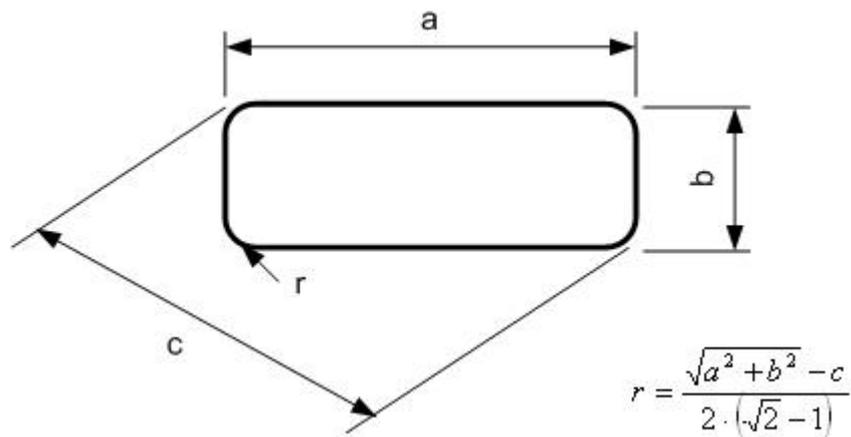


Figura 2.5 - Variáveis geométricas da seção da amostra (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)

O equipamento utilizado para executar o ensaio de tração, fornece a força para calcular a tensão de engenharia, a qual é definida por:

$$S_u = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

onde:

S_u : limite de resistência mecânica do material

F : força aplicada na amostra

A_0 : área inicial da seção transversal

Os resultados do limite de resistência obtidos por HOUGAZ e GONÇALVES (2006), através dos ensaios de tração são apresentados na Tabela 2.2 para cada uma das 50 amostras ensaiadas

Tabela 2.2 - Limite de resistência mecânica do material

Amostra	S_u (Pa)	Amostra	S_u (Pa)	Amostra	S_u (Pa)
1	$944,21 \times 10^6$	18	$921,61 \times 10^6$	35	$898,30 \times 10^6$
2	$967,97 \times 10^6$	19	$963,93 \times 10^6$	36	$899,38 \times 10^6$
3	$953,56 \times 10^6$	20	$1049,03 \times 10^6$	37	$1027,89 \times 10^6$
4	$891,86 \times 10^6$	21	$935,30 \times 10^6$	38	$897,23 \times 10^6$
5	$981,18 \times 10^6$	22	$973,42 \times 10^6$	39	$902,82 \times 10^6$
6	$897,07 \times 10^6$	23	$937,00 \times 10^6$	40	$906,71 \times 10^6$
7	$996,62 \times 10^6$	24	$891,98 \times 10^6$	41	$918,33 \times 10^6$
8	$1013,98 \times 10^6$	25	$942,28 \times 10^6$	42	$960,55 \times 10^6$
9	$975,41 \times 10^6$	26	$986,47 \times 10^6$	43	$1031,87 \times 10^6$
10	$1034,30 \times 10^6$	27	$882,43 \times 10^6$	44	$927,81 \times 10^6$
11	$920,81 \times 10^6$	28	$915,62 \times 10^6$	45	$972,31 \times 10^6$
12	$967,45 \times 10^6$	29	$950,64 \times 10^6$	46	$967,26 \times 10^6$
13	$948,53 \times 10^6$	30	$909,55 \times 10^6$	47	$993,33 \times 10^6$
14	$911,71 \times 10^6$	31	$961,04 \times 10^6$	48	$940,03 \times 10^6$
15	$1031,14 \times 10^6$	32	$940,14 \times 10^6$	49	$964,85 \times 10^6$
16	$908,43 \times 10^6$	33	$872,87 \times 10^6$	50	$926,05 \times 10^6$
17	$873,73 \times 10^6$	34	$949,21 \times 10^6$	-	-

Os valores do limite de resistência mecânica do material são apresentados de forma gráfica na Figura 2.6.

Na Figura 2.6 observa-se que a série de pontos apresenta uma distribuição bem próxima à de uma linha reta no gráfico normal, pelo que é possível concluir que o limite de resistência do material pode ser representado por uma distribuição normal. Porém, os parâmetros da distribuição vêm a ser: média: 950×10^6 Pa e desvio padrão: $49,5 \times 10^6$ Pa. No entanto, o coeficiente de variação é aproximadamente de 5,2%, o qual se ajusta ao valor estabelecido que oscila entre 5% e 10%, segundo (HOUGAZ;GONÇALVES, 2006).

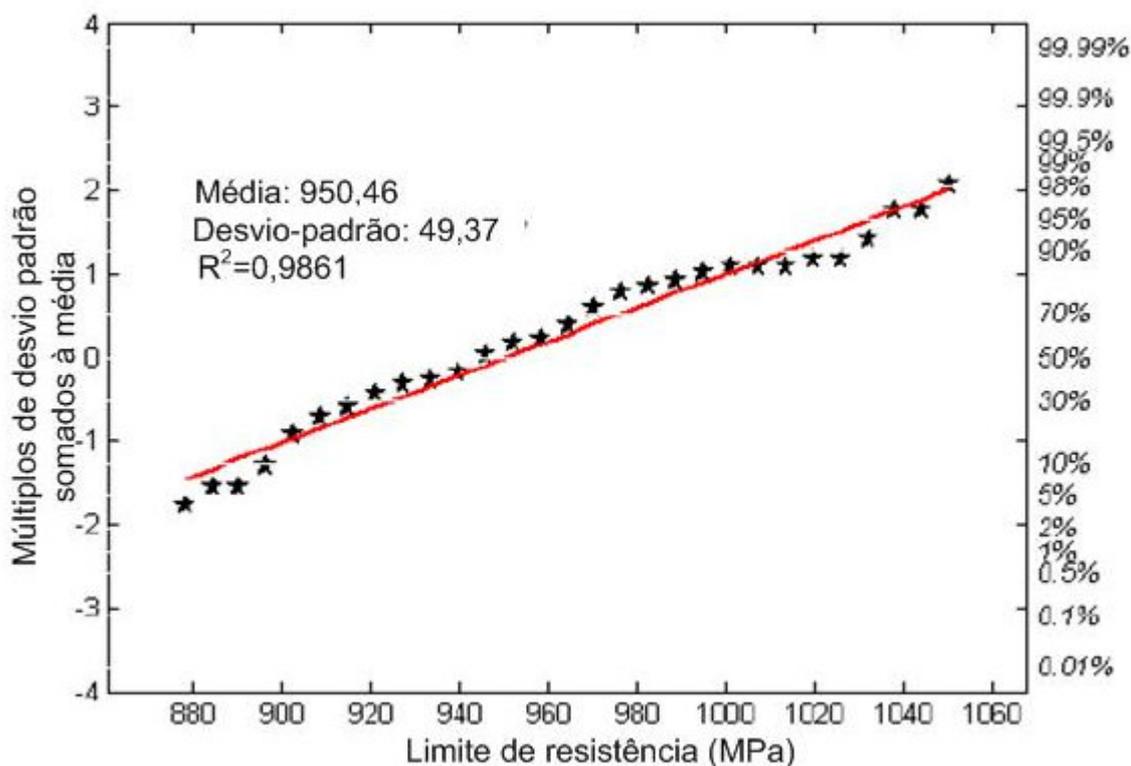


Figura 2.6 - Gráfico de probabilidade Normal (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)

2.3.3.2 Resistência à Fadiga

A resistência à fadiga foi estimada através dos resultados obtidos do limite de resistência mecânica do material alcançados no ensaio de tração.

O modelo de fadiga considerado assume que a curva S-N é uma linha reta num gráfico Log-Log como se ilustra na Figura 2.7, onde S é amplitude de tensão alternada e N o número de ciclos que vai provocar a falha por fadiga para uma determinada amplitude de tensão alternada S ou resistência à fadiga S_f .

O modelo sugere que quando:

- $N=10^3$ então $S=0.9S_u$, onde S_u é o limite de resistência mecânica do material.
- $N=N_f$ e $S=S_f$, onde S_f é o limite de resistência à fadiga do material e N_f o tempo de vida à fadiga.

Notando que o modelo clássico da curva S-N é uma linha reta, é possível escrever então:

$$\ln(\sigma_a)_c = \alpha \ln(N) + \beta \quad (2.2)$$

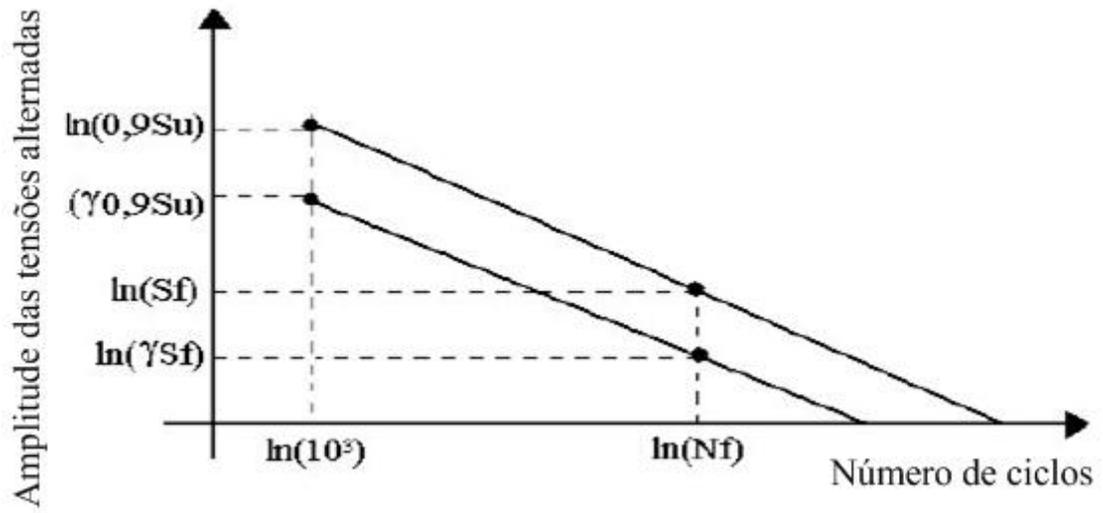


Figura 2.7 - Modelo clássico de curva S-N (HOUGAZ; GONÇALVES, 2006)

3 MECANISMOS DE FALHA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os cabos umbilicais são compostos por diversos materiais, o que faz com que sua estrutura seja heterogênea; uma interação de diversos materiais como metais, polímeros, fibras têxteis entre outros. O fato destas interações ocorrerem ocasiona falhas tais como: fadiga, fratura, desgaste e degradação dos diversos materiais devido às diferentes solicitações mecânicas e aos agentes externos do ambiente marinho, como água salgada, radiações ultravioleta, temperaturas, oxigênio, etc, que incidem nestes materiais.

Durante sua vida em serviço os cabos umbilicais encontram-se submetidos às condições de ambiente marinho segundo discutido anteriormente, ou seja, ondas e correntes marinhas que originam deslocamentos laterais das plataformas e movimentação das linhas ao longo do comprimento dos mesmos, ocasionando sobre estes uma combinação de esforços de tração, flexão, torção e pressão externa. Tais esforços podem ocasionar diferentes falhas estruturais, como por exemplo: fratura das partes metálicas e poliméricas.

Os tipos de falhas nos umbilicais podem ser considerados iguais as que ocorrem em poliductos¹ instalados no fundo do mar (SOUZA, 1994), supondo um vaso de parede fina sob ação de pressão externa. Sendo então, que o cabo umbilical pode ser considerado como uma tubulação submarina, algumas formas de falhas seriam originadas por fenômenos como escoamento, fadiga mecânica, sobrecargas, impacto, corrosão, desgaste por atrito entre as diferentes camadas, entre outros (CÁRDENAS, 2007).

Os mecanismos de falha comentados anteriormente provocam efeitos indesejáveis no funcionamento desta estrutura. A seguir são mencionadas algumas das razões que podem ocasionar o colapso dos umbilicais: (CÁRDENAS, 2007; LÉPORE, 2003):

¹ Ductos simples para transporte de múltiplos fluidos em percursos de longa distancia e grandes tempos de viagem.

- Ruptura dos arames helicoidais das armaduras de tração devido à cargas axiais;
- Ruptura de arames das armaduras de tração devido ao desenrolamento causado pela torção excessiva da linha;
- Ruptura de uma camada da armadura de tração por causa do fenômeno denominado *crushing* na instalação, como resultado dos esforços de compressão procedentes do conjunto de sapatas;
- Ruptura dos arames helicoidais da armadura por tração;
- Flambagem lateral das armaduras de tração, motivado pela ação combinada de esforços de compressão axial e flexão cíclica;
- Ruptura da camada polimérica externa que possibilita à penetração de água do mar provocando corrosão nas armaduras de tração;
- Falhas das camadas poliméricas motivado pelo efeito degradante do meio marinho (água do mar, oxigênio e a radiação ultravioleta da luz solar);
- Ruptura dos materiais poliméricos por envelhecimento devido ao uso prolongado, ou efeitos dinâmicos;
- Ruptura por fadiga dos condutores elétricos;
- Ruptura por fadiga do cabo de fibra óptica;
- Flexão do tubo (também conhecido como *kink*), provocado pela formação de nós durante manobras de lançamento ou manuseio;
- Situações de curvatura extrema (flexão), podem ocasionar instabilidade flexo-torcional (laços e nós) do cabo, durante a operação de lançamento.

Os mecanismos abordados neste trabalho são o escoamento e a fadiga mecânica. A seguir serão comentados os mesmos, fazendo uma abordagem mais ampla no mecanismo de fadiga mecânica, devido a que como qualquer outra estrutura submetida a carregamentos cíclicos, o cabo umbilical estará sujeito ao processo de colapso por fadiga.

Estudos já realizados por diversos autores demonstram que o problema dinâmico básico tratado no projeto de cabos umbilicais é a fadiga do material, sendo que a

ruptura por fadiga depende não só da amplitude da tensão cíclica, como também da tensão média à qual o elemento estrutural objeto de análise está sujeito. Este mecanismo constitui a principal causa de falha nestas estruturas (ARANHA, PESCE, MARTINS, 1992).

3.2 ESCOAMENTO

A maioria das estruturas mecânicas são projetadas para assegurar que apenas uma deformação elástica ocorra quando da aplicação de uma tensão. Torna-se então desejável conhecer o nível de tensão onde a deformação plástica têm início, ou onde ocorre o fenômeno do escoamento.

Na Figura 3.1 - é apresentada a curva de tensão *versus* deformação do aço obtida através de ensaios de tração (LÉPORE, 2003).

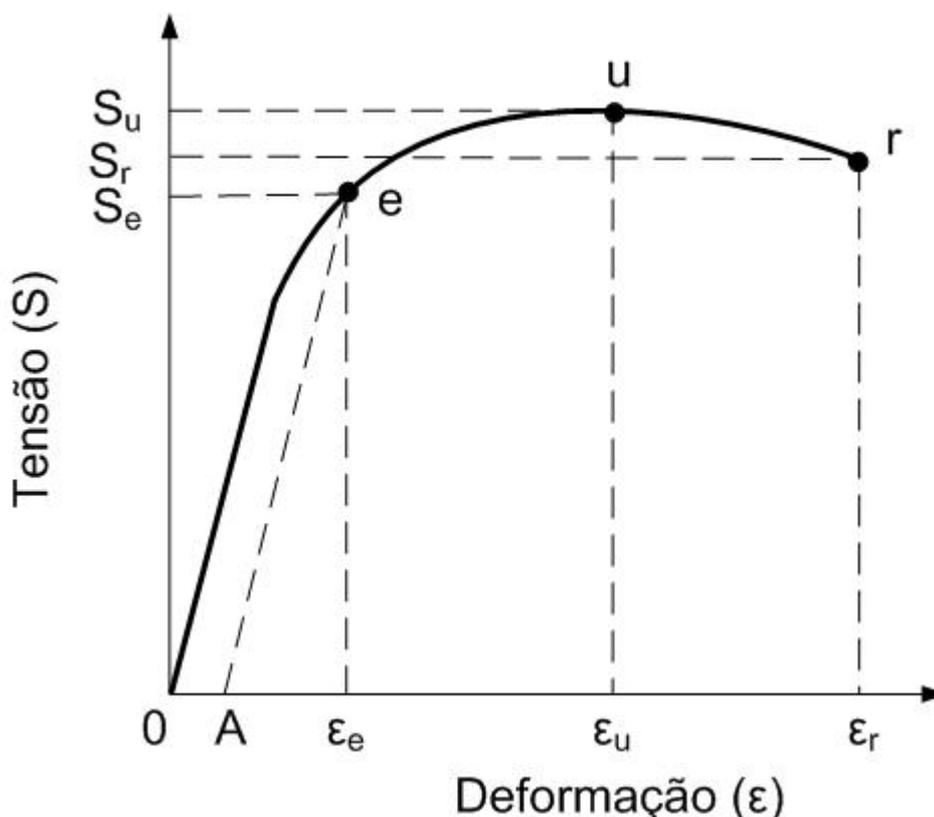


Figura 3.1 - Gráfico representativo de Tensão x Deformação do aço galvanizado (LÉPORE, 2003)

onde:

A-e: representa o trecho elástico

ϵ_e : deformação no início do escoamento

Na prática, um elemento estrutural dificilmente está submetido a um estado tensional uniaxial, estados multiaxiais de deformações são difíceis de evitar. Na realidade, na maioria das vezes as estruturas estão submetidas a estados de tensões multiaxiais. Nestes estados acontecem os mesmos fenômenos que no estado uniaxial tais como uma zona elástica, limite de escoamento, uma zona plástica, limite de resistência, etc. (SOUZA, 1982; SMITH; PASCOE, 1983).

Numa viga carregada longitudinalmente sob uma tensão de tração uniaxial acontece uma contração lateral, tal e como apresenta a Figura 3.2. A contração que se produz origina um estado de deformação tri-axial, com a deformação longitudinal (ϵ_L), observam-se duas deformações transversais ($-\epsilon_T$), no qual o coeficiente de Poisson (ν) é a relação entre as deformações transversais e longitudinais, tal e como se ilustra na equação (3.1), o coeficiente de Poisson (ν) caracteriza a propriedade que nos dá a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração aplicada no ensaio. (SUH, N. P.; TURNER, 1985).

Este coeficiente varia entre valores de 0,1 (alguns concretos), 0,3 (para alguns aços) e 0,5 (elastômeros) (FUCHS, STEPHENS, 1980).

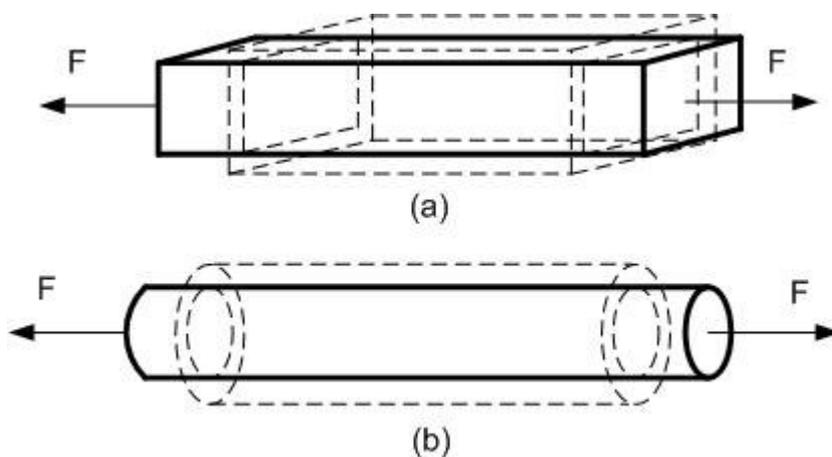


Figura 3.2 - Alongamento axial e contração lateral de duas barras carregadas à tração longitudinal: (a) seção retangular (POPOV, 1978); (b) seção circular (as deformações foram exageradas) (CÁRDENAS, 2007)

$$\nu = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} \quad (3.1)$$

onde:

ν : coeficiente de Poisson;

ϵ_T : deformação transversal;

ϵ_L : deformação longitudinal.

No caso de cabos umbilicais o escoamento generalizado do material ocorre do resultado de um carregamento excessivo na estrutura, entende-se, pressão hidrostática externa, peso, correntes marítimas, movimentos da estrutura flutuante, entre outros. Cada uma dessas solicitações gera uma tensão atuante no cabo, sendo estas compostas através de do critério de resistência de Von Mises (Máxima Energia de Distorção) de sorte a se traduzirem num único valor de tensão equivalente, por comparação com a tensão de escoamento do material base, (SOUZA,1994).

No caso dos aços estruturais, os quais são considerados materiais dúcteis, a teoria da máxima energia de distorção ou Critério de Von Mises é a mais utilizada, pois é a que mais se aproxima aos resultados experimentais (SOUZA, 1982). O escoamento em um determinado ponto de um corpo submetido a um estado multiaxial de tensões ocorre quando a tensão equivalente de Von Mises se iguala ao limite de resistência mecânica ao escoamento ($\sigma_{eq} \geq S_e$) obtido através do ensaio de tração convencional. A teoria da máxima energia de distorção pode ser definida pela Equação 3.2.

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = S_e^2 \quad (3.2)$$

para um estado plano de tensões ($\sigma_3=0$),

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 = S_e^2 \quad (3.3)$$

onde:

σ_{eq} : tensão equivalente de Von Mises

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: tensões principais

S_e : limite de escoamento

3.3 FADIGA

A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Sob estas circunstâncias, é possível a ocorrência de uma

falha em um nível de tensão consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática (FUCHS; STEPHENS, 1980).

Uma característica importante da fadiga é que o carregamento não é suficientemente grande para causar a falha imediata. Ao invés disto, a falha ocorre após a ocorrência de certo número de flutuações do carregamento, isto é, após o dano acumulado ter atingido um valor crítico.

As primeiras pesquisas neste tema foram feitas pelo engenheiro de minas alemão W. A. S. Albert, que em 1829 executou testes de carregamento repetido em correntes de ferro. Já as primeiras falhas por fadiga em serviço ocorreram a meados do século XIX, especificamente em eixos de carruagens e quando o sistema de trens começou-se desenvolver, naquele momento as falhas por fadiga de eixos de trens transformou-se em problemas comuns e de larga ocorrência e com isto, a importância de se considerar a ocorrência de carregamentos cíclicos.

Entre os anos 1852 e 1870, o engenheiro ferroviário Alemão August Wöhler dirigiu a primeira pesquisa sistemática sobre fadiga. Ele conduziu testes em eixos em escala real e testes cíclicos de flexão, torção e tração em escala reduzida para diferentes materiais. Alguns dos dados obtidos por Wöhler foram representados graficamente em termos da amplitude de tensão nominal (S) *versus* números de ciclos (N) até a falha. Esta apresentação da vida à fadiga ficou largamente conhecida como curva (ou diagrama) S-N, sendo cada curva ainda conhecida como linha de Wöhler e o gráfico como Diagrama de Wöhler (DUARTE DE LEMOS, 2005).

Já no final do século XIX, mais de 80 trabalhos se haviam publicado sobre falhas por fadiga. Com o decorrer dos anos, com as análises de falhas por fadiga realizadas, ficou claro que o processo de fadiga abrange dois domínios de tensões, ou deformações cíclicas que possuem comportamentos diferentes. Em cada um desses domínios, a falha ocorre aparentemente por mecanismos físicos diferentes: no primeiro, onde ocorrem deformações plásticas e no segundo onde, tensões e deformações são mantidas dentro do limite elástico. O primeiro envolve grandes ciclos, vida relativamente pequena, menor de 10^3 ciclos e é conhecido como Fadiga de Baixo Ciclo (*low cycle fatigue*). O segundo é associado com baixos

carregamentos e longas vidas, superior a 10^3 ciclos, e é normalmente conhecido como Fadiga de Alto Ciclo (*high cycle fatigue*).

Vale a pena implementar que esses estudos foram realizados com corpos-de-prova sem a existência de defeitos de fabricação, entalhes ou trincas preexistentes, caracterizando um primeiro grupo de casos, onde a simples definição de cargas limites não seria aceitável. Contudo, existem situações onde a estrutura falha com a aplicação de apenas um ou poucos ciclos de cargas é em tensões abaixo da tensão limite. Estes casos normalmente estão relacionados com a existência de defeitos, como por exemplo, trincas provocadas por soldagem. O fenômeno de propagação de trincas foi estudado inicialmente nos anos vinte, por Griffith que determinou o valor teórico e experimental da tensão de fratura em um sólido frágil (MOURA, 1986). Independentemente deste trabalho, foi somente a partir dos anos cinquenta com o trabalho de Irwin e Orowan, que foram lançadas as bases da Mecânica da Fratura, e só a partir da década de sessenta (60) que esta foi aplicada na prática, inicialmente na indústria aeronáutica que utiliza materiais de alta resistência, mais tarde em estruturas de aço, aplicados em vasos de pressão usados na indústria nuclear e posteriormente em estruturas *offshore* (MOURA, 1986).

Por outro lado, resulta oportuno destacar que a condição do ambiente em torno do local onde ocorre a fadiga poderá acelerar o processo ou até mesmo ter um efeito muito mais importante que o fenômeno de fadiga propriamente dito.

Fadiga associada à corrosão é quando ocorre a interação conjunta de um ambiente corrosivo e tensões cíclicas. Estas duas ações agindo em conjunto são mais prejudiciais do que à ação em separado de cada uma delas, ou seja, a tensão cíclica acelera o processo de corrosão e a corrosão acelera o processo de fadiga. Sendo assim, a vida à fadiga em um ambiente corrosivo é menor que em um ambiente não corrosivo. Segundo FUCHS e STEPHENS (1980), a resistência à fadiga em água doce e em água salgada varia entre 5% a 40% da tensão de ruptura.

A fadiga induzida por *fretting* (fricção) não é um assunto totalmente entendido pela engenharia e os termos usados para definir este fenômeno não são universais. Termos como *fretting*, *fretting corrosion*, *fretting fatigue*, *fretting corrosion fatigue*, e *fretting-initiated fatigue* são comumente usados. Todos estes termos envolvem a

palavra *fretting* e todos eles consideram o movimento cíclico entre duas superfícies em contato.

Estes termos são definidos da seguinte forma por FUCHS e STEPHENS (1980):

- *fretting* – Fenômeno de desgaste superficial entre duas superfícies em contato, que possuem movimento oscilatório entre si;
- *fretting corrosion* – Forma de *fretting* na qual a corrosão predomina;
- *fretting corrosion fatigue* – Ação combinada de *fretting*, corrosão e fadiga.;
- *fretting fatigue* – Ação combinada de *fretting* e fadiga, pode também envolver corrosão em menor escala;
- *fretting-initiated fatigue* – Pode significar o mesmo que *fretting fatigue* ou fadiga inicializada.

O fenômeno de *fretting* pode acontecer em movimento oscilatório com amplitude inferior a 10^{-5} mm. As partículas resultantes do desgaste entre as duas superfícies quando ficam aprisionadas entre estas podem agir de forma erosiva em outras regiões da superfície, e quando não ficam aprisionadas possibilita a perda de contato entre as superfícies. A retirada de material da superfície devido ao desgaste não é uniforme possibilitando a concentração de tensão em algum(s) ponto(s) da(s) superfície(s). Segundo VIGNOLES (2002), a resistência à fadiga, quando considerado o fenômeno de *fretting*, é reduzida de 5% a 10%, em relação ao processo de fadiga pura. O fenômeno de *fretting* é considerado de grande importância para número de ciclos acima de 10^4 ou 10^5 . Os principais fatores que afetam o fenômeno de *fretting* são: pressão normal entre as superfícies, amplitude do movimento oscilatório entre as superfícies, ambiente, material e rugosidade das superfícies, e número de ciclos.

Os arames das armaduras interna e externa se encontram superpostos devido a sua distribuição geométrica no cabo, existe por conseguinte um movimento relativo entre eles que leva a um processo de interação ou fricção Este movimento relativo geralmente é de baixa amplitude, oscilatório e com pressão de contato alta. Porém pode acontecer desgaste superficial entre os arames (*fretting*). Este desgaste reduz a área de seção resistente dos arames, aumentando assim o nível de tensão.

3.3.1 Mecanismos de fadiga

Para que ocorra o fenômeno de fadiga são imprescindíveis a existência de três fatores básicos, os quais são (FUCHS; STEPHENS,1980):

- presença de tensões cíclicas;
- presença de tensões de tração;
- presença de deformações plásticas localizadas.

O fenômeno de fadiga acontece da aplicação repetida de cargas, portanto ocorre no transcurso de um longo período de uso da estrutura. Sendo que a fratura do componente possa ocorrer sem nenhuma indicação previa. O processo de fadiga ocorre em pontos específicos da estrutura, sendo que estes geralmente correspondem a áreas onde são elevadas as tensões e deformações, motivadas pelo carregamento externo, zonas onde ocorrem mudanças na geometria, aparecimento de tensões residuais e imperfeições do material base. Devido a esses fatores o resultado obtido em corpos-de-prova ensaiados em laboratório têm um significado bastante restrito, sendo normalmente necessário ensaios do componente propriamente dito para se avaliar o comportamento à fadiga.

Pode-se ressaltar que o processo de fadiga termina com o colapso da estrutura por ruptura, caracterizando-se pela propagação de uma trinca, a qual se torna tão grande que a seção restante é incapaz de suportar os carregamentos externos ocorrendo à ruptura instável final.

Existem três diferentes métodos para a análise do comportamento à fadiga de um componente mecânico ou estrutural, os quais são:

Fadiga de alto ciclo – Baseadas na aplicação de diagramas S-N (Tensão *versus* Vida em fadiga);

Fadiga de baixo ciclo – Baseadas na aplicação de diagramas ϵ -N (Deformação *versus* Vida em fadiga);

Fadiga com presença de trincas – Baseadas na aplicação de diagramas $da/dN \times \Delta K$ (Taxa de crescimento da trinca por fadiga em função *versus* variação do fator de intensidade de tensões).

Para o estudo em questão, apenas o primeiro método é pertinente, pois a fratura por fadiga das armaduras de tração dos cabos umbilicais ocorre após um grande número de ciclos de tensões, caracterizando assim a fadiga de alto ciclo.

3.3.2 Ciclos de Tensão

A Figura 3.3 apresenta algumas formas de ciclos de tensão. No primeiro caso (a), apresenta-se o ciclo de tensões alternadas puras com forma senoidal, neste tipo de solicitação as tensões máxima e mínima são da mesma magnitude com sinais opostos. O caso (b) representa uma situação mais geral onde as tensões máxima e mínima não são iguais e já o caso (c) representa ciclos de carregamentos mais complexos existentes em estruturas reais.

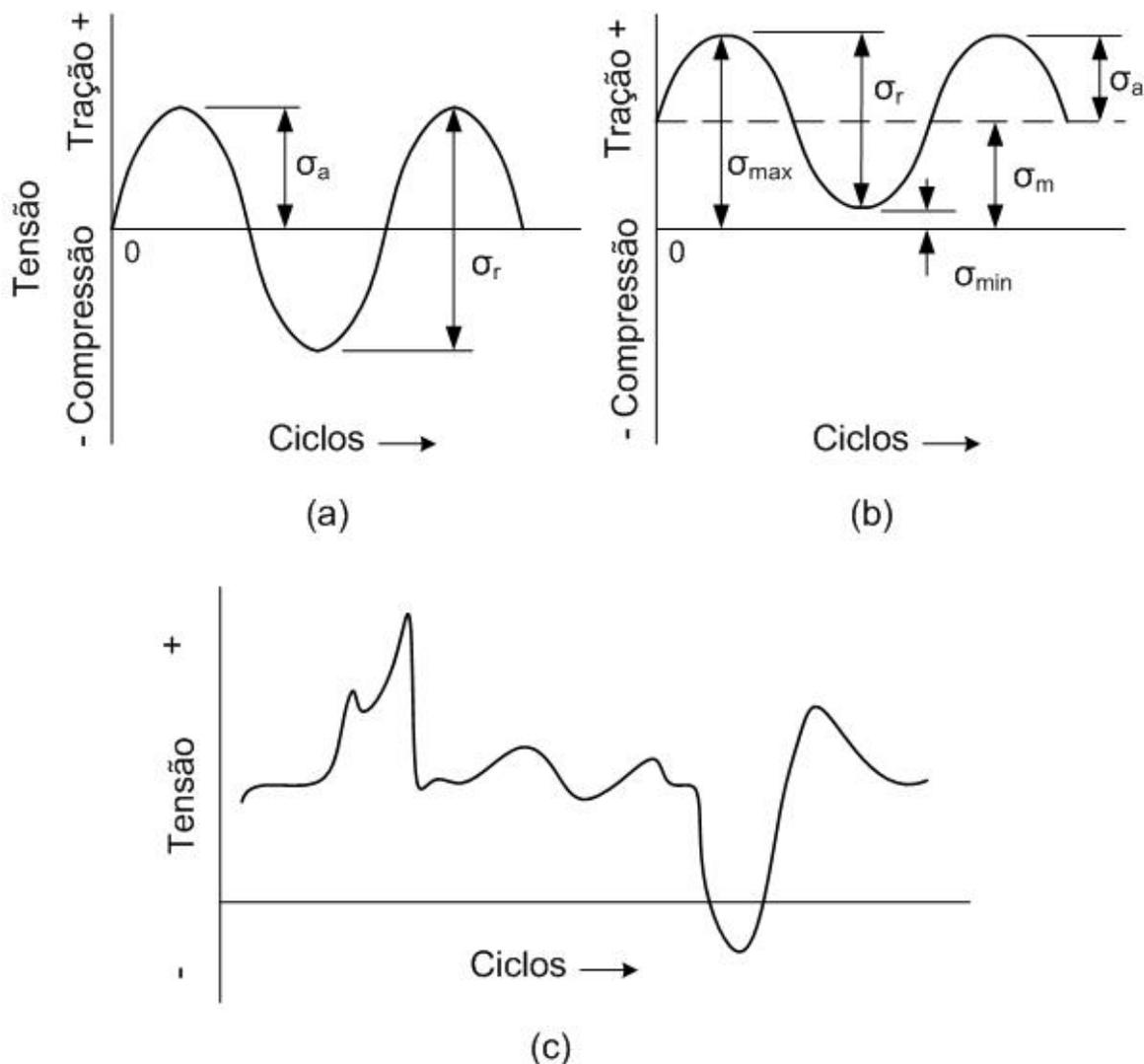


Figura 3.3 - Ciclos de fadiga cíclicos a) Tensões alternadas puras b) Tensão média diferente de zero c) Aleatório (DUARTE DE LEMOS, 2005)

Segundo apresentado na Figura 3.3, as tensões podem ser definidas como sendo compostas de duas componentes, uma tensão estática média ou constante σ_m e uma amplitude de tensão alternada ou variável σ_a . Pode-se considerar também a variação (*range*) de tensões σ_r que é dada por:

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.4)$$

A amplitude de tensão então é metade da variação de tensão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \quad (3.5)$$

A tensão média é a média algébrica entre as tensões máxima e mínima no ciclo:

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (3.6)$$

Duas razões são normalmente definidas para a representação da tensão média, a razão de tensões, R, e a razão de amplitude de tensões A:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.7)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (3.8)$$

3.3.3 Curvas S-N

Os estudos e trabalhos elaborados por Wöhler em meados do século XIX apresentaram que a falha em um metal sujeito a tensões alternadas ocorre em níveis de tensões bem inferiores da necessária para levar à falha em uma aplicação única (monotônica). O método da tensão nominal, ou da curva S-N foi o primeiro método desenvolvido tentando entender este fenômeno, e é ainda hoje largamente aplicado em casos onde as tensões estão dentro do limite elástico do material e o número de ciclos até a falha é grande; contudo convém esclarecer que a curva S-N não distingue a fase de iniciação e propagação da trinca que ocasiona a falha desastrosa da estrutura. (HERTZBERG; MANSON,1980). As curvas S-N vêm sendo tradicionalmente usadas em projetos de componentes mecânicos como rodas, eixos, etc, assim como na previsão da vida de estruturas complexas, tais como plataformas oceânicas, vasos de pressão, linhas de amarração de unidades flutuante para a exploração petrolífera, entre outras (SOUZA, 1994).

Na Figura 3.4 é apresentado o comportamento típico de aços e liga de alumínio, quando sujeitos a tensões alternadas puras (tensão média igual a zero), representado pelas curvas tensão *versus* número de ciclos (curvas S-N).

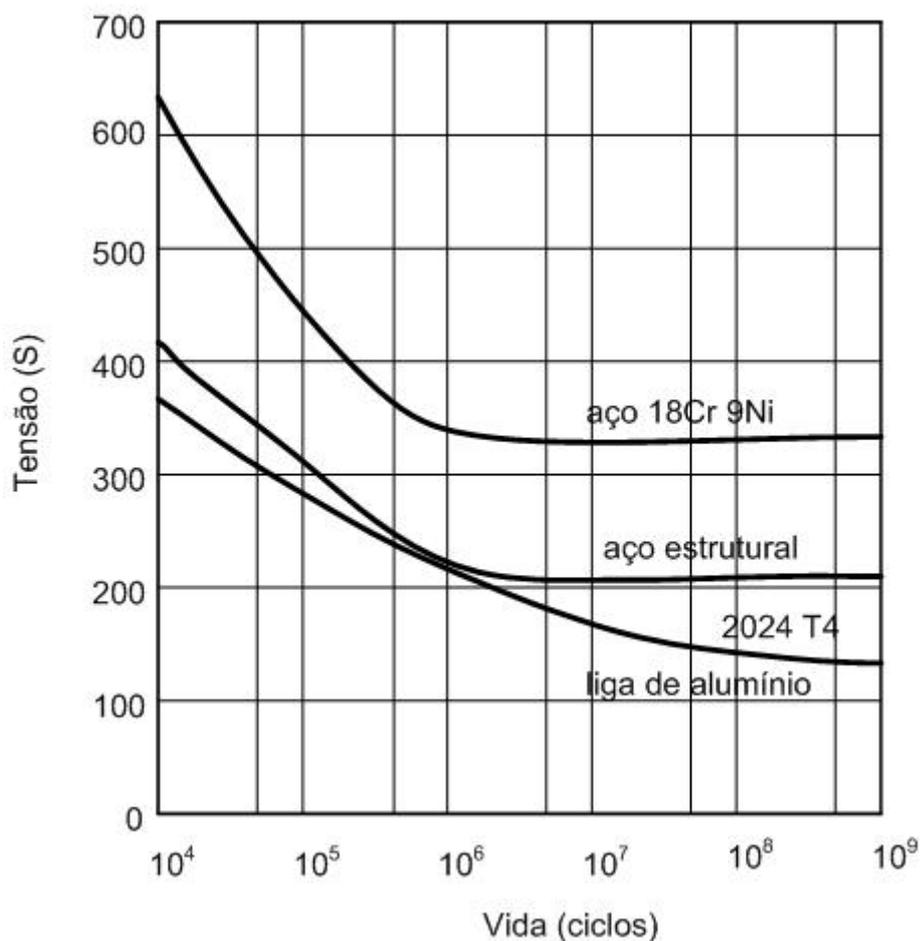


Figura 3.4 - Curvas S-N para diferentes materiais

O valor da razão de tensão (R) constitui um fator que afeta consideravelmente o comportamento da curva S-N. Com motivo de que as estruturas oceânicas geralmente são submetidas a um valor de tensão média distinto de zero, se têm que para a avaliação da vida em fadiga da estrutura é necessário determinar corretamente a influência do fator R .

A seguir são apresentados na Tabela 3.1 alguns valores de R normalmente empregados.

Tabela 3.1 - Razões de tensões

Razão de tensões (R)	Condição de carregamento
$R > 1$	Tanto σ_{\max} quanto σ_{\min} são negativos. Tensão média negativa (compressão)
$R = 1$	Carregamento estático
$0 < R < 1$	Tanto σ_{\max} quanto σ_{\min} são positivos. Tensão média positiva (tração), $ \sigma_{\max} > \sigma_{\min} $
$R = 0$	Carregamento variando até $\sigma_{\min} = 0$
$R = -1$	Carregamento alternado puro com tensão média zero, $ \sigma_{\max} = \sigma_{\min} $
$R < 0$	$ \sigma_{\max} < \sigma_{\min} $, σ_{\max} positiva e se aproximando de zero

Os pesquisadores Gerber, Goodman e Soderberg propuseram formulações para a correção do diagrama S-N em função da variação da tensão média (σ_m), possibilitando a determinação da vida em fadiga da estrutura. Estas formulações são apresentadas a seguir de forma modificada (GONÇALVES, 2005).

A curva de Gerber relaciona através de uma parábola a tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$ e o limite de resistência mecânica do material S_u :

$$\frac{\sigma_a}{(\sigma_a)_c} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^2 = 1 \quad (3.9)$$

A reta de Goodman une a tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$ e o limite de resistência mecânica do material S_u :

$$\frac{\sigma_a}{(\sigma_a)_c} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (3.10)$$

A reta de Soderberg enlaça a tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$ com a tensão de escoamento do material S_e .

$$\frac{\sigma_a}{(\sigma_a)_c} + \frac{\sigma_m}{S_e} = 1 \quad (3.11)$$

onde:

σ_a : tensão alternada

σ_m : tensão média

$(\sigma_a)_c$: tensão alternada corrigida

S_u : limite de resistência mecânica do material

S_e : tensão de escoamento do material

Na Figura 3.5 são esquematizados os diferentes critérios expostos anteriormente.

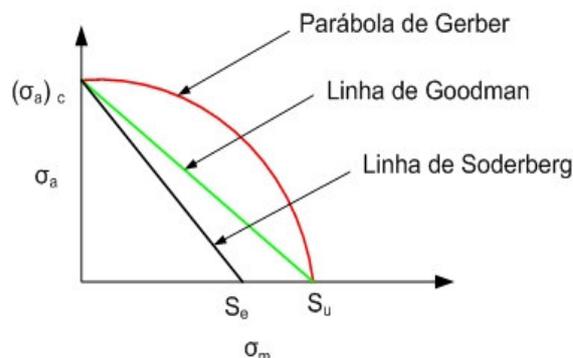


Figura 3.5 - Critérios de falha por fadiga

Estas formulações foram criticadas por diversos autores afirmando que as tensões de escoamento e o limite de resistência do material se alteram em função do carregamento cíclico, sendo este fato verdadeiro em situações onde acontece a plastificação do material. No caso de estruturas oceânicas, onde o carregamento, dadas às condições de projeto, não provoca tensões cujas magnitudes atinjam a tensão de escoamento do material, estas relações podem ser utilizadas com confiança para a correção da curva S-N na determinação da vida em fadiga destas estruturas (SOUZA, 1994).

3.3.4 Dano Acumulado

O conceito de dano pode ser argumentado como o processo de deterioração acumulada que sofre um material até acontecer sua falha, onde geralmente não é possível perceber a mesma (LEMAITRE, 1996). Na engenharia mecânica, para materiais sólidos o dano é a criação e crescimento de micro trincas e micro cavidades as quais são descontinuidades num meio considerado como contínuo a grande escala. A mecânica do dano é estudada, por meio de variáveis mecânicas dos mecanismos envolvidos na degradação do material quando este é submetido a carregamentos.

Durante a vida operacional de um componente estrutural raramente o mesmo está sujeito a valores constantes de σ_a e σ_m . Frequentemente é de grande interesse prever o comportamento de um material quando o mesmo está submetido a uma série de solicitações cíclicas com variações de amplitude.

Palmgren e Miner foram dos primeiros em abordar os conceitos de variáveis relacionadas com a deterioração progressiva antes da falha (CÁRDENAS, 2007), portanto para realizar uma avaliação do dano acumulado ao material devido as diferentes solicitações pode-se utilizar a regra de Palmgren-Miner para o dano acumulado. Seja N_i o número de ciclos necessários para romper o material quando $\sigma_a = \sigma_i$, e n_i o número de ciclos a que o material foi submetido sob a tensão i , dita regra é expressa por:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.12)$$

onde D é o dano acumulado e k é o número de diferentes níveis de solicitação σ_i envolvidos durante a história de carregamento do componente ou do material.

A relação anterior é válida para cargas de amplitude constante. Se a amplitude de tensão varia constantemente com respeito ao número de ciclos n , então a equação (3.12) pode ser expressa da forma seguinte:

$$\int \frac{dn}{N(\sigma)} = 1 \quad \text{ou} \quad \frac{n_1}{N(\sigma_1)} + \frac{n_2}{N(\sigma_2)} + \frac{n_3}{N(\sigma_3)} + \dots + \frac{n_n}{N(\sigma_n)} = 1 \quad (3.13)$$

Na Figura 3.6 é apresentada a curva típica S-N que representa os termos da regra de Miner.

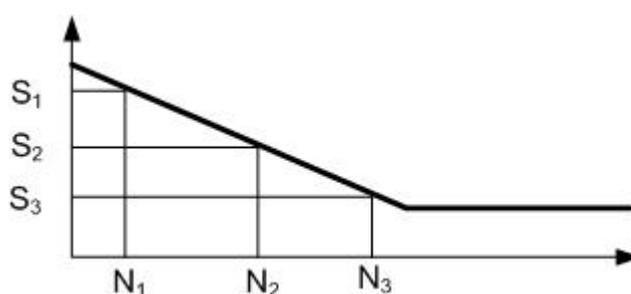


Figura 3.6 - Curva S-N da regra Miner

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os mecanismos considerados no presente estudo serão apenas o de escoamento e de fadiga mecânica de alto ciclo. Não serão consideradas as influências do meio ambiente sobre o escoamento e a fadiga, ou seja, corrosão sobre tensão, fratura sob

corrosão (*stress corrosion cracking*) e fadiga sob corrosão (*fatigue corrosion*). Também não serão considerados os mecanismos de fadiga de baixo ciclo e fadiga por *fretting*.

4 MODELO PROPOSTO DE CONFIABILIDADE

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

No projeto de muitos sistemas na engenharia mecânica, é muito empregado como conceito básico para a operação segura do sistema de estruturas qualquer, que sua capacidade ou resistência seja superior à demanda dele exigida.

A capacidade de um sistema ou estrutura é representada pela resistência mecânica de um componente ou conjunto de componentes, enquanto a demanda está relacionada com a ação de uma combinação de cargas atuantes sobre os integrantes estruturais que compõem o conjunto objeto de análise. Um projeto estrutural ou mecânico é considerado apto para operar quando a sua resistência é superior à demanda representada pelos carregamentos atuantes sobre a mesma.

Neste caso, a abordagem encaminhada para a análise de confiabilidade do cabo umbilical, considera os carregamentos a que o mesmo é submetido durante sua vida em serviço, no que se refere à incidência das ondas do mar e movimentações do sistema de produção flutuante. Estes carregamentos são fatores determinantes na falha de diferentes componentes da estrutura, como é o caso das armaduras de tração, componente de análise neste estudo.

Quando uma estrutura é carregada externamente, esta apresenta uma resposta, em termos de deformação e tensão, que serão dependentes do tempo e da magnitude de carregamento, bem como dos limites de resistência mecânica da estrutura.

A resposta da estrutura é considerada satisfatória caso esta esteja de acordo com os requisitos de seu critério de projeto, que incluem considerações com relação à segurança da estrutura contra colapso, danos, deformações excessivas, etc. Cada um destes requisitos representa um “estado limite” de trabalho da estrutura. A violação destes “estados limites” representa uma condição de operação indesejável para a estrutura.

O estudo de confiabilidade estrutural está relacionado ao cálculo e a previsão da probabilidade de violação de um “estado limite”, ao longo da vida útil prevista para a estrutura analisada.

A probabilidade de ocorrência da violação do “estado limite” representa a avaliação numérica da chance da mesma ocorrer, quer dizer a ocorrência da falha. Esta avaliação para uma dada estrutura pode ser obtida a partir da análise de medições da resposta de uma estrutura similar, quando submetida as mais diversas condições de carregamento, durante um período relativamente longo, de forma de obter-se representatividade estatística da resposta. Esta avaliação também pode basear-se em um cálculo numérico executado a partir da análise teórica da resposta da estrutura quando submetida às diversas condições de carregamento. Usualmente a probabilidade de colapso da estrutura é calculada a partir de uma análise teórica, pois dificilmente são executadas medições de resposta da estrutura durante longos períodos de tempo.

De uma forma simplificada, o problema da definição da possibilidade de falha de um componente estrutural pode ser analisado com o emprego de um modelo de comparação entre uma oferta e uma demanda. A oferta é a resistência mecânica do componente, com respeito a um modo de falha específico, e a demanda é a combinação de efeitos associados aos carregamentos externos que agem sobre o mesmo ao longo de sua vida operacional. A falha estrutural ocorre quando a resistência mecânica têm magnitude inferior à magnitude dos efeitos gerados pela ação do carregamento externo (SOUZA, 2003; SUNDARARAJAN, 1995).

Considerando que tanto a resistência mecânica, representada neste texto pelo símbolo R , como a solicitação externa, usualmente definida pelas tensões atuantes no componente induzidas pela ação do carregamento externo, representada neste caso pelo símbolo S , são variáveis aleatórias, as mesmas podem ser caracterizadas por funções densidade de probabilidade, representadas pelos símbolos $f_R(.)$ e $f_S(.)$, para a resistência mecânica e a solicitação externa, respectivamente (Figura 4.1).

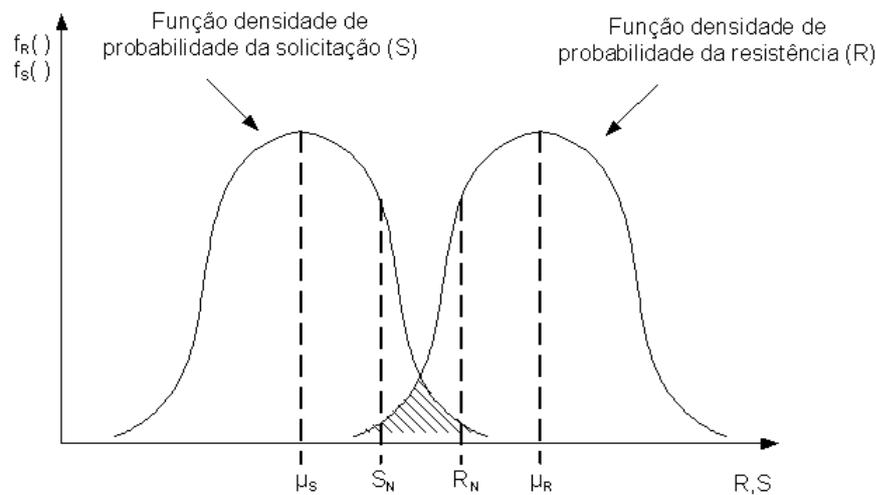


Figura 4.1 - Representação das distribuições de probabilidade da resistência mecânica e da solicitação externa (SOUZA, 2003; SUNDARARAJAN, 1995; THOFT-CHRISTENSEN, 1986)

Para qualquer elemento estrutural existe a possibilidade do mesmo apresentar falha, que ocorre quando a solicitação externa ultrapassa a capacidade de resistência do mesmo ($S > R$).

O projeto estrutural é executado de forma a afastar a resistência nominal da solicitação nominal, limitando esta última a uma fração da resistência mecânica nominal, com o emprego do denominado coeficiente de segurança (C.S.) de forma que

$$S_N = \frac{R_N}{C.S.} \quad (4.1)$$

Ou seja, minimiza a possibilidade da solicitação externa superar a resistência mecânica.

Na definição de confiabilidade do componente mecânico ou estrutural, considera-se que tanto a resistência mecânica como a solicitação são variáveis aleatórias. Como se havia dito anteriormente, a confiabilidade é representada pela probabilidade da resistência mecânica ser superior à solicitação, ou seja:

$$R_C = P(Z \geq 0) = P(R \geq S) \quad (4.2)$$

onde R_C é a probabilidade de sobrevivência do componente, ou sua confiabilidade.

Tem-se também que a probabilidade de falha está definida pela equação:

$$P_f = P(Z < 0) = P(R < S) \quad (4.3)$$

onde Z é a função de desempenho e se expressa pela seguinte equação:

$$Z = R - S \quad (4.4)$$

Baseado nas formulações (4.2) e (4.3), pode-se verificar que para a determinação do nível de confiabilidade e da probabilidade de falha é preciso conhecer as funções de densidade de probabilidade da resistência mecânica e da solicitação externa ou carregamento atuante no componente ou estrutura analisada, pelo que o cálculo analítico da probabilidade de falha pode ser obtido através da seguinte relação:

$$P_f = \int_0^{\infty} \left[\int_0^s f_R(r) dr \right] f_S(s) ds \quad (4.5)$$

ou

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (4.6)$$

Sendo $F_R(.)$ a função de distribuição acumulada da resistência mecânica, pelo tanto a confiabilidade é determinada como o complemento da probabilidade de falha, quer dizer:

$$R_c = 1 - P_f \quad (4.7)$$

4.2 ANÁLISE DO CARREGAMENTO ATUANTE NA ESTRUTURA

A ação dos efeitos ambientais incide nos sistemas de produção flutuantes através das ondas, ventos e correntes. As cargas de ondas e correntes agem sobre o sistema flutuante (unidade flutuante + umbilical) e as cargas de ventos incidem, em princípio, apenas na unidade flutuante.

A ação das correntes está presente em quase toda a lâmina d'água. A ação das ondas só é percebida nas proximidades da superfície e depende das alturas e dos

comprimentos das ondas. Na maioria dos casos, a influência do vento no carregamento das unidades flutuantes é menor que a ação das correntes e ondas.

Neste trabalho, a modo de simplificação, não será considerada a ação variável dos ventos e das correntes, tendo somente em conta o efeito das ondas.

Segundo HUGHES (1988) o espectro de energia das ondas têm sido formulado a partir de dados estatísticos e modelos analíticos. O espectro de Pierson – Moskowitz, que é amplamente empregado, foi formulado para mares plenamente desenvolvidos. A definição deste espectro unidimensional de ondas é basicamente a seguinte:

$$S(w_i, k) = \left(\frac{C_1(k)}{w_i^5} \right) \times \exp\left(-\frac{C_2(k)}{w_i^4} \right) \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (4.8)$$

onde:

$$C_1(k) \cong [0,11(2\pi)^4] \times \frac{H_s^2(k)}{T_z^4(k)} \quad (\text{m}^2/\text{s}^4) \quad (4.9)$$

$$C_2(k) \cong \frac{[0,44(2\pi)^4]}{T_z^4(k)} \quad (1/\text{s}^4) \quad (4.10)$$

sendo :

$S(w_i, k)$: função de densidade espectral das ondas para cada estado de mar k

w_i : frequência cíclica das ondas

$H_s(k)$: altura significativa: média do terço das maiores alturas ($H_{1/3}$) para cada estado de mar k

$T_z(k)$: período médio das ondas para cada estado de mar k

O espectro anteriormente descrito é unidimensional, para o qual se adota que as ondas se propagam em uma direção somente. (HUGHES,1988).

Segundo HUGHES (1988) a distribuição de Rayleigh descreve adequadamente as distribuições estatísticas de curto prazo dos picos das alturas de onda. Parâmetros tais como altura significativa de onda (H_s), o período médio (T_z) e a largura de banda do espectro (Δ) estão relacionados com os momentos do espectro do mar, tal que:

$$m_n = \int_0^{\infty} w^n S(w) dw \quad (4.11)$$

onde:

Δ : largura de banda

$$\Delta = \left[1 - \frac{(m_2)^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad (4.12)$$

T_z : período médio das ondas

$$T_z(k) = 2\pi \left(\frac{m_0}{m_1} \right)^{1/2} \quad (4.13)$$

H_s : altura significativa das ondas

$$H_s(k) = 2(m_0)^{1/2} \quad (4.14)$$

Um histórico temporal de um trem de ondas irregulares pode ser obtido aproximadamente, empregando a superposição linear de um número de ondas regulares de diferentes freqüências, com ângulos de fase entre as ondas regulares distribuídos uniformemente no intervalo entre 0 e 2π , de forma que a composição dessas ondas represente a onda irregular, Figura 4.2 (HUGHES, 1988).

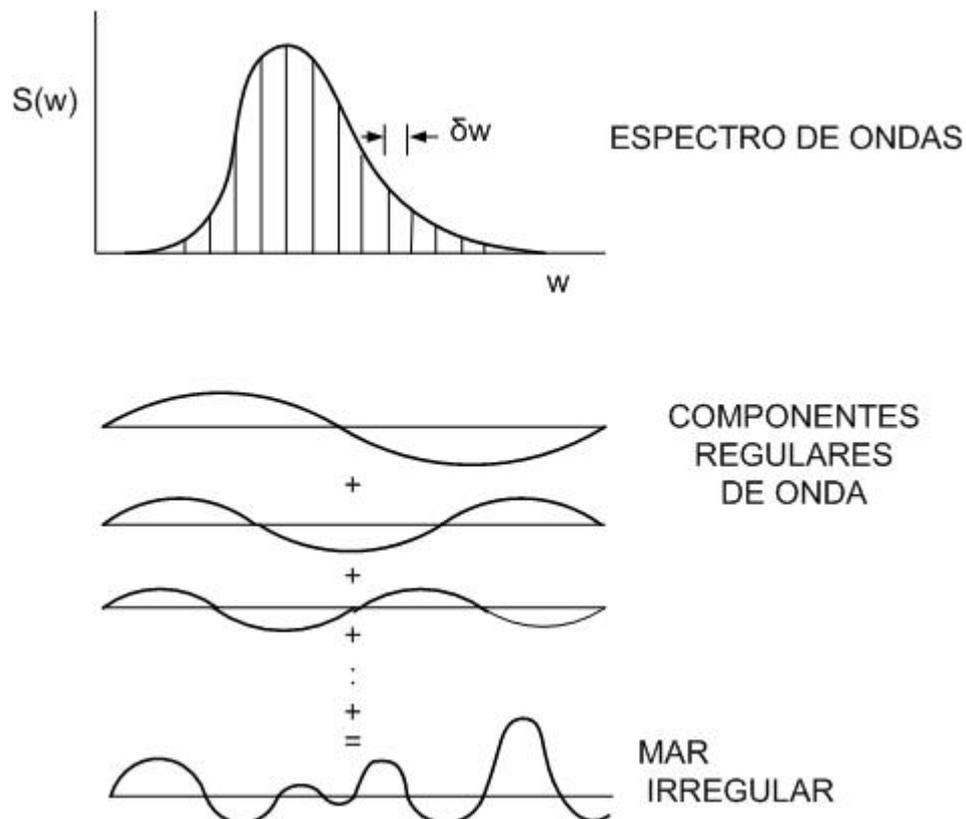


Figura 4.2 - Geração de uma onda irregular a partir do espectro de ondas (HUGHES, 1988)

A amplitude de cada onda regular e dada por:

$$a_i = \sqrt{2S(w_i)\delta w_i} \quad (4.15)$$

onde:

a_i : amplitude da onda regular

w_i : freqüência cíclica das ondas

δw_i : largura da faixa de freqüência ao redor de cada componente

Conhecendo que os movimentos da embarcação solicitam dinamicamente o cabo umbilical, a caracterização de excitação das ondas é de vital importância para a obtenção de resultados confiáveis da vida em fadiga e do risco por ruptura estática.

A determinação das tensões dinâmicas, no domínio do tempo, possibilita que sejam tidas em consideração varias não-linearidades do comportamento de umbilicais, as quais não poderiam ser satisfatoriamente obtidas por um cálculo linearizado no domínio da freqüência. Neste estudo, como será considerada a resposta quase-estática da estrutura, basta caracterizar a freqüência de excitação das ondas descritas pelo espectro do deslocamento da estrutura.

4.3 ANÁLISE LOCAL DE TENSÕES

Os cabos umbilicais, depois de instalados nos sistemas flutuantes de produção encontram-se submetidos às condições do ambiente marinho, ou seja, ondas e correntes marítimas que provocam deslocamentos laterais das plataformas e movimentações das linhas ao longo do comprimento dos cabos. A influência destes carregamentos manifesta-se em uma combinação de esforços de tração, flexão, torção e pressão externa. Tais esforços podem ocasionar diferentes falhas estruturais, como por exemplo, ruptura das partes metálicas e poliméricas.

O cabo umbilical necessita manter sua flexibilidade para facilitar seu transporte em carretéis e seu lançamento, assim como para que sua operação não fique limitada aos movimentos da unidade flutuante. Estas características de flexibilidade e resistência do cabo provêm de um projeto adequado das armaduras de tração, sendo estas as encarregadas de suportar quase toda a carga axial e limitar as deformações nesta direção sem prejudicar significativamente a flexibilidade do cabo.

A análise local de tensões será focada nas armaduras de tração, considerando o conjunto de arames como um cilindro vazado de paredes finas. Foram adotadas hipóteses simplificadoras que conduzem a um cálculo conservador.

Esta análise pode ser dividida na determinação da tensão no arame da armadura devido à força axial e a tensão no arame da armadura devido à flexão. Finalmente, aplicando o princípio de superposição pode-se chegar a que a tensão no arame será a combinação da tensão produzida pela carga axial mais a tensão produzida pelo momento fletor.

A Figura 4.3 apresenta a projeção longitudinal do cabo umbilical (considerando a estrutura como um cilindro vazado de paredes finas), onde são identificadas as tensões atuantes na estrutura.

Pode-se apreciar que os efeitos no arame produzidos pela força axial vão a estar distribuídos uniformemente, não sendo assim para o momento fletor, já que a tensão máxima produzida por este vai encontrar-se no ponto, porém, mais afastado da linha neutra.

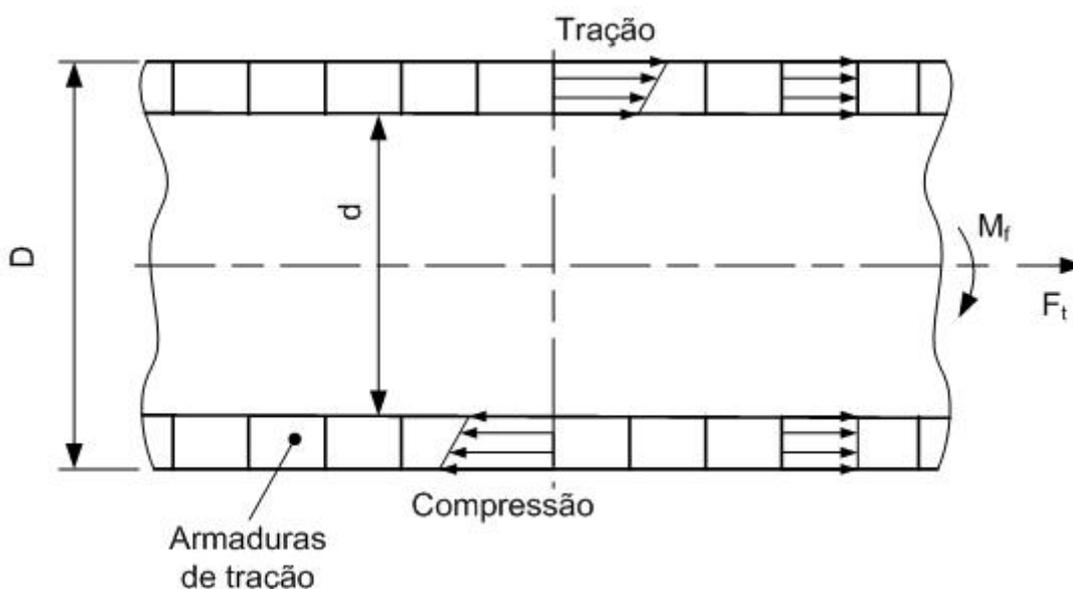


Figura 4.3 - Distribuição de tensões no arame

Já na Figura 4.4 é apresentada a tensão atuante no arame devido à carga axial.

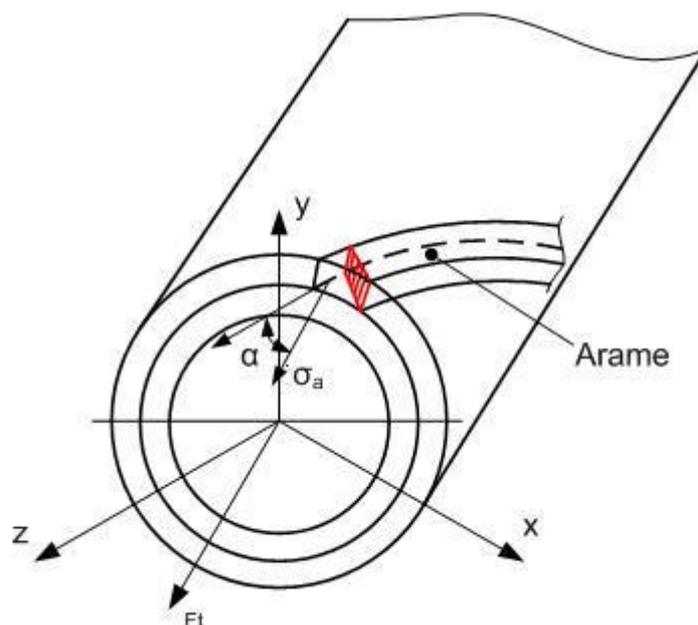


Figura 4.4 - Tensão atuante no arame devido à carga axial

Na Figura 4.5 apresenta-se a seção circular do cabo umbilical, considerando a localização de suas duas armaduras de tração.

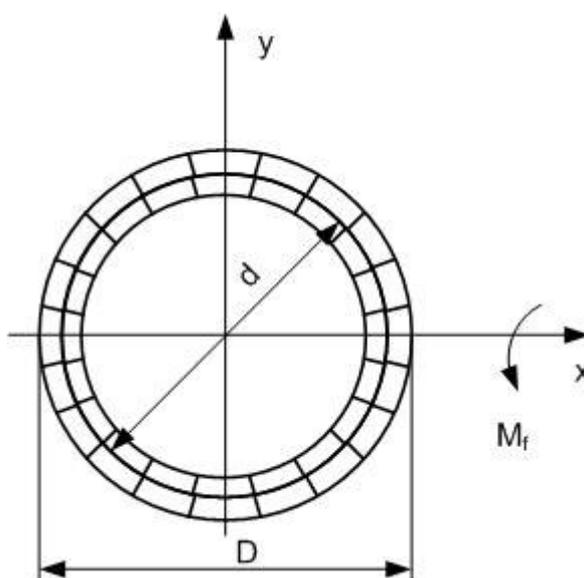


Figura 4.5 - Diâmetro interno e externo da armadura de tração externa

A tensão decorrente da flexão do cabo umbilical, situada no ponto extremo da armadura e no sentido longitudinal do umbilical (σ_f) pode ser estimada através da formulação abaixo (HIBBELER, 2003).

$$\sigma_f = \frac{M_f}{\frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)} \cdot \frac{D}{2} \quad (4.16)$$

onde:

σ_f : tensão normal devido à flexão no cabo umbilical

M_f : momento fletor

D : diâmetro externo da armadura

d : diâmetro interno da armadura

A tensão decorrente da tração do cabo umbilical no sentido longitudinal ao umbilical (σ_t) pode ser estimada através da seguinte forma:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} \quad (4.17)$$

onde:

F_t : força axial no cabo umbilical

A : área da seção transversal das armaduras, consideradas como um cilindro vazado

σ_t : tensão normal devido à tração no cabo umbilical

Portanto:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{\pi d \left(\frac{D-d}{2} \right)} \quad (4.18)$$

A tensão máxima na armadura σ , no sentido longitudinal ao cabo umbilical é dada por

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_t \quad (4.19)$$

Portanto, a força aplicada (F_a) em um arame na direção longitudinal do cabo umbilical pode ser estimada conservadoramente como sendo:

$$F_a = \frac{\sigma \times A}{n_a} \quad (4.20)$$

onde n_a é o número total de arames ($n_a=64$)

A tensão no sentido longitudinal do arame pode ser expressa como:

$$\sigma_l = \frac{F_a \cos \alpha}{A_a} \quad (4.21)$$

onde:

F_a : força na direção normal no arame

A_a : área da seção transversal do arame

α : ângulo de disposição do arame no cabo umbilical

Neste trabalho será empregado o programa ALGOR (2008) para o cálculo das tensões no umbilical, usando um modelo de análise quase-estática.

4.4 TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DAS TENSÕES

Com a finalidade de caracterizar as funções de densidade de probabilidade de curto prazo das tensões atuantes no cabo umbilical, se faz necessário empregar um método de contagem que caracterize os picos e as flutuações de tensões em cada um dos nove (9) estados de mar presentes na Bacia de Campos objeto de estudo.

Existem na literatura (FUCHS; STEPHENS, 1980) diferentes métodos de contagem de picos que se utilizam para este fim, dentro destes métodos se encontram: *Racetrack*, *Range-Pair*, e *Rainflow*.

O algoritmo do *Rainflow* (ASTM E 1049-85,1999) é o método de contagem mais popular para a estimativa da vida em fadiga. Seus criadores, Matsuishi e Endo o denominaram com esse nome, porque graficamente parece com os pingos de chuva que caem sobre um telhado.

Este método considera que o ciclo se desenvolve desde o maior pico (valor máximo) ao maior vale ou cavado (valor mínimo), para depois computar os demais ciclos, maximizando as distâncias entre picos e vales que são contadas.

Esta regra justifica-se por evidências experimentais que demonstram que o dano por fadiga é função da magnitude do ciclo de histerese do material, e que flutuações intermediárias são menos importantes do que a flutuação do maior pico ao maior cavado. Na Figura 4.6 apresenta-se um exemplo de contagem de picos e flutuações.

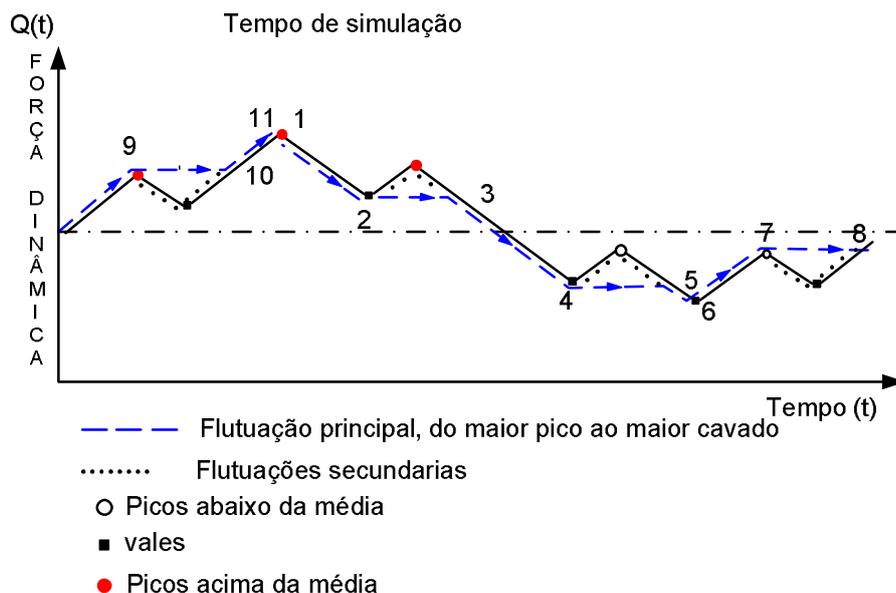


Figura 4.6 - Exemplo de contagem de picos e flutuações sobre um histórico típico da força dinâmica de curto prazo, numa dada condição ambiental (PETRECHE, 1990)

Este método baseia-se na seqüência de análise seguinte (DIAS, 1984):

- 1 - Rearranje o histórico de tensões a modo de começar a contagem pelo maior pico.
- 2 - Desça monotonicamente até encontrar o maior cavado. No trajeto, alcançado um vale intermediário, prossiga horizontalmente até encontrar um novo trecho descendente no histórico.
- 3 - Volte do maior cavado ao maior pico, subindo monotonicamente. No trajeto, alcançando um pico intermediário, prossiga horizontalmente até encontrar um novo trecho ascendente no histórico.
- 4 - Repita as operações para os trechos do histórico que ainda não foram percorridos.

Neste método as pequenas flutuações são tratadas como interrupções das flutuações maiores, sendo viável a identificação de um valor médio de tensão, correspondente a cada flutuação contada.

Uma vez determinada a distribuição das flutuações de tensões encontradas no histórico de tensões do cabo umbilical (ANEXO B1) se faz necessário fazer a correção da tensão pela tensão alternada corrigida $((\sigma_a)_c)$, escolhendo-se para isto o critério apresentado por Goodman (ANEXO B2).

Para a obtenção da distribuição dos picos das tensões é determinada à média do histórico de tensões para cada estado de mar, sendo descartados os picos abaixo do valor médio já que os mesmos não ocasionam ruptura estática, enquanto, dos picos acima da média, é subtraída a média para o cálculo da probabilidade (ANEXO B1).

Uma vez computados os picos (ANEXO B3) e flutuações durante o tempo de simulação estabelecido é possível estimar os parâmetros da função de densidade de probabilidade de curto prazo que melhor se ajusta ao histograma de picos e flutuações de tensões obtidas.

Conhecendo-se que a resposta dinâmica do cabo umbilical necessariamente não apresenta um espectro de energia de banda estreita, OCHI (1978) sugere a adoção de uma distribuição gama generalizada para a caracterização da função densidade de probabilidade de curto prazo de picos e flutuações de tensões.

A formulação da função gama generalizada é expressa através de:

$$f_x(x) = \frac{c}{\Gamma(m)} \cdot \lambda^{cm} x^{cm-1} e^{-(\lambda x)^c} \quad ; 0 \leq x < \infty \quad (4.22)$$

onde

$$\Gamma(m) = \text{função gama} = \int_0^{\infty} z^{m-1} e^{-z} dz \quad (4.23)$$

Sendo m , c e λ são os parâmetros da distribuição.

Na Figura 4.7, apresenta-se a representação gráfica da função gama generalizada (SOUZA, 1994).

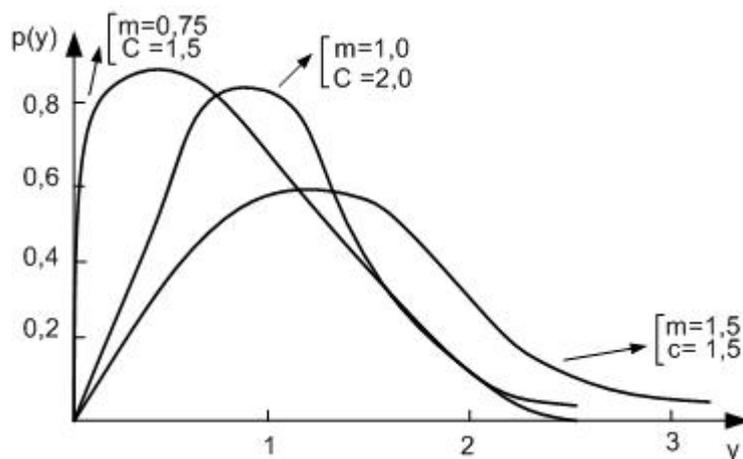


Figura 4.7 - Distribuição de densidade de probabilidade gama generalizada (SOUZA, 1994)

Esta distribuição admite que a estatística seja feita para um processo aleatório de média zero, o que não é o caso da tensão no cabo umbilical. Desta forma, ao invés de calcular a distribuição dos picos da tensão, serão estimados os parâmetros da função de densidade de probabilidade gama generalizada para os valores de picos subtraídos da tensão média, que é constante.

Neste estudo, conhecendo que a função de densidade de probabilidade (fdp) que melhor caracteriza as tensões produzidas pelo deslocamento vertical das ondas do mar é a gama generalizada, como já foi explicado anteriormente neste trabalho; a partir da formulação desta fdp, é possível estimar seus parâmetros m , c e λ com a programação da mesma em código MATLAB (2008), tal e como se apresenta no (ANEXO B1).

Uma vez determinadas as fdp de curto prazo, para cada estado de mar, dos picos e flutuações se faz necessário obter as respostas da estrutura a longo prazo, para isto serão considerados todos os estados de mar, assim como a probabilidade de ocorrência de cada um deles.

A partir das funções de densidade de probabilidade de picos e de flutuações da tensão para cada estado de mar, podem-se obter as respectivas funções de densidade de probabilidade para longo prazo, como sendo a soma ponderada destas várias funções de densidade de probabilidade de curto prazo (PETRECHE, 1990).

As formulações que representam estas fdp de longo prazo foram implementadas em código MATLAB (2008), tal e como se apresenta no (ANEXO B1). As mesmas são apresentadas nos itens 4.5 e 4.6 deste trabalho.

4.5 TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DO ESCOAMENTO

Os valores de tensão de escoamento do material (S_e), em caráter estatístico foram obtidos através dos dados do limite de resistência mecânica do material (S_u) apresentados por HOUGAZ e GONÇALVES (2006). A relação entre o limite de escoamento (S_e) e o limite de resistência mecânica do material (S_u) foi considerada constante e igual a 0,54.

Este valor foi estimado com base na Figura 4.8, obtida do Metals Handbook para o aço AISI 1060 (ASM Handbook, 1978).

Os valores de tensão de escoamento resultantes deste coeficiente de 0,54 são apresentados na Tabela 4.1

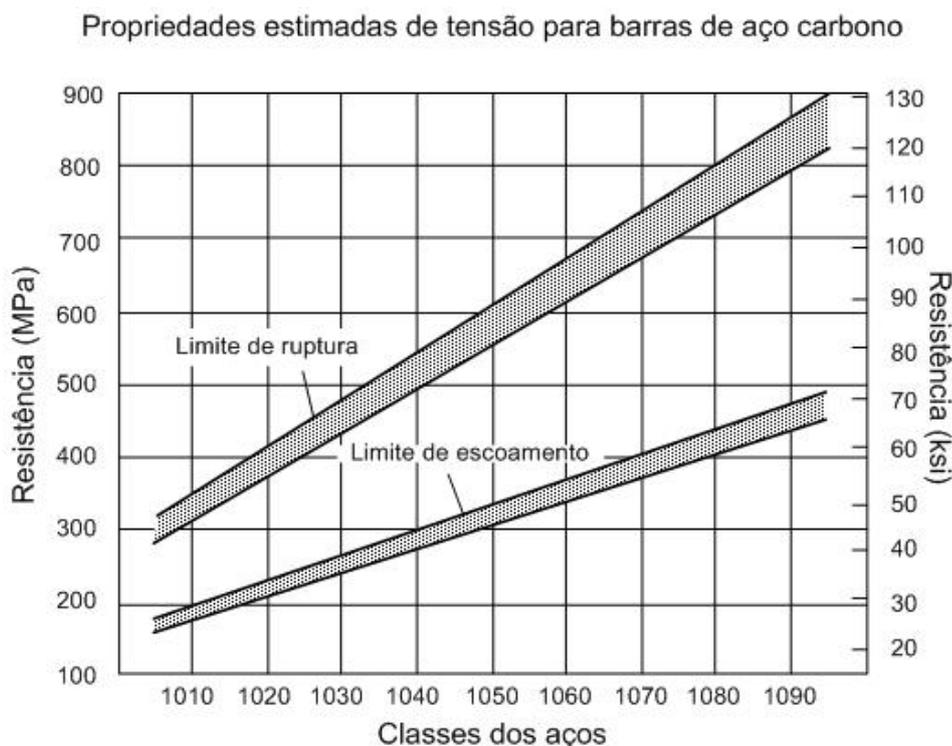


Figura 4.8 – Propriedades de escoamento e ruptura (ASM Handbook, 1978)

Tabela 4.1 - Valores de tensão de escoamento do material

Amostra	Se (Pa)	Amostra	Se (Pa)	Amostra	Se (PA)
1	509,87x10 ⁶	18	497,67x10 ⁶	35	485,08x10 ⁶
2	522,70x10 ⁶	19	520,52x10 ⁶	36	485,67x10 ⁶
3	514,92x10 ⁶	20	566,48x10 ⁶	37	555,06x10 ⁶
4	481,60x10 ⁶	21	505,06x10 ⁶	38	484,50x10 ⁶
5	529,84x10 ⁶	22	525,65x10 ⁶	39	487,52x10 ⁶
6	484,42x10 ⁶	23	505,98x10 ⁶	40	489,62x10 ⁶
7	538,17x10 ⁶	24	481,67x10 ⁶	41	495,90x10 ⁶
8	547,55x10 ⁶	25	508,83x10 ⁶	42	518,70x10 ⁶
9	526,72x10 ⁶	26	532,69x10 ⁶	43	557,21x10 ⁶
10	558,52x10 ⁶	27	476,51x10 ⁶	44	501,02x10 ⁶
11	497,24x10 ⁶	28	494,43x10 ⁶	45	525,05x10 ⁶
12	522,42x10 ⁶	29	513,35x10 ⁶	46	522,32x10 ⁶
13	512,21x10 ⁶	30	491,16x10 ⁶	47	536,40x10 ⁶
14	492,32x10 ⁶	31	518,96x10 ⁶	48	507,62x10 ⁶
15	556,82x10 ⁶	32	507,68x10 ⁶	49	521,02x10 ⁶
16	490,55x10 ⁶	33	471,35x10 ⁶	50	500,07x10 ⁶
17	471,81x10 ⁶	34	512,57x10 ⁶	-	-

Segundo discutido no item 2.3.3.1 deste trabalho, os valores do limite de resistência do material podem ser representados por uma distribuição normal, portanto, devido à relação que se estabeleceu o mesmo ocorre com o limite de escoamento.

No caso da tensão estática (σ_{est}), tal e como foi explicado anteriormente no item 4.4, a mesma poderá ser caracterizada pela função de densidade de probabilidade gama generalizada, e estimada para longo prazo através da equação 4.24 apresentada a seguir.

Função de densidade de probabilidade de picos de longo prazo (tensão estática):

$$\left[f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est}) \right]_L = \frac{\sum_{k=1}^g PB_k \left(\frac{n_k}{T_k} \right) \times f_{\hat{\sigma}_{est_k}}(\hat{\sigma}_{est})}{\sum_{k=1}^g PB_k \left(\frac{n_k}{T_k} \right)} \quad (4.24)$$

onde:

PB_k : probabilidade de ocorrência do estado de mar k

n_k : número de picos, acima da tensão média, observados durante o tempo de simulação no estado de mar k

T_k : tempo de simulação da tensão no estado de mar k

Tendo as duas funções de densidade de probabilidade $f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$ e $f(S_e)$ é possível representá-las, e poder avaliar analiticamente a possibilidade de ocorrência de falha por escoamento.

Na Figura 4.9, apresenta-se a função de densidade de probabilidade do limite de escoamento do material.

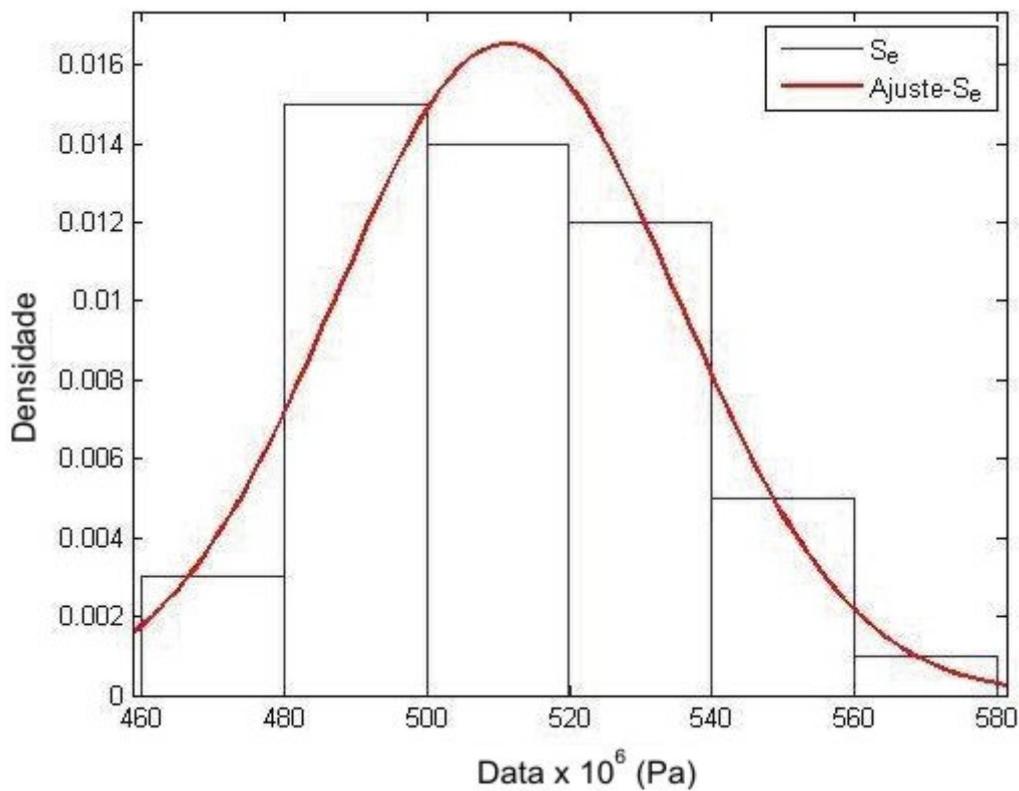


Figura 4.9 - Função densidade de probabilidade do limite de escoamento

4.6 TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DA TENSÃO ALTERNADA CORRIGIDA

A determinação da tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$, utilizando o modelo de Goodman (equação 3.10) é feita através da seguinte relação:

$$(\sigma_a)_c = \frac{\sigma_a}{\left[1 - \frac{\sigma_m}{S_u}\right]} \quad (4.25)$$

onde:

σ_a : tensão alternada

σ_m : tensão média

S_u : limite de resistência mecânica do material

A tensão alternada (σ_a) e a tensão média (σ_m) das tensões atuantes na estrutura são obtidas respectivamente através das equações (3.5) e (3.6). As mesmas receberam o mesmo tratamento probabilístico apresentado no item 4.4, resultando numa função de densidade de probabilidade de longo prazo dada por:

Função de densidade de probabilidade de flutuações de longo prazo (tensão alternada corrigida):

$$\left[f_{(\sigma_a)_c} [(\sigma_a)_c] \right]_L = \frac{\sum_{k=1}^9 PB_k \left(\frac{n_{A_k}}{T_k} \right) \times f_{(\sigma_a)_{ck}} (\sigma_a)_c}{\sum_{k=1}^9 PB_k \left(\frac{n_{A_k}}{T_k} \right)} \quad (4.26)$$

onde:

PB_k : probabilidade de ocorrência do estado de mar k

n_{A_k} : número de flutuações da tensão observadas durante o tempo de simulação no estado de mar k

T_k : tempo de simulação da tensão no estado de mar k

4.7 TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

A análise de fadiga da armadura de tração externa é desenvolvida considerando os seguintes aspectos:

- ocorrência de fadiga de alto ciclo;
- inexistência de trincas;
- o fenômeno de *fretting* é desconsiderado;
- inexistência do processo de corrosão.

O tratamento probabilístico de fadiga da armadura de tração externa será avaliado através da análise do efeito da tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$, sobre o limite de resistência à fadiga do material (S_f).

Para a obtenção dos valores do limite de resistência à fadiga do material (S_f), tendo em consideração os valores experimentais obtidos do limite de resistência mecânica do material, a partir do ensaio de tração realizado por HOUGAZ e GONÇALVES (2006), foi considerado o critério estabelecido segundo FUCHS e STEPHENS (1980), o qual expõe que:

$$S_f \approx 0.35 S_u \quad \text{se} \quad S_u \leq 1400 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (4.27)$$

Os valores obtidos de S_f segundo o critério anterior são apresentados na Tabela 4.2.

Sendo que os valores do limite de resistência mecânica do material podem ser representados por uma distribuição normal, tal e como foi explicado no Capítulo 2 deste trabalho, pode-se dizer então, que também o limite de resistência à fadiga do material pode ser representado por uma distribuição normal, devido à relação que se estabelece entre ambos, segundo a formulação adotada anteriormente (FUCHS; STEPHENS, 1980).

Tabela 4.2 - Valores do limite de resistência à fadiga do material

Amostra	Sf (Pa)	Amostra	Sf (Pa)	Amostra	Sf (PA)
1	330,47x10 ⁶	18	322,56x10 ⁶	35	314,41x10 ⁶
2	338,79x10 ⁶	19	337,38x10 ⁶	36	314,78x10 ⁶
3	333,75x10 ⁶	20	367,16x10 ⁶	37	359,76x10 ⁶
4	312,15x10 ⁶	21	327,36x10 ⁶	38	314,03x10 ⁶
5	343,41x10 ⁶	22	340,70x10 ⁶	39	315,99x10 ⁶
6	313,97x10 ⁶	23	327,95x10 ⁶	40	317,35x10 ⁶
7	348,82x10 ⁶	24	312,19x10 ⁶	41	321,42x10 ⁶
8	354,89x10 ⁶	25	329,80x10 ⁶	42	336,19x10 ⁶
9	341,39x10 ⁶	26	345,26x10 ⁶	43	361,15x10 ⁶
10	362,01x10 ⁶	27	308,85x10 ⁶	44	324,73x10 ⁶
11	322,28x10 ⁶	28	320,47x10 ⁶	45	340,31x10 ⁶
12	338,61x10 ⁶	29	332,72x10 ⁶	46	338,54x10 ⁶
13	331,99x10 ⁶	30	318,34x10 ⁶	47	347,67x10 ⁶
14	319,10x10 ⁶	31	336,36x10 ⁶	48	329,01x10 ⁶
15	360,90x10 ⁶	32	329,05x10 ⁶	49	337,70x10 ⁶
16	317,95x10 ⁶	33	305,50x10 ⁶	50	324,12x10 ⁶
17	305,81x10 ⁶	34	332,22x10 ⁶	-	-

A tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$, como foi explicado anteriormente, será caracterizada pela função de densidade de probabilidade gama generalizada, e estimada para longo prazo através da equação 4.26.

Tendo as duas funções de densidade de probabilidade $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$ e $f(S_f)$ é possível representá-las, e poder avaliar analiticamente a possibilidade de ocorrência de falha por fadiga mecânica.

Na Figura 4.10, apresenta-se a função de densidade de probabilidade do limite de resistência à fadiga do material.

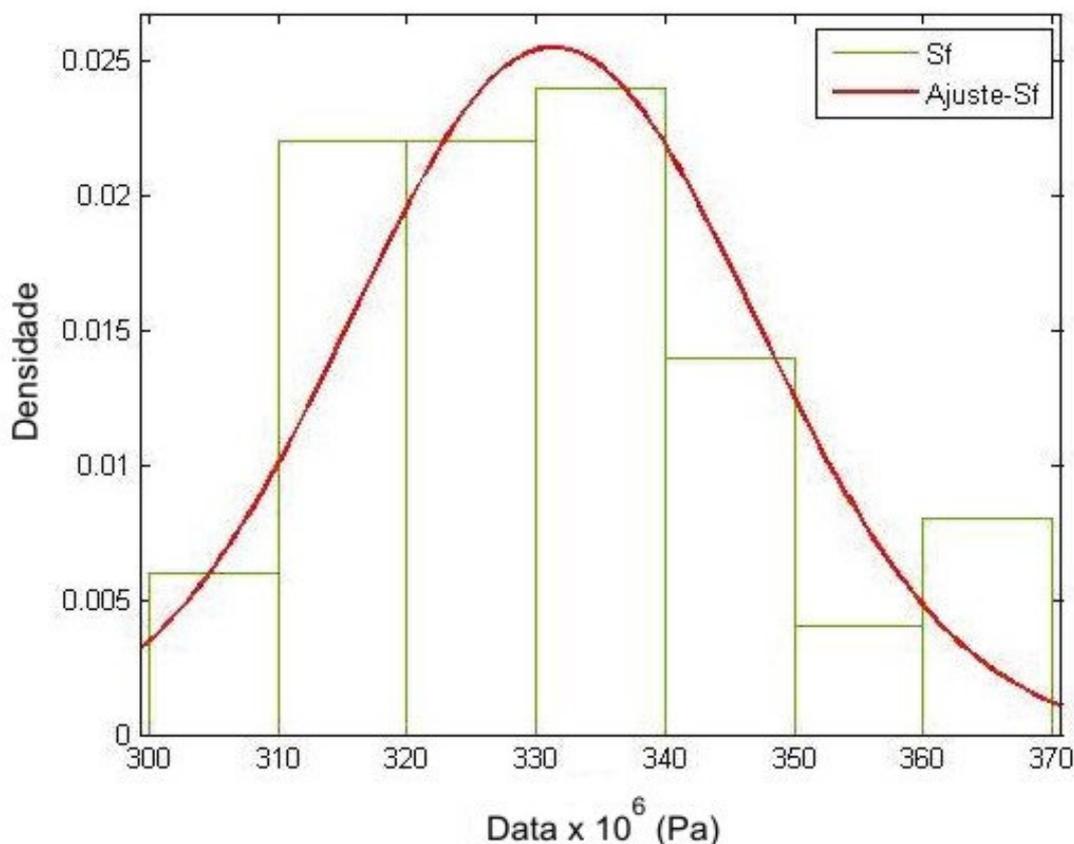


Figura 4.10 - Função densidade de probabilidade do limite de resistência à fadiga

4.8 PROBABILIDADE DE FALHA

4.8.1 Considerações

O modelo de confiabilidade proposto tem em conta a avaliação de dois mecanismos de falha das armaduras de tração, por escoamento e por fadiga mecânica.

Para caracterizar a probabilidade de falha por escoamento, se teve em conta a incidência da tensão estática (σ_{est}) sobre o escoamento (S_e) do material, neste caso aço carbono galvanizado, material constituinte das armaduras de tração.

Os picos das tensões do carregamento de curto prazo atuante (tensão estática) é uma variável aleatória como já se tenha discutido anteriormente, onde a função de densidade de probabilidade que a caracteriza é a **fdp gama generalizada**. Isto pode ser comprovado com o ajuste realizado das fdp com os correspondentes

histogramas. No (ANEXO D) são apresentados os ajustes realizados, exemplificando para alguns estados de mar.

Para a obtenção da fdp de longo prazo da tensão estática, tal e como se explicou neste texto, será feita como a soma ponderada destas várias fdp de curto prazo, expressa através da equação 4.24.

No caso do valor do escoamento do material, para a caracterização da função de densidade de probabilidade, foram considerados os dados obtidos do ensaio de tração feito por HOUGAZ e GONÇALVES (2006), onde se estima que a função de densidade de probabilidade que melhor se ajusta é a **fdp normal**.

Pode-se dizer então que a probabilidade de que ocorra falha por escoamento nas armaduras de tração vai estar dada por:

$$P_{F_{ESCOAMENTO}} = \int_0^{\infty} \left[\int_0^s f_{(S_e)}(r) dr \right] f_{\sigma_{est}}(s) ds \quad (4.28)$$

A caracterização da probabilidade de falha por fadiga mecânica teve em consideração o efeito que produz a tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$ pela tensão média sob o limite de resistência à fadiga (S_f) dos arames de aço que compõem as armaduras de tração.

As flutuações do carregamento de curto prazo atuante (tensão alternada corrigida) foram obtidas através do método de contagem *Rainflow*, fazendo a posterior correção da tensão alternada. A função de densidade de probabilidade que caracteriza as flutuações das tensões é a **fdp gama generalizada**. Isto pode ser verificado através do ajuste das fdp com os correspondentes histogramas (ANEXO D).

Referente aos valores de resistência à fadiga do material, igualmente foram obtidos do ensaio de tração realizado por HOUGAZ e GONÇALVES (2006). Considerando os valores do limite de resistência do aço (S_u) alcançados neste ensaio, os mesmos foram manipulados matematicamente através da formulação estipulada pelo FUCHS e STEPHENS (1980) para se obter os valores de (S_f) , de onde se estima que a

função de densidade de probabilidade que melhor se ajusta é a **fdp normal** (HOUGAZ, GONÇALVES; 2006).

Pode-se dizer então que a probabilidade de que ocorra falha por fadiga mecânica nas armaduras de tração vai estar dada por:

$$P_{F_{fadiga}} = \int_0^{\infty} \left[\int_0^s f_{S_r}(r) dr \right] f_{(\sigma_a)_c}(s) ds \quad (4.29)$$

Pode-se dizer também que a probabilidade de que ocorra falha por fadiga **e/ou** falha por escoamento pode ser expressa como a probabilidade da união ($P(A \cup B)$) (SCHNEIDER, 1997).

$$\text{máx}[P(A), P(B)] \leq P(A \cup B) \leq P(A) + P(B) \quad (4.30)$$

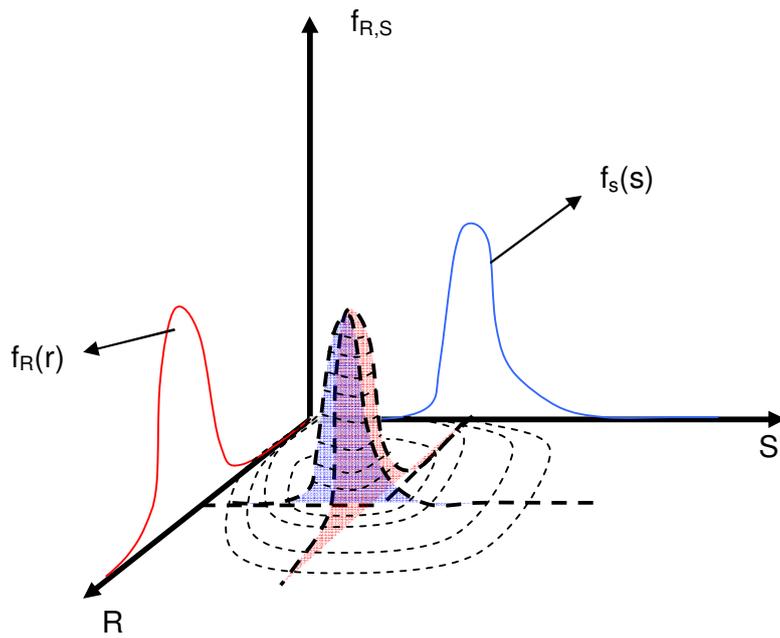
onde:

$P(A)$: $P_{F \text{ Escoamento}}$

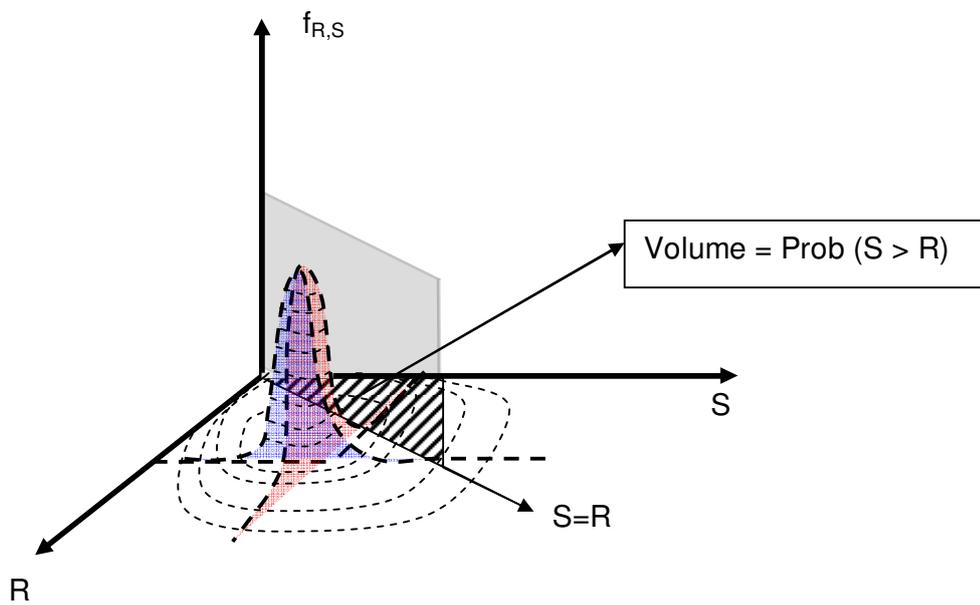
$P(B)$: $P_{F \text{ Fadiga}}$

$\text{máx}[P(A), P(B)]$: a maior das duas probabilidades de falha dos mecanismos analisados

A figura 4.11 representa graficamente a probabilidade conjunta das fdp do carregamento atuante (S) e a resistência do material (R) (vide figura 4.11 (A)), assim como a probabilidade de falha, identificada pelo volume contido sob a superfície, representada pela zona hachurada (vide figura 4.11 (B)).



(A)-Representação gráfica da probabilidade conjunta das fdp da resistência mecânica (R) e o carregamento externo (S)



(B) - Representação gráfica da ocorrência de falha (Prob $S > R$)

Figura 4.11- Representação gráfica do cálculo da probabilidade de falha a partir de $f_{R,S}$ (R,S)

4.8.2 Determinação da fdp da tensão estática e da fdp da tensão alternada corrigida a longo prazo

Para a determinação da fdp da tensão estática e a fdp da tensão alternada corrigida produto do carregamento atuante na estrutura, entendem-se, ondas do mar, foi seguido o esquema de trabalho apresentado na Figura 4.12.

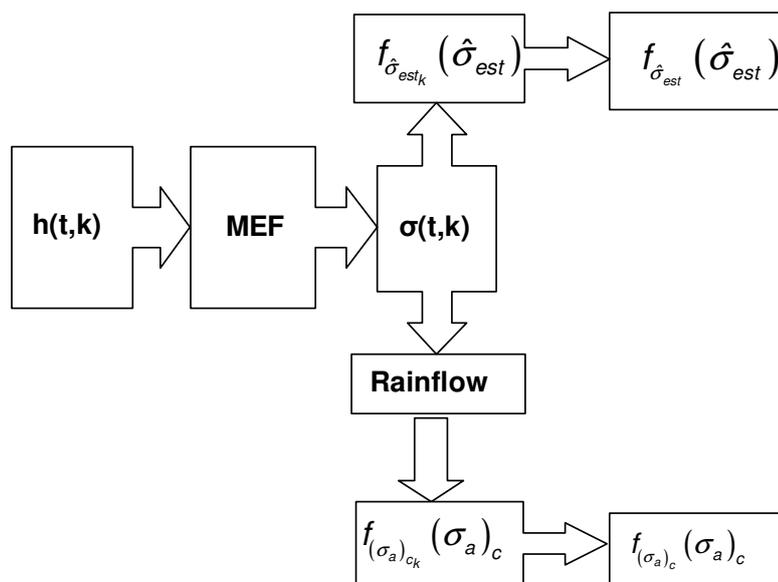


Figura 4.12 - Esquema de trabalho para a determinação das funções de densidade de probabilidade da tensão estática $f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$ e da tensão alternada corrigida $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$

Considerando que o cabo umbilical encontra-se fixado à plataforma, que apresenta deslocamento vertical no tempo para cada estado de mar simbolizado como $h(t,k)$, foi criado um modelo de elementos finitos (MEF) do cabo umbilical com a finalidade de obter o histórico de tensões no tempo para cada estado de mar $\sigma(t,k)$, entrando como variável ao modelo o deslocamento $h(t,k)$ em seu extremo superior. Uma vez determinada a distribuição dos picos das tensões, é possível determinar a fdp de curto prazo, calculando os parâmetros que caracterizam a mesma (m, c, λ). Uma vez alcançadas as fdp de curto prazo dos picos das tensões para cada estado de mar $f_{\hat{\sigma}_{est_k}}(\hat{\sigma}_{est})$, pode-se estimar a fdp de longo prazo da tensão estática $f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$ pela formulação 4.24 explicitada neste trabalho. Com o emprego do método de contagem de picos a vales (*Rainflow*), é determinada a distribuição das flutuações de tensões, a seguir se faz efetiva a correção da tensão pela tensão alternada corrigida

$(\sigma_a)_c$, empregando o critério de Goodman, para posteriormente determinar a fdp de curto prazo $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$, estimando de igual forma os parâmetros que a regem. Uma vez logradas as fdp de curto prazo das flutuações de tensões para cada estado de mar, pode-se determinar a fdp de longo prazo da tensão alternada corrigida $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$ pela equação 4.26 indicada neste texto.

4.8.2.1 Determinação do deslocamento vertical do cabo umbilical por estado de mar

A análise das flutuações da elevação da superfície do mar é simplificada mediante o emprego da representação espectral (equação 4.8), isto é mediante a descrição do processo em termos da sua freqüência. Desta forma pode escrever-se a relação entre a função que descreve a onda do mar no tempo $s(t)$ e a função que descreve o deslocamento da plataforma no tempo $h(t)$, expressando estas em termos de suas funções de densidade espectral, $S(w,k)$ e $S_h(w,k)$ respectivamente, tal e como se apresenta na equação:

$$S_h(w,k) = |\phi(w_i)|^2 \cdot S(w,k) \quad (4.31)$$

onde:

$S_h(w,k)$: função de densidade espectral do deslocamento na plataforma para cada estado de mar k

$\phi(w_i)$: operador de resposta da amplitude (*response amplitude operator, RAO*)

$S(w,k)$: função de densidade espectral da onda do mar para cada estado de mar k

Neste trabalho, foram tomados os 25 valores de freqüência (w_i) e da função de transferência ($|\phi(w_i)|^2$) reportados no Apêndice E, do trabalho de PETRECHE (1990). Para a função de transferência foram considerados os valores correspondentes ao movimento vertical da plataforma (vide Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Resposta em freqüência para o movimento vertical da plataforma

Freqüência da onda w_i (rad/s)	$ \phi(w_i) ^2$ (m/m)
0,194	1,0400
0,209	1,0600
0,225	1,0900
0,242	1,1500
0,260	1,2800
0,280	1,6000
0,302	1,3500
0,325	0,3610
0,350	0,3850
0,376	0,4490
0,405	0,4730
0,436	0,4730
0,469	0,4560
0,505	0,4260
0,544	0,3830
0,585	0,3210
0,630	0,2400
0,678	0,1510
0,730	0,0801
0,786	0,0359
0,846	0,0103
0,911	0,0076
0,981	0,0194
1,056	0,0231
1,137	0,0182

A amplitude dos harmônicos que compõem o deslocamento da plataforma pode ser determinada por meio da equação seguinte:

$$a_{(w,k)} = \sqrt{2S_h(w,k)\delta w_i} \quad (4.32)$$

onde:

$a_{(w,k)}$: amplitude dos harmônicos do deslocamento da plataforma para cada estado de mar k

δw_i : largura de faixa de freqüência ao redor da cada componente

$S_h(w,k)$: função de densidade espectral do deslocamento na plataforma para cada estado de mar k

Com a obtenção da amplitude do deslocamento da plataforma, serão calculados os deslocamentos no tempo da plataforma para cada um dos nove (9) estados de mar presentes $h(t,k)$, mediante a seguinte equação (HUGHES, 1988)

$$h(t,k) = \sum_{i=1}^{25} a_{(w,k)} \cos(-w_i t + \theta_{(i,k)}) \quad (4.33)$$

onde:

$a_{(w,k)}$: amplitude dos harmônicos do deslocamento da plataforma para cada estado de mar k

w_i : freqüência cíclica

t : tempo. (se considerará um tempo de simulação de 40 s.)

$\theta_{i,k}$: ângulo de fase aleatória distribuído uniformemente entre $0-2\pi$ para cada estado de mar k

O tempo de simulação deve ser suficientemente grande para que a amostra obtida represente significativamente os picos e flutuações das tensões no cabo umbilical, obtendo-se assim uma boa estimativa dos parâmetros das distribuições de probabilidade. Para a estimativa deste tempo se teve em conta o valor mínimo da freqüência (que me caracteriza o maior período) e a maior freqüência (que me caracteriza o menor período), estabelecendo assim que o tempo de simulação seria de 40 s com um período de 2 s. Os estados de mar presentes na plataforma GVA 4500 da Bacia de Campos são apresentados na tabela que segue (PETRECHE, 1990), Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Estados de mar da Bacia de Campos (PETRECHE, 1990)

Mar (k)	Altura significativa H_s (m)	Período médio T_z (s)	Probabilidade de ocorrência
1	0,75	5,24	0,0229
2	1,25	5,27	0,2561
3	1,75	5,77	0,3852
4	2,25	6,26	0,1962
5	2,75	6,89	0,0880
6	3,25	7,72	0,0328
7	3,75	7,89	0,0100
8	4,25	8,20	0,0068
9	4,75	9,00	0,0020
			$\Sigma = 1,0000$

Na Tabela 4.5, são apresentados os ângulos de fase aleatória (θ) obtidos para cada estado de mar (k) nos 25 valores de frequência (w).

Tabela 4.5 - Ângulos de fase aleatória (θ)

$\theta(t, 1)$	$\theta(t, 2)$	$\theta(t, 3)$	$\theta(t, 4)$	$\theta(t, 5)$	$\theta(t, 6)$	$\theta(t, 7)$	$\theta(t, 8)$	$\theta(t, 9)$
0,589789	1,585346	4,559591	3,900429	2,322943	3,428407	4,095476	3,549175	5,843948
0,853609	3,143765	5,862336	5,237899	3,102849	3,966651	3,54772	4,065947	0
1,918863	2,72936	5,13254	2,405957	1,747916	5,645626	2,917422	2,853662	4,808091
2,908209	1,181312	1,167352	1,417242	1,123718	3,814177	1,248287	2,484615	2,341343
2,409894	4,728368	5,259026	4,48434	1,941211	2,706411	3,844977	4,680832	5,364691
4,43944	2,916165	5,449804	3,264023	4,295725	6,046028	1,485467	2,998994	0,148735
2,187604	3,749838	5,157063	1,994416	6,283185	4,804571	2,276764	4,175728	3,555782
0	1,856786	6,283185	3,056518	2,982404	3,892319	3,209187	2,024061	3,992326
2,626311	1,948774	4,640168	0	2,218699	4,568884	4,635308	3,496582	3,244856
2,732306	3,414561	2,968556	4,924206	3,709877	2,758493	4,073204	5,108717	3,588168
3,15389	3,100905	3,843842	1,636207	1,878408	4,852353	1,528441	2,148967	1,559296
3,469077	5,732583	0	2,102237	5,497525	3,950238	5,708664	4,01268	2,158167
4,807376	2,523732	4,884516	5,331102	4,333854	4,497282	3,566072	3,333479	2,640313
1,667543	6,283185	4,288907	1,750759	0,738844	1,930942	6,283185	3,624352	4,470128
3,058061	5,219229	3,10543	2,541088	1,597674	5,894839	1,730145	3,11186	2,994774
2,586914	0	2,999119	2,39253	4,694335	4,204864	2,360528	0	6,283185
1,611746	0,399777	2,287153	5,777336	3,226949	0,596147	2,383199	3,501102	4,119311
6,283185	2,072734	4,013657	3,327234	3,234612	4,259363	3,359172	6,283185	1,017777
2,166572	2,658669	4,727497	1,477203	0	5,493817	2,073066	4,940849	3,199051
0,185736	2,952984	3,541252	1,408006	2,980203	4,518102	2,092388	3,078259	2,892619
5,653452	4,204316	3,257877	5,961914	3,685176	5,657147	0	2,5636	4,062396
3,169384	1,847958	4,0333	6,283185	1,648641	5,563629	2,278387	4,211614	3,560737
0,685263	1,849137	3,801332	5,801729	1,085284	2,142578	3,898163	3,066705	3,470283
3,676331	2,63545	2,493406	1,198759	2,343443	0	3,245867	2,804291	2,766274
4,793099	2,908556	6,253881	2,858439	1,006086	6,283185	3,269847	3,861213	3,802466

Os valores obtidos do deslocamento no tempo para cada estado de mar $h(t,k)$ são computados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores do deslocamento no tempo para cada estado de mar $h(t,k)$

t(seg.)	h(t, 1)	h(t, 2)	h(t, 3)	h(t, 4)	h(t, 5)	h(t, 6)	h(t, 7)	h(t, 8)	h(t, 9)
2	0,008001	0,02373	-0,03458	0,03557	-0,01496	-0,1881	0,222778	-0,43361	-0,2517
4	0,003524	0,007604	0,052105	0,052343	0,059441	-0,19953	0,354749	-0,01997	0,272832
6	-0,00732	-0,02491	0,058911	0,025624	0,060321	0,020574	-0,0252	0,408433	0,560919
8	-0,00276	-0,01192	-0,0172	-0,02595	-0,03902	0,173313	-0,37982	0,484668	0,445253
10	0,004295	0,01187	-0,06052	-0,05883	-0,11112	0,135107	-0,25597	0,096274	-0,0222
12	-0,0002	0,02345	-0,02097	-0,01687	-0,01952	0,004167	0,195648	-0,37191	-0,51938
14	0,000415	0,005523	0,044594	0,030548	0,115598	-0,0903	0,434675	-0,43442	-0,60582
16	-0,0004	-0,0337	0,045654	0,040731	0,104478	-0,09672	0,141224	-0,11265	-0,16684
18	-0,00254	-0,01754	-0,02143	0,036279	-0,03642	-0,05296	-0,32952	0,245882	0,462781
20	0,004515	0,031635	-0,04913	-0,02637	-0,14306	0,023946	-0,40356	0,344239	0,691285
22	5,07E-05	0,022849	-0,00296	-0,07962	-0,08949	0,087086	-0,01597	0,138014	0,24557
24	-0,00685	-0,01689	0,037996	-0,01706	0,077663	0,052865	0,37709	-0,11948	-0,40426
26	0,003064	-0,02372	0,023596	0,058354	0,161296	-0,01813	0,333895	-0,22788	-0,61532
28	0,004552	-0,00034	-0,02478	0,056695	0,046049	-0,02747	-0,07655	-0,18259	-0,28184
30	-0,00161	0,01969	-0,03335	0,007929	-0,11203	-0,00144	-0,3768	-0,00556	0,215232
32	-0,00076	0,011055	0,014163	-0,05756	-0,10849	0,003703	-0,25454	0,18513	0,456371
34	-0,00398	-0,01018	0,030316	-0,06011	-0,006	-0,03983	0,132271	0,208299	0,354746
36	-0,00042	-0,01423	-0,00191	0,013331	0,049859	-0,07708	0,348493	0,03635	0,065151
38	0,008627	-0,00056	-0,02336	0,055858	0,062263	0,00628	0,174449	-0,1683	-0,27358
40	-0,00081	0,012324	-0,01323	0,041157	0,053186	0,148794	-0,14166	-0,17776	-0,45892

Já tendo os valores do deslocamento no tempo para cada estado de mar $h(t,k)$, se fez necessário criar um modelo com o método de elementos finitos (MEF), que representa-se de maneira conservadora o cabo umbilical objeto de estudo neste trabalho, com a finalidade de obter o histórico de tensões que se geram no mesmo produto da elevação da plataforma, como consequência do efeito das ondas do mar.

4.8.2.2 Modelo de elementos finitos do cabo umbilical

Neste trabalho foi necessário o emprego do método dos elementos finitos (MEF) para avaliar aproximadamente o comportamento do cabo umbilical, levando em consideração o meio onde este opera, para de esta forma poder fazer inferências acerca de seu estado de confiabilidade, em função de dois mecanismos de falha que podem acontecer: falha por fadiga mecânica e falha por escoamento, ambos produzidos pelas ondas do mar atuantes no cabo umbilical.

O método dos elementos finitos é um método de cálculo numérico mediante o qual são discretizados elementos ou estruturas contínuas para chegar a modelos matemáticos discretos que facilitam as tarefas de engenharia podendo-se obter soluções aproximadas satisfatórias. (ZIENKIEWICZ, 1994).

Para a modelagem foi utilizado o código computacional ALGOR (2008).

4.8.2.3 Formulação do modelo físico

Para a análise das tensões e deformações, o cabo umbilical foi considerado como um cilindro de aço vazado. O critério adotado é conservador, já que têm em conta somente a influência das armaduras de tração no cabo, pelo que desconsidera o efeito das demais partes integrantes da estrutura. Esta adoção pode-se justificar, devido que as armaduras constituem o elemento preponderante na estrutura, já que elas são as responsáveis por suportar quase toda a carga de tração axial e a pressão externa. Para a análise hidrodinâmica foi considerado o cabo umbilical imerso na água, tendo em conta seu peso.

Como modelo do cabo umbilical escolheu-se um material com comportamento elástico e seção tipo tubo (*pipe*), com diâmetro exterior e interior de 96,6 mm e 91,0 mm respectivamente, para a armadura de tração externa.

Foram empregados na modelagem 20 elementos do tipo *BEAM* (estrutura de viga), com 21 nós para todo o modelo. Este tipo de elemento trabalha com três propriedades do material, as quais são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Propriedades do aço

Propriedades do Material (Aço)	Valores
Momento de Inércia	908.268,52 mm ⁴
Modulo de Elasticidade	206,04x10 ⁹ Pa
Coefficiente de Poisson	0,29

As hipóteses consideradas para a formulação do modelo são as seguintes:

- 1 - No extremo inferior (primeiro nó) foram restringidos todos os movimentos, representando um engastamento.
- 2 - Nesta modelagem somente foi considerado o movimento vertical do cabo umbilical produto da elevação vertical (Hz) da plataforma onde o cabo é fixado, pelo que será desconsiderado qualquer outro tipo de movimentação da plataforma.
- 3 - Tendo em conta o anterior, se aplicará no extremo superior (último nó) um deslocamento vertical (direção z) com um valor de altura de 0,058911 m. O critério de seleção deste valor de altura foi à adoção da maior altura obtida no estado de mar de maior probabilidade de ocorrência (k=3), a modo de exemplo para valorar a funcionabilidade do modelo.
- 4 - No modelo, o peso específico do cabo umbilical na água é considerado através de uma carga distribuída de valor 172 N/m (LÉPORE, 2003).
- 5 - Considerando que o comprimento do cabo umbilical é de 1.414,00 m, o peso total de este na água é de 243.208,00 N. O peso imposto a cada nó do modelo foi distribuído equitativamente ao longo do cabo, sendo que este valor seria a divisão do peso total do umbilical na água entre os 20 nós, uma vez discretizado o modelo.
- 6 - Os movimentos de rotação foram restringidos em todas as direções (x,y,z), já no caso da translação, foi limitada para os eixos (x,y), permitindo só a translação vertical no eixo (z), contando só com um grau de liberdade.

Resulta oportuno esclarecer que o modelo de elementos finitos formulado é um modelo simplificado que adota hipóteses conservadoras, o que possibilita optar pela integridade do cabo umbilical.

Na Figura 4.13, apresenta-se o modelo do cabo umbilical para um deslocamento vertical de 0,058911 m (seta apontando para acima) aplicado no extremo superior (último nó), assim como as restrições para a translação e rotação em cada nó, por exemplo: TxyRxyz, significa restrições de translação nos eixos x, y e restrições de rotação em todos os eixos. Apresenta-se, também, a distribuição do peso no cabo umbilical de 12 160 N (setas apontando para abaixo).

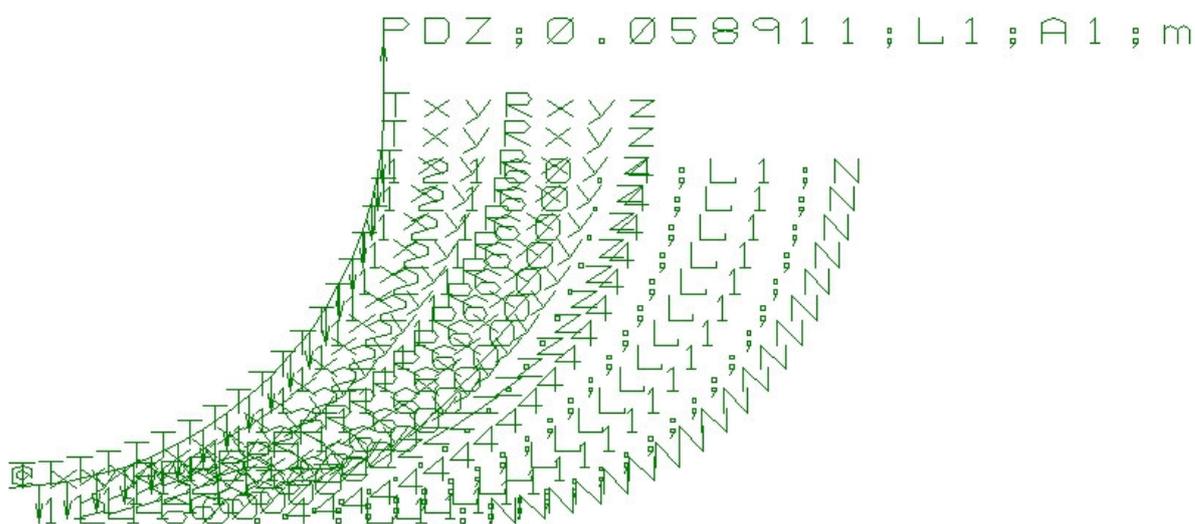


Figura 4.13 - Modelo de elementos finitos, onde se apresenta a distribuição do peso do cabo umbilical em cada nó, o deslocamento vertical assumido como carregamento e as condições de contorno consideradas na modelagem

Na Figura 4.14, apresenta-se às tensões equivalentes provocadas pelo carregamento, as quais consideram o efeito combinado da carga axial mais a flexão que sofre o cabo umbilical. Na mesma observam-se os valores de tensão provocados pela carga axial conjuntamente com o efeito da flexão, originados em cada nó devido ao deslocamento vertical (direção z) no cabo, o maior valor alcançado e de $2,9e+08$ Pa, isto significa que no extremo superior e onde o cabo encontra-se submetido às maiores tensões.

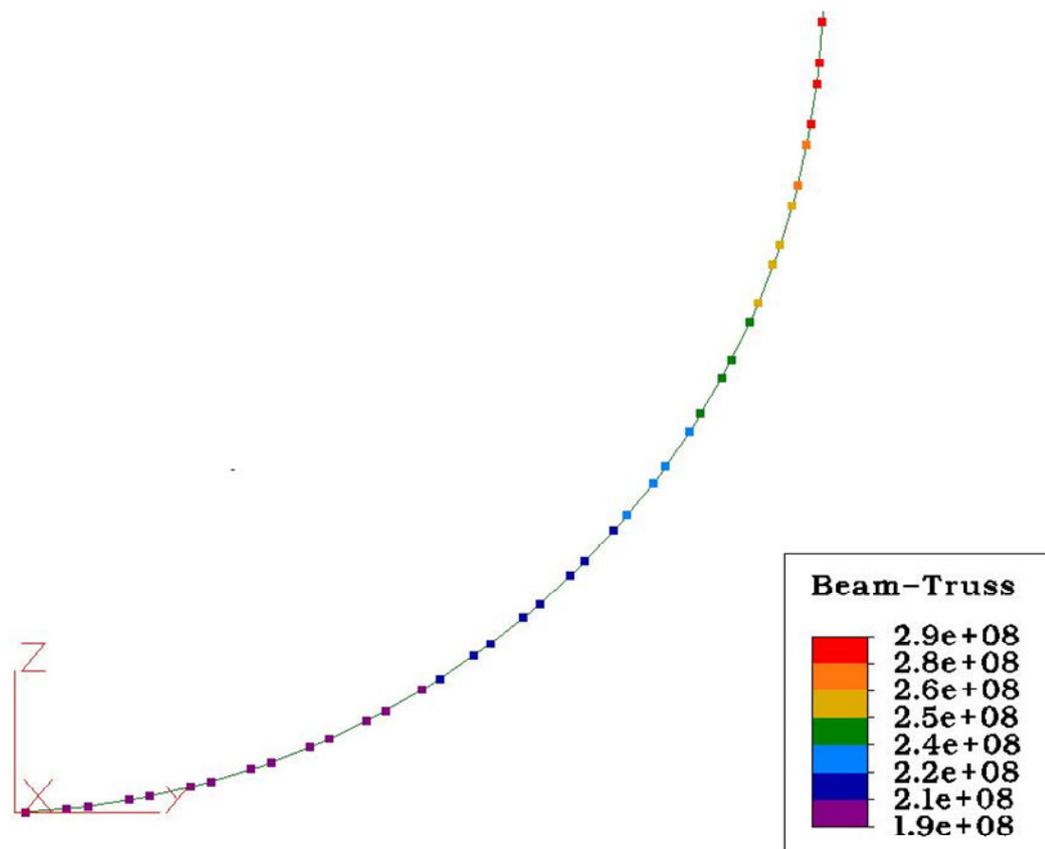


Figura 4.14 - Distribuição de tensões considerando a carga axial mais o efeito da flexão (Pa)

Com o modelo criado do cabo umbilical no MEF é possível obter os valores de tensões ao longo do seu comprimento ao ser aplicado um deslocamento vertical no seu extremo superior. O deslocamento imposto permite a determinação do histórico de tensões, para um tempo de simulação (já comentado neste estudo), se se substitui o deslocamento (H_z), por os valores no tempo do movimento vertical da plataforma $h(t,k)$ para cada estado de mar.

Partes das listagens dos resultados das tensões obtidas a partir do ALGOR (2008) são ilustradas no (ANEXO C).

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O cabo umbilical considerado no exemplo de aplicação deste trabalho, encontra-se instalado na plataforma semi-submersível GVA 4500 que opera na Bacia de Campos numa lâmina d'água de 1000 m.

O cabo submarino eletro - óptico modelo (3x240 mm² 12/20 kV + 12 FO SM) é empregado em uso estático e dinâmico até profundidades de 1.500 m. O mesmo têm capacidade para transmitir entre 12 e 24 kV de energia elétrica.

Seu diâmetro externo é de 108,5 mm e seu núcleo funcional está composto por três cabos de cobre os quais têm como função conduzir energia elétrica e, um cabo de fibra óptica, responsável pela transmissão de sinais. A camada polimérica externa do cabo é feita de polietileno de alta densidade (HDPE), extrudada sobre as armaduras de tração externa de aço galvanizado.

A armadura de tração externa têm uma espessura de 2,8 mm, com um diâmetro interior e exterior de 91,0 mm e 96,6 mm respectivamente (vide Figura 2.1, página 8). Está composta por 33 arames de secção retangular, dispostos em forma helicoidal no cabo umbilical. Como já foi exposto neste trabalho, a mesma será considerada como um cilindro vazado de aço a modo de simplificação.

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE CONFIABILIDADE

Utilizando as equações descritas no Capítulo 4 é possível resumir a metodologia de aplicação do modelo de confiabilidade proposto, conforme apresentado na Figura 5.1. A seguir descreve-se a seqüência de passos para a complementação desta metodologia:

- 1 - Determinar os valores no tempo do movimento vertical da plataforma para cada estado de mar $h(t, k)$, que é igual ao deslocamento do cabo umbilical no seu extremo superior. Para esta determinação se faz necessário programar

em código MATLAB (2008) as equações (4.8), (4.9), (4.10), (4.31), (4.32) e (4.33); obtendo-se a função $h(t,k)$ para cada estado de mar dos nove considerados neste trabalho (ANEXO B5).

- 2 - Utilizar o código ALGOR (2008) e o modelo do cabo umbilical desenvolvido pelo Método de Elementos Finitos (MEF), para determinar o histórico de tensões ao longo do comprimento do umbilical $\sigma(t,k)$, entrando como variável ao modelo o deslocamento obtido no passo anterior $h(t,k)$. Parte das listagens dos valores de tensões reportados do ALGOR (2008) são apresentados no (ANEXO C).
- 3 - Uma vez obtido o histórico de tensões para cada estado de mar $\sigma(t,k)$, são selecionadas as tensões correspondentes ao nó 21 do modelo (último nó superior). Esta seleção se baseia em que neste nó é onde se reportam os valores maiores de tensões no cabo umbilical.
- 4 - Determinar a distribuição de picos das tensões. Para isto serão contados os picos acima da tensão média e serão estimados os parâmetros da função de densidade de probabilidade gama generalizada, obtendo-se assim as fdp de curto prazo para a tensão estática em cada estado de mar $f_{\hat{\sigma}_{est_k}}(\hat{\sigma}_{est})$. O exposto anteriormente foi programado no MATLAB (2008), (programa miFatiguecalc.m) e pode ser consultado no (ANEXO B1).
- 5 - Ponderar as respectivas fdp obtidas de curto prazo para alcançar a distribuição de picos ao longo prazo da tensão estática. $f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$, segundo a equação (4.24), que foi implementada no MATLAB (2008), (programa miFatiguecalc.m), vide (ANEXO B1).
- 6 - Aplicar no histórico o método de contagem *Rainflow* (ANEXO B4) para determinar a distribuição das flutuações de tensões, fazendo a seguir a correção da tensão pela tensão alternada corrigida $(\sigma_a)_c$ empregando o critério de Goodman. Esta correção foi programada no MATLAB (2008), (programa rhistTc.m), vide (ANEXO B2). Após estimar os parâmetros da função de densidade de probabilidade gama generalizada, obtém-se a fdp de curto prazo $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$ para cada estado de mar, que de igual modo foi

implementada no MATLAB (2008), (programa miFatiguecalc.m) que pode ser verificada no (ANEXO B1).

- 7 - Ponderar as respectivas fdp obtidas de curto prazo para alcançar a distribuição de flutuações de longo prazo da tensão alternada corrigida $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$, segundo a equação (4.26), que foi implementada no MATLAB (2008), (programa miFatiguecalc.m), vide (ANEXO B1).
- 8 - Combinando as funções de densidade de probabilidade $f(S_e)$ e $f_{\hat{\sigma}_{est}}(\hat{\sigma}_{est})$, se determina a probabilidade de que ocorra falha por escoamento através da equação (4.28), empregando para isto as funções de integração numérica do MATLAB (2008), (ANEXO B6). No (ANEXO E), se apresenta a superfície tridimensional que representa a probabilidade conjunta da tensão de escoamento e da tensão estática. A linha tracejada indica a região que limita o volume da superfície tridimensional, cujo valor é a probabilidade de falha.
- 9 - Combinando as funções de probabilidades $f(S_f)$ e $f_{(\sigma_a)_c}(\sigma_a)_c$, se determina a probabilidade de que ocorra falha por fadiga através da equação (4.29), empregando para isto as funções de integração numérica do MATLAB (2008), (ANEXO B6). No (ANEXO E), se apresenta a superfície tridimensional que representa a probabilidade conjunta do limite de resistência à fadiga e a tensão alternada corrigida. A linha tracejada indica a região que limita o volume da superfície tridimensional, cujo valor é a probabilidade de falha.
- 10 - O critério de confiabilidade se reporta através da probabilidade de falha obtida dos mecanismos analisados nos passos 8 e 9 sendo que:
 - A probabilidade de que ocorra falha por escoamento é de 0,1087, o que significa que existe um 11% de possibilidades de que a tensão estática seja superior ao escoamento do material ($\sigma_{est} > S_e$).
 - A probabilidade de que ocorra falha por fadiga mecânica é de 0,0144, isto pode ser interpretado como que existe aproximadamente 1,5% de possibilidades de que a tensão alternada corrigida ultrapasse o limite de resistência à fadiga do material ($(\sigma_a)_c > S_f$).

- A probabilidade conjunta de que ocorra falha por fadiga e/ou falha por escoamento ($P(A \cup B)$), se encontra no intervalo de:

$$0,1087 \leq P(A \cup B) \leq 0,1231$$

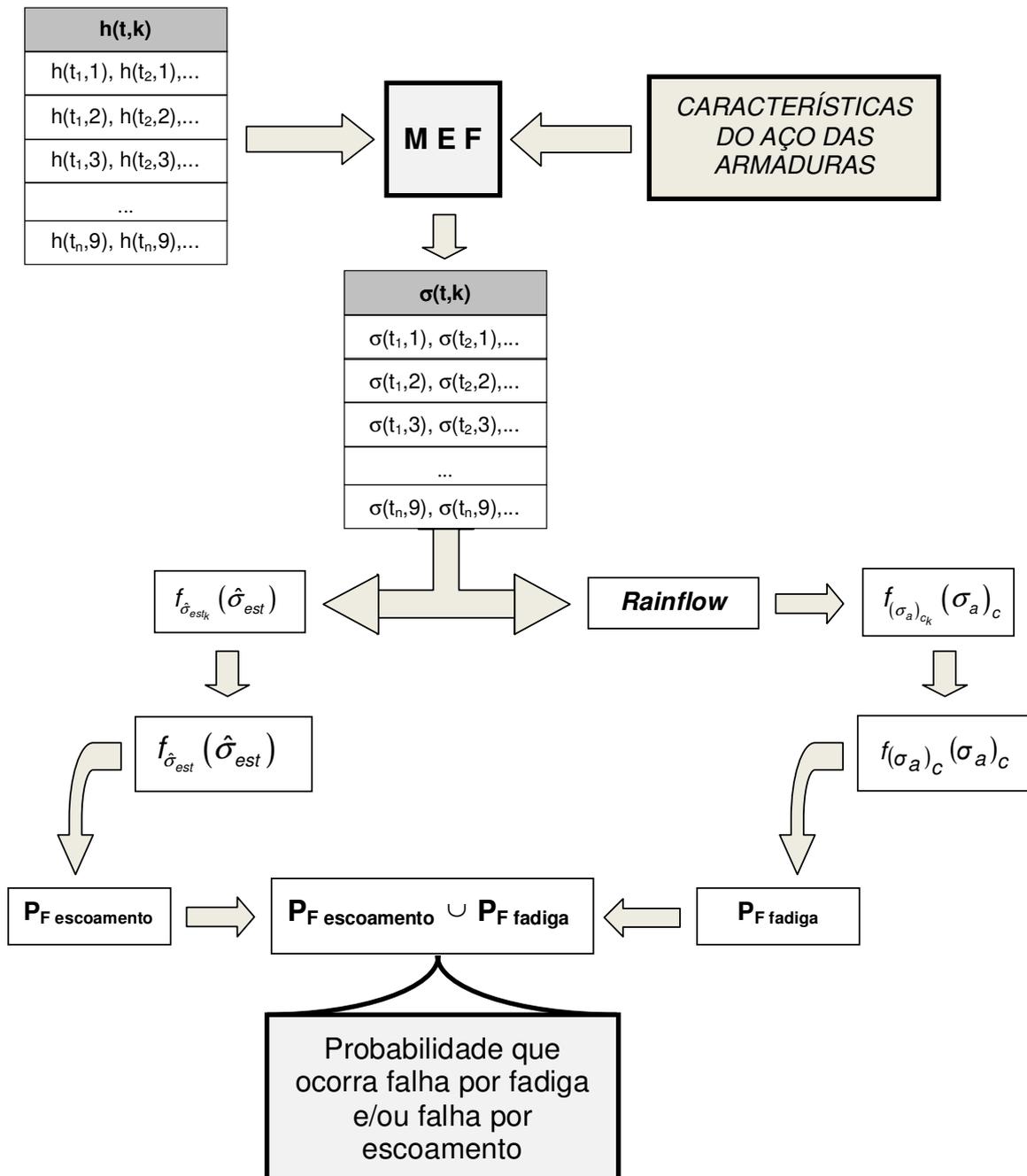


Figura 5.1 - Metodologia de aplicação do modelo de confiabilidade

6 CONCLUSÕES

As principais conclusões inferidas com o desenvolvimento deste estudo são as seguintes:

- 1 - A primeira e mais significativa conclusão deste trabalho é o estabelecimento de um modelo de confiabilidade estrutural que caracteriza a probabilidade de ocorrência de falha tendo em conta dois mecanismos: falha por escoamento e por fadiga mecânica, caracterizados pelas funções de densidade de probabilidade que caracterizam o carregamento atuante no cabo umbilical e a função de densidade de probabilidade que define a propriedade do material, do componente estrutural estudado, que neste estudo foram as armaduras de tração, fabricadas de aço carbono galvanizado. Pode-se dizer que a metodologia implementada neste trabalho permite obter a probabilidade de acontecer falha por escoamento e falha por fadiga mecânica nas armaduras de tração do cabo umbilical.
- 2 - Como segunda conclusão pode-se citar a implementação de um modelo simples do cabo umbilical através do Método de Elementos Finitos, que adotando hipóteses simplificadoras, permitiu obter o histórico de tensões no tempo, para poder estimar as funções de densidade de probabilidade da tensão estática e da tensão alternada corrigida para curto e longo prazo que caracterizaram o carregamento atuante provocado pela incidência das ondas do mar.
- 3 - A partir dos resultados dos ensaios de tração considerados neste trabalho, foi possível determinar as funções de densidade de probabilidade de longo prazo que melhor caracterizaram as propriedades do material estudadas, limite de escoamento e limite de resistência à fadiga do aço carbono galvanizado.
- 4 - Foram implementadas em código MATLAB (2008) funções para calcular numericamente as equações abordadas no capítulo 4, assim como para o cálculo da probabilidade de falha reportada neste trabalho.
- 5 - A probabilidade de falha por fadiga mecânica é muito menor do que a probabilidade de falha por escoamento, ocorrendo 1,5%.das vezes.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do presente estudo incentiva à apresentação das seguintes recomendações:

- 1 - Reformular o Modelo de Elementos Finitos (MEF) para o cabo umbilical que tenha em consideração a natureza dinâmica do mesmo.
- 2 - Considerar na análise de fadiga mecânica a influência do meio corrosivo em que se encontra o cabo umbilical.
- 3 - Analisar a influência do *fretting* no fenômeno de fadiga, já que o fato dos arames encontrarem-se superpostos, devido a sua distribuição geométrica no cabo, favorece a existência de um processo de interação ou fricção entre eles, porem a probabilidade de acontecer desgaste superficial entre os arames.
- 4 - Realizar ensaios de fadiga aos arames das armaduras de tração.
- 5 - Realizar ensaios de tração nos arames das armaduras para obter o valor da tensão de escoamento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGOR CENTER FOR MECHANICAL DESIGN TECHNOLOGY. Disponível em : <<http://www.algor.com>>. Acesso em: fevereiro de 2008.

ARANHA, J. A. P.; PESCE, C. P.; MARTINS, C. A. **Mecânica de cabos submersos. Comportamento dinâmico**. 63p. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992. (Monografia nº 76/92).

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and selection: irons and steels**. Metals Park, Ohio : American Society for Metals, 1978. v. 1.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and Selection: irons, Steels, and High-Performance Alloys**. Materials Park, OH : ASM International, 1993. v.1.

ASTM E 1049-85 (Reapproved 1997) **Standard practices for cycle counting in fatigue analysis**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, Pa.: ASTM 1999.v. 3 ,p. 710-718.

CÁRDENAS, N.O. **Análise da influência dos carregamentos cíclicos sobre o comportamento mecânico das camadas poliméricas de cabos submarinos eletro ópticos**. 2002. 108 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CÁRDENAS, N.O. **Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais**. 2007. 190 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CÁRDENAS, N.O.; GONÇALVES, E. Influência das deformações cíclicas no comportamento mecânico das camadas poliméricas dos cabos submarinos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 3., Belém, 2004. **CONEM 2004**: anais. Belém do Pará : Abcm, 2004.

CLICKMACAE. Disponível em: < <http://www.clickmacae.com.br> >. Acesso em: agosto de 2008.

DE OLIVEIRA, G. J. R. **Ferramentas computacionais para otimização e síntese de sistemas híbridos de risers baseados no conceito de bóia de subsuperfície**. 2004. 138 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil. Coordenação

dos programas de pós-graduação de engenharia (COPPE), Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2004.

DIAS, C.A.N. **Método para a prevenção de vibrações da estrutura do navio**. 1984. 206 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

DUARTE DE LEMOS, C. A. **Análise de fadiga em risers flexíveis**. 2005. 248 p. Tese (Doutorado)- Departamento de Engenharia Oceânica. Coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia (COPPE), Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2005.

FARIAS, M.C.M. **Influência da velocidade de deslizamento, da carga normal e da transformação martensítica induzida por deformação plástica na resistência ao desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos**. 2004. 173 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I. **Metal fatigue in engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 318 p.

GONÇALVES, E. **Fundamentos da análise de fadiga**. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica, 2005. (Anotações de aula da disciplina, PMR-5205).

HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. 5.ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education, 2003. 848 p.

HERTZBERG, R. W.; MANSON, J. A. **Fatigue of engineering plastic**. New York: Academic Press, 1980. 295 p.

HOUGAZ, A. B; GONÇALVES, E. Probabilistic fatigue curve estimation for reinforcement wires of flexible risers. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 16., San Francisco, 2006. **ISOPE**: proceedings. Cupertino, Calif.:International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006.

HUGHES, O.F. **Ship structural design**. New York :John Wiley & Sons,1988. 565p.

LEMAITRE, J. **A course on damage mechanics**. 2.ed. Berlin: Springer, 1996. 228p.

LÉPORE, P. F. **Implantação de um procedimento de projeto estrutural e homologação de umbilicais**. 2003. 200 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MEYER, P. L. **Probabilidade**: aplicações à estatística. 2^{ed.}. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. 391p.

MATHWORKS ACCELERATING THE PACE OF ENGINEERING AND SCIENCE. **Plataforma de windows**, Versão 7.0.1. Disponível em: <<http://matlab.com>>. Acesso em: abril de 2008.

MATWEB. Disponível em: <<http://www.matweb.com/>>. Acesso em: maio de 2007.

MOURA B, C., FERNANDES A. A. E CASTRO, P.M.S.T. **Fadiga de estruturas soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

OCHI, M.K. Generalization of Rayleigh probability distribution and its applications. **Journal of Ship Research**, v. 22, No.4, p. 259-265. Dec., 1978.

PANOSSIAN, Z. **Revestimentos Metálicos para proteção contra a corrosão**. São Paulo: ABM, 2003. 94p.

PETRECHE, J. R .D. **Análise espectral aplicada ao cálculo da resposta extrema de linhas flexíveis**. 1996. 100 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

PETRECHE, J. R .D. **Análise probabilística do comportamento dinâmico de linhas de amarração**. 1990. 225 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

POPOV, E. P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1978. 534 p.

SCHNEIDER, J. **Introduction to safety and reliability of structures**. [Zürich]: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1997.

SMITH, E. W.; PASCOE. K. J. The behaviour of fatigue cracks subject to applied biaxial stress: a review of experimental evidence. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 6, No. 3, p. 201-224, 1983.

SOUZA, G. F. M. **Análise de confiabilidade estrutural à fadiga de risers rígidos**. 1994. 350 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1982. 286 p.

SOUZA, G. F. M. **Análise de confiabilidade aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica, 2005. (Apostila da disciplina PMR-5201).

SUH, N. P.; TURNER, P. L. **Elements of the behavior of solid**. Washington, D. C: McGraw-Hill, 1985. 615p.

SUNDARARAJAN, C. **Probabilistic structural mechanics handbook: theory and industrial applications**. New York: Chapman and Hall, 1995. 745p.

SUÑÉ, D. C.; GONÇALVES, E.; CÁRDENAS, N. O.; VALIN, J. L. R. Caracterização mecânica e metalográfica das armaduras de tração de um cabo umbilical. In: CONVENCION CIENTÍFICA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA, 13., Ciudad de La Habana, Cuba. [S.l.:s.n.], 2006. p. 30.

THOFT-CHRISTENSEN, P.; MUROTSU, Y. **Application of structural systems reliability theory**. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 343 p.

TORRES, F. L. **Análise estrutural de linhas flexíveis pelo método de elementos finitos**. 1996. 68 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

VIGNOLES, M. A. **Análises determinística e aleatória no cálculo da vida à fadiga das armaduras metálicas de risers flexíveis**. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Oceânica – Coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia (COPPE.), Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2002.

WITZ, J. A.; TAN, Z. On the axial-torsional structural behaviour of flexible pipes, umbilicals and marine cables. **Marine Structures**, v. 5, p. 205-227, 1992.

WITZ, J. A.; TAN, Z. On the flexural structural behaviour of flexible pipes, umbilicals and marine cables. **Marine Structures**. v. 5, p. 229-249, 1992.

ZIENKIEWICZ, O.C.;TAYLOR, R.L. **The finite element method.** 3.ed. London: McGraw-Hill, 1994.

ANEXO A VALORES DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS

Tabela A 1 - Valores das variáveis geométricas das amostras ensaiadas

Amostra	a (mm)	b (mm)	c (mm)	r (mm)	A₀ (mm²)	Max F (KN)
1	7,80	3,00	8,00	0,07	23,40	22,09
2	7,90	2,90	8,00	0,09	22,90	22,17
3	7,90	2,90	8,00	0,09	22,90	21,84
4	7,80	3,10	8,00	0,08	24,17	21,56
5	7,80	2,90	7,50	0,17	22,60	22,17
6	7,90	2,95	8,00	0,09	23,30	20,90
7	7,90	2,80	8,00	0,08	22,11	22,04
8	7,70	2,80	8,00	0,04	21,56	21,86
9	7,80	2,90	8,00	0,07	22,62	22,06
10	7,80	2,70	8,00	0,05	21,06	21,78
11	7,90	2,90	8,00	0,09	22,90	21,09
12	7,80	2,90	8,00	0,07	22,62	21,88
13	7,70	3,00	8,10	0,03	23,10	21,91
14	7,80	3,10	8,00	0,08	24,17	22,04
15	7,70	2,80	8,00	0,04	21,56	22,23
16	7,80	3,00	7,30	0,22	23,36	21,22
17	7,90	3,10	8,00	0,10	24,48	21,39
18	7,70	3,10	7,10	0,25	23,82	21,95
19	7,90	2,90	8,10	0,07	22,91	22,08
20	7,80	2,70	8,00	0,05	21,06	22,09
21	7,80	3,00	7,20	0,24	23,35	21,84
22	7,70	2,90	7,80	0,09	22,32	21,73
23	7,90	3,00	8,00	0,09	23,69	22,20
24	7,85	3,10	8,00	0,09	24,33	21,70
25	7,90	2,85	8,00	0,08	22,51	21,21
26	7,80	2,90	7,70	0,13	22,61	22,30
27	7,90	3,00	7,60	0,18	23,67	20,89
28	7,90	3,00	7,90	0,11	23,69	21,69
29	7,80	2,80	7,70	0,12	21,83	20,75
30	7,80	3,10	8,10	0,06	24,18	21,99
31	7,70	3,00	7,20	0,22	23,06	22,16
32	7,90	3,00	7,50	0,20	23,67	22,25

Amostra	a (mm)	b (mm)	c (mm)	r (mm)	A₀ (mm²)	Max F (KN)
33	7,95	3,00	8,00	0,10	23,84	20,81
34	7,80	2,90	7,00	0,27	22,56	21,41
35	7,80	3,00	8,30	0,01	23,40	21,02
36	7,85	3,10	8,00	0,09	24,33	21,88
37	7,70	2,80	8,00	0,04	21,56	22,16
38	7,80	3,10	8,00	0,08	24,17	21,69
39	7,90	3,00	8,00	0,09	23,69	21,39
40	7,90	3,10	7,20	0,27	24,43	22,15
41	7,80	3,10	8,00	0,08	24,17	22,20
42	7,95	2,90	7,80	0,14	23,04	22,13
43	7,80	2,75	7,20	0,22	21,41	22,09
44	7,80	3,00	8,20	0,03	23,40	21,71
45	7,80	2,90	8,00	0,07	22,62	21,99
46	7,90	2,90	7,50	0,19	22,88	22,13
47	7,95	2,80	7,50	0,19	22,23	22,08
48	7,80	2,90	8,00	0,07	22,62	21,26
49	7,85	2,90	8,00	0,08	22,76	21,96
50	7,90	2,90	8,00	0,09	22,90	21,21

Conclusão da Tabela A 1

ANEXO B PROGRAMAS MATLAB

Anexo B1 - Programa mifatiguecalc.m

```
function fatiguecalc

%%%%%%%%% LEITURA DOS DADOS REFERENTE ÀS TENSÕES (MEF)
mt=load('Dagnem3out.txt');
mt=reshape(mt(:,2),20,180);
mm=mt(1,:);
m21=reshape(mm,20,9);
%%%%%%%%%%%%% INICIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA FDP CURTO E LARGO PRAZO
cj=[];
mj=[];
lj=[];
Tj=[];
nj=[];
tmaxj=[];
meanj=[];

cAj=[];
mAj=[];
lAj=[];
TAj=[];
nAj=[];
tamaxj=[];
%%%%%%%%%%%%% DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO GAMA GENERALIZADA%%%%%%%%%%%%%
migamma=inline('(par(1)/gamma(par(2))*(par(3).^(par(1)*par(2))).*(x.^(par(1)*par(2)-1))).*exp(-(par(3).*x).^par(1))','par','x');

h= waitbar(0,'espere..');
for k=1:9
mt1=m21(:,k); % ESTADOS DE MAR

% AQUI OBTEM-SE A DISTRIBUIÇÃO DOS PICOS
meanj(k)=mean(mt1);
tpc=mt1(find(mt1>=mean(mt1)))-meanj(k); % SE RESTA O VALOR MÉDIO DA TENSÃO
ESTÁTICA (CORREÇÃO DA TENSÃO)
tpc=procurapicos(tpc); % SE PROCURAM OS PICOS
[dp,tpb]=hist(tpc,5);
tmaxj(k)=max(abs(tpb));
tpb=tpb/tmaxj(k);
dp=dp./sum(dp);

% PARA AS FLUTUAÇÕES
ext=sig2ext(mt1);
rf=rainflow(ext); % RAINFLOW
[dac,tab]=rfhistTc(rf,5); % SE CORRIGEM AS TENSÕES E SE GRAFICA O
HISTOGRAMA
tamaxj(k)=max(abs(tab));
tab=tab/tamaxj(k);
dac=dac./sum(dac);

figure;
bar(tpb,dp);
hold all;
%%%%%%%%%%%%%AJUSTE DAS FDP DE CURTO PRAZO DOS PICOS À GAMA GENERALIZADA
```

```

if k>1,
    abcn=nlinfit(tpb,dp,migamma,[mj(end) lj(end) cj(end)]);
else
    abcn=nlinfit(tpb,dp,migamma,[9.87,0.1918,1.6027]);
end
xx=tpb(1):0.01:tpb(end);
plot(xx,migamma([abcn(1),abcn(2),abcn(3)],xx));

cj=[cj,abcn(3)];
mj=[mj,abcn(1)];
lj=[lj,abcn(2)];
Tj=[Tj,120];
nj=[nj,sum(dp)];

%%%%%%%%%%AJUSTE DAS FDP DE CURTO PRAZO DAS FLUTUAÇÕES À GAMA GENERALIZADA
figure;
bar(tab,dac);
hold all;

if k>1,
    abcn=nlinfit(tab,dac,migamma,[mAj(end) lAj(end) cAj(end)]);
else
    abcn=nlinfit(tab,dac,migamma,[0.5,4.1,19]);
end

xx=tab(1):0.01:tab(end);
plot(xx,migamma([abcn(1),abcn(2),abcn(3)],xx));

cAj=[cAj,abcn(3)];
mAj=[mAj,abcn(1)];
lAj=[lAj,abcn(2)];
TAj=[TAj,120];
nAj=[nAj,sum(dac)];

waitbar(k/9,h);
end % del for
close(h);

%%%%%%%%%%AQUI SE CALCULA A FDP DE LONGO PRAZO PARA A TENSÃO ESTÁTICA E A
TENSÃO ALTERNADA CORRIGIDA A PARTIR DA FDP DE CURTO PRAZO DOS PICOS E DAS
FLUTUAÇÕES
xx=0:1/8:1;
Pp=[];
Pf=[];
for e=1:9
    Pp=[Pp;PBj(e).*(nj(e)/Tj(e)).*migamma([mj(e),lj(e),cj(e)],xx)];
    Pf=[Pf;PBj(e).*(nAj(e)/TAj(e)).*migamma([mAj(e),lAj(e),cAj(e)],xx)];
end
Pp=Pp/sum(PBj'.*(nj./Tj));
Pf=Pf/sum(PBj'.*(nAj/TAj));

% PLOTAR AS FDP DA GAMA GENERALIZADA DE LONGO PRAZO COM AS FDP DO LIMITE
ESCOAMENTO E LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA
format short;
EM = xlsread('escoamento.xls'); % ESTADOS DE MAR
EM=EM/1e2; % CORREÇÃO DAS UNIDADES

figure;
plot(xx + mean(meanj),sum(Pp));
hold all;

```

```
[xdata,ydata]=myhistfit(EM(:,3));  
plot(xdata,ydata*5);
```

```
figure;  
plot(xx,sum(Pf));  
hold all;  
[xdata,ydata]=myhistfit(EM(:,3));  
plot(xdata,ydata*5);
```

Anexo B2 - Programa rfhistTc.m

```

function [N1,x] = rfhistTc(rf,x)
% rfhist - histogram for use with rainflow data.
%
% function [no,xo] = rfhist(rf,x,rfflag)
%
% Syntax: rfhist(rf)
%         rfhist(rf,30)
%         rfhist(rf,-55:10:55,'mean')
%         [no,xo]=rfhist(rf,30);
%
% Input: rf      - rainflow data from rainflow function,
%              see RAINFLOW for more details,
%              x      - when x is a scalar, uses x bins or when
%              x is a vector, returns the distribution of rf
%              among bins with centers specified by x, like in hist(),
%              rfflag - string, data type flag,
%              'ampl' for amplitude,
%              'mean' for mean value,
%              'freq' for frequency and 'period' for time period of
%              extracted cycles.
%
% Output: no - vector, number of extracted cycles,
%         xo - vector, bin locations.
%
% See also: HIST, RAINFLOW.

% By Adam Nies3ony, 10-Aug-2003
% ajn@po.opole.pl

error(nargchk(1,3,nargin))

% histogram
halfc=find(rf(3,:)==0.5);      % FIND HALF-CYCLE
Su=950e6;
tac=rf(1,:)./(1-(rf(2,:)/Su)); % CALCULAR A TENSÃO ALTERNADA CORRIGIDA

[N1 x]=hist(tac,x);          % FOR ALL DATA
if ~isempty(halfc),
    [N2 x]=hist(tac(halfc),x); % ONLY FOR HALF-CYCLE
    N1=N1-0.5*N2;
end
N1=N1/sum(N1);

```

Anexo B3 - Programa procurapicos.m

```
function pic=procurapicos(picos)
% esta função busca os picos, nota: versão bruta não otimizada
pp=0;
for i=1:length(picos)
    if (i==1)
        if(picos(i)>picos(i+1)),
            pp=pp+1;
            pic(pp)=picos(i);
        end
    elseif (i==length(picos))
        if (picos(i)>picos(i-1)),
            pp=pp+1;
            pic(pp)=picos(i);
        end
    elseif (picos(i)>picos(i-1)) & (picos(i)>picos(i+1)),
        pp=pp+1;
        pic(pp)=picos(i);
    end
end
end
```

Anexo B4 - Programa Rainflow.m

```
% RAINFLOW cycle counting.
% RAINFLOW counting function allows you to extract
% cycle from random loading.
%
% SYNTAX
% rf = RAINFLOW(ext)
% rf = RAINFLOW(ext, dt)
% rf = RAINFLOW(ext, extt)
%
% OUTPUT
% rf - rainflow cycles: matrix 3xn or 5xn dependend on input,
% rf(1,:) Cycles amplitude,
% rf(2,:) Cycles mean value,
% rf(3,:) Number of cycles (0.5 or 1.0),
% rf(4,:) Begining time (when input includes dt or extt data),
% rf(5,:) Cycle period (when input includes dt or extt data),
%
% INPUT
% ext - signal points, vector nx1, ONLY TURNING POINTS!,
% dt - sampling time, positive number, when the turning points
% spaced equally,
% extt - signal time, vector nx1, exact time of occurrence of turning
points.
%
%
% See also SIG2EXT, RFHIST, RFMATRIX, RFPDF3D.
%
% RAINFLOW
% Copyright (c) 1999-2002 by Adam Nieslony,
% MEX function.
```

Anexo B5 - Programa para cálculo de densidades espectrais

```

EM = xlsread('ESTADOS DE MAR.xls'); % estados de mar
EM_O = EM(:,1); % ordem do estado de mar
EM_Hs = EM(:,2); % altura significativa de todos os estado de mar
EM_Pm = EM(:,3); % Período médio
EM_Pb = EM(:,4); % Probabilidades dos estados de mar

W_RAO = xlsread('FREQ-RAO-FASE.xls'); % estados de mar
W_RAO_W = W_RAO(:,1); % frequencia da onda
W_RAO_R = W_RAO(:,2); % RAO

figure('NumberTitle','off');
for k = 1:length(EM_O)
    for l = 1: length(W_RAO_W)
        C1 = (0.11*(2*pi)^4)*(EM_Hs(k)^2/EM_Pm(k)^4);
        C2 = -(0.44*(2*pi)^4)/EM_Pm(k)^4;
        S(l,k) = (C1/W_RAO_W(l)^5).*exp(C2/(W_RAO_W(l)).^4);
    end
    plot(S(:,k))
    hold on
end
title('Função de densidade espectral das ondas')
xlabel('w(rad/seg)')
ylabel('S(w,k)')

figure('NumberTitle','off');
for k = 1:length(EM_O)
    for l = 1: length(W_RAO_W)
        Sh(l,k) = (W_RAO_R(l).^2) .* S(l,k);
    end
    plot(Sh(:,k))
    hold on
end
title('Função de densidade espectral do deslocamento na plataforma')
xlabel('w(rad/seg)')
ylabel('S_h(w,k)')

figure('NumberTitle','off');
for k = 1:length(EM_O)
    for l = 1: length(W_RAO_W)
        if l == 1, dw = W_RAO_W(l)-0; else dw = W_RAO_W(l)-W_RAO_W(l-1);end
        a(l,k) = sqrt(2*Sh(l,k)*dw);
    end
    plot(a(:,k))
    hold on
end
title('Amplitude da onda')
xlabel('w(rad/seg)')
ylabel('a(w,k)')

figure('NumberTitle','off');
t=2:2:40;

for k = 1:length(EM_O)
    suma = zeros(size(t));
    % para gerar ângulo de fase aleatoria
    W_RAO_F(:,k) = randn(1,length(W_RAO_W));

```

```
maxF = max(W_RAO_F(:,k));
minF = min(W_RAO_F(:,k));
W_RAO_F(:,k) = ( (W_RAO_F(:,k) - minF)/(maxF-minF) ) * (2*pi - (0)) )
+ (0); % para levar a fase aleatoria entre 0 y 2pi
for s = 1: length(W_RAO_W)
    suma = suma + a(s,k)*cos(-W_RAO_W(s) * t + W_RAO_F(s,k));
end
u(:,k)=suma;
end

plot(u)
title('Deslocamentos da plataforma para cada estado de mar')
xlabel('t(seg)')
ylabel('h(t,k)')
```

Anexo B6 - Programa calcprob.m

```

function I=calcProb
% calcula a probabilidade de falha por escoamento e por fadiga mecânica

h=openfig('fluctuaciones.fig');
ax=get(h,'currentaxes');
chld=get(ax,'children');
xdata1=get(chld(1),'xdata');
ydata1=get(chld(1),'ydata');
xdata2=get(chld(2),'xdata');
ydata2=get(chld(2),'ydata');

interv=(xdata1(2)-xdata1(1));
xxa=0:interv:xdata1(1)-interv;
xxd=xdata1(end)+interv:interv:10;
xd1=[xxa,xdata1,xxd];
yd1=[zeros(1,length(xxa)),ydata1,zeros(1,length(xxd))];

interv=(xdata2(2)-xdata2(1));
xxa=0:interv:xdata2(1)-interv;
xxd=xdata2(end)+interv:interv:10;
xd2=[xxa,xdata2,xxd];
yd2=[zeros(1,length(xxa)),ydata2,zeros(1,length(xxd))];

I=quadl(@myintfun,0,max(xd1),1e-6);

function y=myfun(x)
    y=interp1(xd1,yd1,x,'linear');
end

function y=myintfun(x)
    for i=1:length(x)
        fx=interp1(xd2,yd2,x(i),'linear');
        y(i)=quadl(@myfun,0,x(i),1e-6)*fx;
    end
end

end

```

ANEXO C MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (PROGRAMA EM ALGOR)

LISTAGEM DAS SAÍDAS DO ALGOR

TENSÕES PARA 4 ESTADOS DE MAR

(ESTADO DE MAR 6)

Tensões cédula 1,6- $h=-0.1881$

Output of Beam: Worst Stress.

Group 1 of type 22

Ele #:	(node)	value	...
1:	(1)	-3.280E+007	(2) -3.280E+007
2:	(2)	-4.480E+007	(3) -4.480E+007
3:	(3)	3.991E+007	(4) 3.991E+007
4:	(4)	8.117E+007	(5) 8.117E+007
5:	(5)	1.061E+008	(6) 1.061E+008
6:	(6)	1.234E+008	(7) 1.234E+008
7:	(7)	1.364E+008	(8) 1.364E+008
8:	(8)	1.471E+008	(9) 1.471E+008
9:	(9)	1.564E+008	(10) 1.564E+008
10:	(10)	1.649E+008	(11) 1.649E+008
11:	(11)	1.730E+008	(12) 1.730E+008
12:	(12)	1.809E+008	(13) 1.809E+008
13:	(13)	1.889E+008	(14) 1.889E+008
14:	(14)	1.971E+008	(15) 1.971E+008
15:	(15)	2.058E+008	(16) 2.058E+008
16:	(16)	2.149E+008	(17) 2.149E+008
17:	(17)	2.247E+008	(18) 2.247E+008
18:	(18)	2.354E+008	(19) 2.354E+008
19:	(19)	2.470E+008	(20) 2.470E+008
20:	(20)	2.597E+008	(21) 2.597E+008

Tensões cédula 2,6- $h=-0.19953$

Output of Beam: Worst Stress.

Group 1 of type 22

Ele #:	(node)	value	...
1:	(1)	-3.294E+007	(2) -3.294E+007
2:	(2)	-4.544E+007	(3) -4.544E+007
3:	(3)	3.949E+007	(4) 3.949E+007
4:	(4)	8.086E+007	(5) 8.086E+007
5:	(5)	1.059E+008	(6) 1.059E+008
6:	(6)	1.232E+008	(7) 1.232E+008
7:	(7)	1.363E+008	(8) 1.363E+008
8:	(8)	1.470E+008	(9) 1.470E+008
9:	(9)	1.563E+008	(10) 1.563E+008

```

10: ( 10) 1.648E+008 ( 11) 1.648E+008
11: ( 11) 1.729E+008 ( 12) 1.729E+008
12: ( 12) 1.808E+008 ( 13) 1.808E+008
13: ( 13) 1.888E+008 ( 14) 1.888E+008
14: ( 14) 1.970E+008 ( 15) 1.970E+008
15: ( 15) 2.057E+008 ( 16) 2.057E+008
16: ( 16) 2.148E+008 ( 17) 2.148E+008
17: ( 17) 2.246E+008 ( 18) 2.246E+008
18: ( 18) 2.353E+008 ( 19) 2.353E+008
19: ( 19) 2.469E+008 ( 20) 2.469E+008
20: ( 20) 2.596E+008 ( 21) 2.596E+008

```

Tensões cédula 3,6- $h=0.020574$

Output of Beam: Worst Stress.

```

          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
 1: ( 1)-3.026E+007 ( 2)-3.026E+007
 2: ( 2)-3.312E+007 ( 3)-3.312E+007
 3: ( 3) 4.751E+007 ( 4) 4.751E+007
 4: ( 4) 8.683E+007 ( 5) 8.683E+007
 5: ( 5) 1.107E+008 ( 6) 1.107E+008
 6: ( 6) 1.272E+008 ( 7) 1.272E+008
 7: ( 7) 1.397E+008 ( 8) 1.397E+008
 8: ( 8) 1.500E+008 ( 9) 1.500E+008
 9: ( 9) 1.591E+008 ( 10) 1.591E+008
10: ( 10) 1.673E+008 ( 11) 1.673E+008
11: ( 11) 1.752E+008 ( 12) 1.752E+008
12: ( 12) 1.830E+008 ( 13) 1.830E+008
13: ( 13) 1.909E+008 ( 14) 1.909E+008
14: ( 14) 1.990E+008 ( 15) 1.990E+008
15: ( 15) 2.076E+008 ( 16) 2.076E+008
16: ( 16) 2.167E+008 ( 17) 2.167E+008
17: ( 17) 2.264E+008 ( 18) 2.264E+008
18: ( 18) 2.370E+008 ( 19) 2.370E+008
19: ( 19) 2.486E+008 ( 20) 2.486E+008
20: ( 20) 2.613E+008 ( 21) 2.613E+008

```

Tensões cédula 4,6- $h=0.173313$

Output of Beam: Worst Stress.

```

          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
 1: ( 1)-2.840E+007 ( 2)-2.840E+007
 2: ( 2)-2.458E+007 ( 3)-2.458E+007
 3: ( 3) 5.308E+007 ( 4) 5.308E+007
 4: ( 4) 9.098E+007 ( 5) 9.098E+007
 5: ( 5) 1.140E+008 ( 6) 1.140E+008
 6: ( 6) 1.299E+008 ( 7) 1.299E+008
 7: ( 7) 1.421E+008 ( 8) 1.421E+008
 8: ( 8) 1.522E+008 ( 9) 1.522E+008
 9: ( 9) 1.610E+008 ( 10) 1.610E+008
10: ( 10) 1.691E+008 ( 11) 1.691E+008
11: ( 11) 1.768E+008 ( 12) 1.768E+008
12: ( 12) 1.845E+008 ( 13) 1.845E+008

```

```
13: ( 13) 1.923E+008 ( 14) 1.923E+008
14: ( 14) 2.004E+008 ( 15) 2.004E+008
15: ( 15) 2.089E+008 ( 16) 2.089E+008
16: ( 16) 2.179E+008 ( 17) 2.179E+008
17: ( 17) 2.277E+008 ( 18) 2.277E+008
18: ( 18) 2.383E+008 ( 19) 2.383E+008
19: ( 19) 2.498E+008 ( 20) 2.498E+008
20: ( 20) 2.625E+008 ( 21) 2.625E+008
```

Tensões cédula 5,6- h=0.135107

Output of Beam: Worst Stress.

```
Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
1: ( 1)-2.886E+007 ( 2)-2.886E+007
2: ( 2)-2.671E+007 ( 3)-2.671E+007
3: ( 3) 5.169E+007 ( 4) 5.169E+007
4: ( 4) 8.994E+007 ( 5) 8.994E+007
5: ( 5) 1.131E+008 ( 6) 1.131E+008
6: ( 6) 1.292E+008 ( 7) 1.292E+008
7: ( 7) 1.415E+008 ( 8) 1.415E+008
8: ( 8) 1.516E+008 ( 9) 1.516E+008
9: ( 9) 1.605E+008 ( 10) 1.605E+008
10: ( 10) 1.686E+008 ( 11) 1.686E+008
11: ( 11) 1.764E+008 ( 12) 1.764E+008
12: ( 12) 1.841E+008 ( 13) 1.841E+008
13: ( 13) 1.919E+008 ( 14) 1.919E+008
14: ( 14) 2.000E+008 ( 15) 2.000E+008
15: ( 15) 2.086E+008 ( 16) 2.086E+008
16: ( 16) 2.176E+008 ( 17) 2.176E+008
17: ( 17) 2.274E+008 ( 18) 2.274E+008
18: ( 18) 2.379E+008 ( 19) 2.379E+008
19: ( 19) 2.495E+008 ( 20) 2.495E+008
20: ( 20) 2.622E+008 ( 21) 2.622E+008
```

Tensões cédula 6,6- h=0.004167

Output of Beam: Worst Stress.

```
Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
1: ( 1)-3.046E+007 ( 2)-3.046E+007
2: ( 2)-3.404E+007 ( 3)-3.404E+007
3: ( 3) 4.691E+007 ( 4) 4.691E+007
4: ( 4) 8.639E+007 ( 5) 8.639E+007
5: ( 5) 1.103E+008 ( 6) 1.103E+008
6: ( 6) 1.269E+008 ( 7) 1.269E+008
7: ( 7) 1.395E+008 ( 8) 1.395E+008
8: ( 8) 1.498E+008 ( 9) 1.498E+008
9: ( 9) 1.588E+008 ( 10) 1.588E+008
10: ( 10) 1.671E+008 ( 11) 1.671E+008
11: ( 11) 1.750E+008 ( 12) 1.750E+008
12: ( 12) 1.828E+008 ( 13) 1.828E+008
13: ( 13) 1.907E+008 ( 14) 1.907E+008
14: ( 14) 1.989E+008 ( 15) 1.989E+008
15: ( 15) 2.074E+008 ( 16) 2.074E+008
```

```

16: ( 16) 2.165E+008 ( 17) 2.165E+008
17: ( 17) 2.263E+008 ( 18) 2.263E+008
18: ( 18) 2.369E+008 ( 19) 2.369E+008
19: ( 19) 2.485E+008 ( 20) 2.485E+008
20: ( 20) 2.612E+008 ( 21) 2.612E+008

```

Tensões cédula 7,6- $h=-0.0903$

Output of Beam: Worst Stress.

```

Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
1: ( 1)-3.161E+007 ( 2)-3.161E+007
2: ( 2)-3.933E+007 ( 3)-3.933E+007
3: ( 3) 4.347E+007 ( 4) 4.347E+007
4: ( 4) 8.382E+007 ( 5) 8.382E+007
5: ( 5) 1.083E+008 ( 6) 1.083E+008
6: ( 6) 1.251E+008 ( 7) 1.251E+008
7: ( 7) 1.380E+008 ( 8) 1.380E+008
8: ( 8) 1.485E+008 ( 9) 1.485E+008
9: ( 9) 1.577E+008 ( 10) 1.577E+008
10: ( 10) 1.660E+008 ( 11) 1.660E+008
11: ( 11) 1.740E+008 ( 12) 1.740E+008
12: ( 12) 1.819E+008 ( 13) 1.819E+008
13: ( 13) 1.898E+008 ( 14) 1.898E+008
14: ( 14) 1.980E+008 ( 15) 1.980E+008
15: ( 15) 2.066E+008 ( 16) 2.066E+008
16: ( 16) 2.157E+008 ( 17) 2.157E+008
17: ( 17) 2.255E+008 ( 18) 2.255E+008
18: ( 18) 2.362E+008 ( 19) 2.362E+008
19: ( 19) 2.477E+008 ( 20) 2.477E+008
20: ( 20) 2.605E+008 ( 21) 2.605E+008

```

Tensões cédula 8,6- $h=-0.09672$

Output of Beam: Worst Stress.

```

Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
1: ( 1)-3.168E+007 ( 2)-3.168E+007
2: ( 2)-3.969E+007 ( 3)-3.969E+007
3: ( 3) 4.324E+007 ( 4) 4.324E+007
4: ( 4) 8.365E+007 ( 5) 8.365E+007
5: ( 5) 1.081E+008 ( 6) 1.081E+008
6: ( 6) 1.250E+008 ( 7) 1.250E+008
7: ( 7) 1.379E+008 ( 8) 1.379E+008
8: ( 8) 1.484E+008 ( 9) 1.484E+008
9: ( 9) 1.576E+008 ( 10) 1.576E+008
10: ( 10) 1.660E+008 ( 11) 1.660E+008
11: ( 11) 1.740E+008 ( 12) 1.740E+008
12: ( 12) 1.818E+008 ( 13) 1.818E+008
13: ( 13) 1.898E+008 ( 14) 1.898E+008
14: ( 14) 1.980E+008 ( 15) 1.980E+008
15: ( 15) 2.066E+008 ( 16) 2.066E+008
16: ( 16) 2.157E+008 ( 17) 2.157E+008
17: ( 17) 2.255E+008 ( 18) 2.255E+008
18: ( 18) 2.361E+008 ( 19) 2.361E+008

```

19: (19) 2.477E+008 (20) 2.477E+008
 20: (20) 2.604E+008 (21) 2.604E+008

Tensões cédula 9,6- h=-0.05296

Output of Beam: Worst Stress.

Group 1 of type 22
 Ele #: (node)value ...
 1: (1)-3.115E+007 (2)-3.115E+007
 2: (2)-3.724E+007 (3)-3.724E+007
 3: (3) 4.483E+007 (4) 4.483E+007
 4: (4) 8.484E+007 (5) 8.484E+007
 5: (5) 1.091E+008 (6) 1.091E+008
 6: (6) 1.258E+008 (7) 1.258E+008
 7: (7) 1.386E+008 (8) 1.386E+008
 8: (8) 1.490E+008 (9) 1.490E+008
 9: (9) 1.581E+008 (10) 1.581E+008
 10: (10) 1.665E+008 (11) 1.665E+008
 11: (11) 1.744E+008 (12) 1.744E+008
 12: (12) 1.823E+008 (13) 1.823E+008
 13: (13) 1.902E+008 (14) 1.902E+008
 14: (14) 1.984E+008 (15) 1.984E+008
 15: (15) 2.069E+008 (16) 2.069E+008
 16: (16) 2.160E+008 (17) 2.160E+008
 17: (17) 2.258E+008 (18) 2.258E+008
 18: (18) 2.365E+008 (19) 2.365E+008
 19: (19) 2.480E+008 (20) 2.480E+008
 20: (20) 2.608E+008 (21) 2.608E+008

Tensões cédula 10,6- h=0.023946

Output of Beam: Worst Stress.

Group 1 of type 22
 Ele #: (node)value ...
 1: (1)-3.022E+007 (2)-3.022E+007
 2: (2)-3.293E+007 (3)-3.293E+007
 3: (3) 4.764E+007 (4) 4.764E+007
 4: (4) 8.692E+007 (5) 8.692E+007
 5: (5) 1.107E+008 (6) 1.107E+008
 6: (6) 1.272E+008 (7) 1.272E+008
 7: (7) 1.398E+008 (8) 1.398E+008
 8: (8) 1.501E+008 (9) 1.501E+008
 9: (9) 1.591E+008 (10) 1.591E+008
 10: (10) 1.674E+008 (11) 1.674E+008
 11: (11) 1.752E+008 (12) 1.752E+008
 12: (12) 1.830E+008 (13) 1.830E+008
 13: (13) 1.909E+008 (14) 1.909E+008
 14: (14) 1.990E+008 (15) 1.990E+008
 15: (15) 2.076E+008 (16) 2.076E+008
 16: (16) 2.167E+008 (17) 2.167E+008
 17: (17) 2.265E+008 (18) 2.265E+008
 18: (18) 2.371E+008 (19) 2.371E+008
 19: (19) 2.486E+008 (20) 2.486E+008
 20: (20) 2.614E+008 (21) 2.614E+008

Tensões cédula 11,6- h=0.087086

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.945E+007 (  2)-2.945E+007
  2: (  2)-2.940E+007 (  3)-2.940E+007
  3: (  3) 4.994E+007 (  4) 4.994E+007
  4: (  4) 8.864E+007 (  5) 8.864E+007
  5: (  5) 1.121E+008 (  6) 1.121E+008
  6: (  6) 1.284E+008 (  7) 1.284E+008
  7: (  7) 1.408E+008 (  8) 1.408E+008
  8: (  8) 1.510E+008 (  9) 1.510E+008
  9: (  9) 1.599E+008 ( 10) 1.599E+008
 10: ( 10) 1.681E+008 ( 11) 1.681E+008
 11: ( 11) 1.759E+008 ( 12) 1.759E+008
 12: ( 12) 1.837E+008 ( 13) 1.837E+008
 13: ( 13) 1.915E+008 ( 14) 1.915E+008
 14: ( 14) 1.996E+008 ( 15) 1.996E+008
 15: ( 15) 2.081E+008 ( 16) 2.081E+008
 16: ( 16) 2.172E+008 ( 17) 2.172E+008
 17: ( 17) 2.270E+008 ( 18) 2.270E+008
 18: ( 18) 2.376E+008 ( 19) 2.376E+008
 19: ( 19) 2.491E+008 ( 20) 2.491E+008
 20: ( 20) 2.619E+008 ( 21) 2.619E+008
```

Tensões cédula 12,6- h=0.052865

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.986E+007 (  2)-2.986E+007
  2: (  2)-3.132E+007 (  3)-3.132E+007
  3: (  3) 4.869E+007 (  4) 4.869E+007
  4: (  4) 8.771E+007 (  5) 8.771E+007
  5: (  5) 1.114E+008 (  6) 1.114E+008
  6: (  6) 1.277E+008 (  7) 1.277E+008
  7: (  7) 1.402E+008 (  8) 1.402E+008
  8: (  8) 1.505E+008 (  9) 1.505E+008
  9: (  9) 1.595E+008 ( 10) 1.595E+008
 10: ( 10) 1.677E+008 ( 11) 1.677E+008
 11: ( 11) 1.755E+008 ( 12) 1.755E+008
 12: ( 12) 1.833E+008 ( 13) 1.833E+008
 13: ( 13) 1.912E+008 ( 14) 1.912E+008
 14: ( 14) 1.993E+008 ( 15) 1.993E+008
 15: ( 15) 2.078E+008 ( 16) 2.078E+008
 16: ( 16) 2.169E+008 ( 17) 2.169E+008
 17: ( 17) 2.267E+008 ( 18) 2.267E+008
 18: ( 18) 2.373E+008 ( 19) 2.373E+008
 19: ( 19) 2.489E+008 ( 20) 2.489E+008
 20: ( 20) 2.616E+008 ( 21) 2.616E+008
```

Tensões cédula 13,6- $h=-0.01813$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.073E+007 (  2)-3.073E+007
  2: (  2)-3.529E+007 (  3)-3.529E+007
  3: (  3) 4.610E+007 (  4) 4.610E+007
  4: (  4) 8.578E+007 (  5) 8.578E+007
  5: (  5) 1.098E+008 (  6) 1.098E+008
  6: (  6) 1.265E+008 (  7) 1.265E+008
  7: (  7) 1.391E+008 (  8) 1.391E+008
  8: (  8) 1.495E+008 (  9) 1.495E+008
  9: (  9) 1.586E+008 ( 10) 1.586E+008
 10: ( 10) 1.669E+008 ( 11) 1.669E+008
 11: ( 11) 1.748E+008 ( 12) 1.748E+008
 12: ( 12) 1.826E+008 ( 13) 1.826E+008
 13: ( 13) 1.905E+008 ( 14) 1.905E+008
 14: ( 14) 1.987E+008 ( 15) 1.987E+008
 15: ( 15) 2.072E+008 ( 16) 2.072E+008
 16: ( 16) 2.163E+008 ( 17) 2.163E+008
 17: ( 17) 2.261E+008 ( 18) 2.261E+008
 18: ( 18) 2.367E+008 ( 19) 2.367E+008
 19: ( 19) 2.483E+008 ( 20) 2.483E+008
 20: ( 20) 2.610E+008 ( 21) 2.610E+008
```

Tensões cédula 14,6- $h=-0.02747$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.084E+007 (  2)-3.084E+007
  2: (  2)-3.581E+007 (  3)-3.581E+007
  3: (  3) 4.576E+007 (  4) 4.576E+007
  4: (  4) 8.553E+007 (  5) 8.553E+007
  5: (  5) 1.096E+008 (  6) 1.096E+008
  6: (  6) 1.263E+008 (  7) 1.263E+008
  7: (  7) 1.390E+008 (  8) 1.390E+008
  8: (  8) 1.494E+008 (  9) 1.494E+008
  9: (  9) 1.584E+008 ( 10) 1.584E+008
 10: ( 10) 1.668E+008 ( 11) 1.668E+008
 11: ( 11) 1.747E+008 ( 12) 1.747E+008
 12: ( 12) 1.825E+008 ( 13) 1.825E+008
 13: ( 13) 1.904E+008 ( 14) 1.904E+008
 14: ( 14) 1.986E+008 ( 15) 1.986E+008
 15: ( 15) 2.072E+008 ( 16) 2.072E+008
 16: ( 16) 2.163E+008 ( 17) 2.163E+008
 17: ( 17) 2.260E+008 ( 18) 2.260E+008
 18: ( 18) 2.367E+008 ( 19) 2.367E+008
 19: ( 19) 2.482E+008 ( 20) 2.482E+008
 20: ( 20) 2.610E+008 ( 21) 2.610E+008
```

Tensões cédula 15,6- $h=-0.00144$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.053E+007 (  2)-3.053E+007
  2: (  2)-3.435E+007 (  3)-3.435E+007
  3: (  3) 4.671E+007 (  4) 4.671E+007
  4: (  4) 8.624E+007 (  5) 8.624E+007
  5: (  5) 1.102E+008 (  6) 1.102E+008
  6: (  6) 1.268E+008 (  7) 1.268E+008
  7: (  7) 1.394E+008 (  8) 1.394E+008
  8: (  8) 1.497E+008 (  9) 1.497E+008
  9: (  9) 1.588E+008 ( 10) 1.588E+008
 10: ( 10) 1.671E+008 ( 11) 1.671E+008
 11: ( 11) 1.750E+008 ( 12) 1.750E+008
 12: ( 12) 1.828E+008 ( 13) 1.828E+008
 13: ( 13) 1.907E+008 ( 14) 1.907E+008
 14: ( 14) 1.988E+008 ( 15) 1.988E+008
 15: ( 15) 2.074E+008 ( 16) 2.074E+008
 16: ( 16) 2.165E+008 ( 17) 2.165E+008
 17: ( 17) 2.263E+008 ( 18) 2.263E+008
 18: ( 18) 2.369E+008 ( 19) 2.369E+008
 19: ( 19) 2.484E+008 ( 20) 2.484E+008
 20: ( 20) 2.612E+008 ( 21) 2.612E+008
```

Tensões cédula 16,6- $h=0.003703$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.046E+007 (  2)-3.046E+007
  2: (  2)-3.407E+007 (  3)-3.407E+007
  3: (  3) 4.690E+007 (  4) 4.690E+007
  4: (  4) 8.638E+007 (  5) 8.638E+007
  5: (  5) 1.103E+008 (  6) 1.103E+008
  6: (  6) 1.268E+008 (  7) 1.268E+008
  7: (  7) 1.395E+008 (  8) 1.395E+008
  8: (  8) 1.498E+008 (  9) 1.498E+008
  9: (  9) 1.588E+008 ( 10) 1.588E+008
 10: ( 10) 1.671E+008 ( 11) 1.671E+008
 11: ( 11) 1.750E+008 ( 12) 1.750E+008
 12: ( 12) 1.828E+008 ( 13) 1.828E+008
 13: ( 13) 1.907E+008 ( 14) 1.907E+008
 14: ( 14) 1.989E+008 ( 15) 1.989E+008
 15: ( 15) 2.074E+008 ( 16) 2.074E+008
 16: ( 16) 2.165E+008 ( 17) 2.165E+008
 17: ( 17) 2.263E+008 ( 18) 2.263E+008
 18: ( 18) 2.369E+008 ( 19) 2.369E+008
 19: ( 19) 2.485E+008 ( 20) 2.485E+008
 20: ( 20) 2.612E+008 ( 21) 2.612E+008
```

Tensões cédula 17,6- $h=-0.03983$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.099E+007 (  2)-3.099E+007
  2: (  2)-3.650E+007 (  3)-3.650E+007
  3: (  3) 4.531E+007 (  4) 4.531E+007
  4: (  4) 8.519E+007 (  5) 8.519E+007
  5: (  5) 1.093E+008 (  6) 1.093E+008
  6: (  6) 1.261E+008 (  7) 1.261E+008
  7: (  7) 1.388E+008 (  8) 1.388E+008
  8: (  8) 1.492E+008 (  9) 1.492E+008
  9: (  9) 1.583E+008 ( 10) 1.583E+008
 10: ( 10) 1.666E+008 ( 11) 1.666E+008
 11: ( 11) 1.746E+008 ( 12) 1.746E+008
 12: ( 12) 1.824E+008 ( 13) 1.824E+008
 13: ( 13) 1.903E+008 ( 14) 1.903E+008
 14: ( 14) 1.985E+008 ( 15) 1.985E+008
 15: ( 15) 2.070E+008 ( 16) 2.070E+008
 16: ( 16) 2.162E+008 ( 17) 2.162E+008
 17: ( 17) 2.259E+008 ( 18) 2.259E+008
 18: ( 18) 2.366E+008 ( 19) 2.366E+008
 19: ( 19) 2.481E+008 ( 20) 2.481E+008
 20: ( 20) 2.609E+008 ( 21) 2.609E+008
```

Tensões cédula 18,6- $h=-0.07708$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.145E+007 (  2)-3.145E+007
  2: (  2)-3.859E+007 (  3)-3.859E+007
  3: (  3) 4.395E+007 (  4) 4.395E+007
  4: (  4) 8.418E+007 (  5) 8.418E+007
  5: (  5) 1.085E+008 (  6) 1.085E+008
  6: (  6) 1.254E+008 (  7) 1.254E+008
  7: (  7) 1.382E+008 (  8) 1.382E+008
  8: (  8) 1.487E+008 (  9) 1.487E+008
  9: (  9) 1.578E+008 ( 10) 1.578E+008
 10: ( 10) 1.662E+008 ( 11) 1.662E+008
 11: ( 11) 1.742E+008 ( 12) 1.742E+008
 12: ( 12) 1.820E+008 ( 13) 1.820E+008
 13: ( 13) 1.900E+008 ( 14) 1.900E+008
 14: ( 14) 1.981E+008 ( 15) 1.981E+008
 15: ( 15) 2.067E+008 ( 16) 2.067E+008
 16: ( 16) 2.158E+008 ( 17) 2.158E+008
 17: ( 17) 2.256E+008 ( 18) 2.256E+008
 18: ( 18) 2.363E+008 ( 19) 2.363E+008
 19: ( 19) 2.478E+008 ( 20) 2.478E+008
 20: ( 20) 2.606E+008 ( 21) 2.606E+008
```

Tensões cédula 19,6- h=0.00628

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.043E+007 (  2)-3.043E+007
  2: (  2)-3.392E+007 (  3)-3.392E+007
  3: (  3) 4.699E+007 (  4) 4.699E+007
  4: (  4) 8.645E+007 (  5) 8.645E+007
  5: (  5) 1.103E+008 (  6) 1.103E+008
  6: (  6) 1.269E+008 (  7) 1.269E+008
  7: (  7) 1.395E+008 (  8) 1.395E+008
  8: (  8) 1.498E+008 (  9) 1.498E+008
  9: (  9) 1.589E+008 ( 10) 1.589E+008
 10: ( 10) 1.671E+008 ( 11) 1.671E+008
 11: ( 11) 1.751E+008 ( 12) 1.751E+008
 12: ( 12) 1.828E+008 ( 13) 1.828E+008
 13: ( 13) 1.907E+008 ( 14) 1.907E+008
 14: ( 14) 1.989E+008 ( 15) 1.989E+008
 15: ( 15) 2.074E+008 ( 16) 2.074E+008
 16: ( 16) 2.165E+008 ( 17) 2.165E+008
 17: ( 17) 2.263E+008 ( 18) 2.263E+008
 18: ( 18) 2.369E+008 ( 19) 2.369E+008
 19: ( 19) 2.485E+008 ( 20) 2.485E+008
 20: ( 20) 2.612E+008 ( 21) 2.612E+008
```

Tensões cédula 20,6- h=0.148794

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.870E+007 (  2)-2.870E+007
  2: (  2)-2.595E+007 (  3)-2.595E+007
  3: (  3) 5.219E+007 (  4) 5.219E+007
  4: (  4) 9.031E+007 (  5) 9.031E+007
  5: (  5) 1.134E+008 (  6) 1.134E+008
  6: (  6) 1.295E+008 (  7) 1.295E+008
  7: (  7) 1.417E+008 (  8) 1.417E+008
  8: (  8) 1.518E+008 (  9) 1.518E+008
  9: (  9) 1.607E+008 ( 10) 1.607E+008
 10: ( 10) 1.688E+008 ( 11) 1.688E+008
 11: ( 11) 1.766E+008 ( 12) 1.766E+008
 12: ( 12) 1.843E+008 ( 13) 1.843E+008
 13: ( 13) 1.921E+008 ( 14) 1.921E+008
 14: ( 14) 2.002E+008 ( 15) 2.002E+008
 15: ( 15) 2.087E+008 ( 16) 2.087E+008
 16: ( 16) 2.177E+008 ( 17) 2.177E+008
 17: ( 17) 2.275E+008 ( 18) 2.275E+008
 18: ( 18) 2.381E+008 ( 19) 2.381E+008
 19: ( 19) 2.496E+008 ( 20) 2.496E+008
 20: ( 20) 2.623E+008 ( 21) 2.623E+008
```

(ESTADO DE MAR 7)

Tensões cédula 1,7- h=0.222778

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.780E+007 (  2)-2.780E+007
  2: (  2)-2.181E+007 (  3)-2.181E+007
  3: (  3) 5.488E+007 (  4) 5.488E+007
  4: (  4) 9.232E+007 (  5) 9.232E+007
  5: (  5) 1.151E+008 (  6) 1.151E+008
  6: (  6) 1.308E+008 (  7) 1.308E+008
  7: (  7) 1.429E+008 (  8) 1.429E+008
  8: (  8) 1.529E+008 (  9) 1.529E+008
  9: (  9) 1.616E+008 ( 10) 1.616E+008
 10: ( 10) 1.696E+008 ( 11) 1.696E+008
 11: ( 11) 1.774E+008 ( 12) 1.774E+008
 12: ( 12) 1.850E+008 ( 13) 1.850E+008
 13: ( 13) 1.928E+008 ( 14) 1.928E+008
 14: ( 14) 2.008E+008 ( 15) 2.008E+008
 15: ( 15) 2.093E+008 ( 16) 2.093E+008
 16: ( 16) 2.184E+008 ( 17) 2.184E+008
 17: ( 17) 2.281E+008 ( 18) 2.281E+008
 18: ( 18) 2.386E+008 ( 19) 2.386E+008
 19: ( 19) 2.502E+008 ( 20) 2.502E+008
 20: ( 20) 2.629E+008 ( 21) 2.629E+008
```

Tensões cédula 2,7- h=0.354749

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.619E+007 (  2)-2.619E+007
  2: (  2)-1.443E+007 (  3)-1.443E+007
  3: (  3) 5.969E+007 (  4) 5.969E+007
  4: (  4) 9.590E+007 (  5) 9.590E+007
  5: (  5) 1.179E+008 (  6) 1.179E+008
  6: (  6) 1.332E+008 (  7) 1.332E+008
  7: (  7) 1.450E+008 (  8) 1.450E+008
  8: (  8) 1.547E+008 (  9) 1.547E+008
  9: (  9) 1.632E+008 ( 10) 1.632E+008
 10: ( 10) 1.712E+008 ( 11) 1.712E+008
 11: ( 11) 1.788E+008 ( 12) 1.788E+008
 12: ( 12) 1.863E+008 ( 13) 1.863E+008
 13: ( 13) 1.940E+008 ( 14) 1.940E+008
 14: ( 14) 2.020E+008 ( 15) 2.020E+008
 15: ( 15) 2.104E+008 ( 16) 2.104E+008
 16: ( 16) 2.195E+008 ( 17) 2.195E+008
 17: ( 17) 2.292E+008 ( 18) 2.292E+008
 18: ( 18) 2.397E+008 ( 19) 2.397E+008
 19: ( 19) 2.512E+008 ( 20) 2.512E+008
 20: ( 20) 2.639E+008 ( 21) 2.639E+008
```

Tensões cédula 3,7- h=-0.0252

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.081E+007 (  2)-3.081E+007
  2: (  2)-3.568E+007 (  3)-3.568E+007
  3: (  3) 4.584E+007 (  4) 4.584E+007
  4: (  4) 8.559E+007 (  5) 8.559E+007
  5: (  5) 1.097E+008 (  6) 1.097E+008
  6: (  6) 1.263E+008 (  7) 1.263E+008
  7: (  7) 1.390E+008 (  8) 1.390E+008
  8: (  8) 1.494E+008 (  9) 1.494E+008
  9: (  9) 1.585E+008 ( 10) 1.585E+008
 10: ( 10) 1.668E+008 ( 11) 1.668E+008
 11: ( 11) 1.747E+008 ( 12) 1.747E+008
 12: ( 12) 1.825E+008 ( 13) 1.825E+008
 13: ( 13) 1.904E+008 ( 14) 1.904E+008
 14: ( 14) 1.986E+008 ( 15) 1.986E+008
 15: ( 15) 2.072E+008 ( 16) 2.072E+008
 16: ( 16) 2.163E+008 ( 17) 2.163E+008
 17: ( 17) 2.261E+008 ( 18) 2.261E+008
 18: ( 18) 2.367E+008 ( 19) 2.367E+008
 19: ( 19) 2.483E+008 ( 20) 2.483E+008
 20: ( 20) 2.610E+008 ( 21) 2.610E+008
```

Tensões cédula 4,7- h=-0.37982

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.513E+007 (  2)-3.513E+007
  2: (  2)-5.553E+007 (  3)-5.553E+007
  3: (  3) 3.292E+007 (  4) 3.292E+007
  4: (  4) 7.596E+007 (  5) 7.596E+007
  5: (  5) 1.020E+008 (  6) 1.020E+008
  6: (  6) 1.199E+008 (  7) 1.199E+008
  7: (  7) 1.334E+008 (  8) 1.334E+008
  8: (  8) 1.445E+008 (  9) 1.445E+008
  9: (  9) 1.540E+008 ( 10) 1.540E+008
 10: ( 10) 1.627E+008 ( 11) 1.627E+008
 11: ( 11) 1.709E+008 ( 12) 1.709E+008
 12: ( 12) 1.790E+008 ( 13) 1.790E+008
 13: ( 13) 1.871E+008 ( 14) 1.871E+008
 14: ( 14) 1.954E+008 ( 15) 1.954E+008
 15: ( 15) 2.041E+008 ( 16) 2.041E+008
 16: ( 16) 2.133E+008 ( 17) 2.133E+008
 17: ( 17) 2.232E+008 ( 18) 2.232E+008
 18: ( 18) 2.338E+008 ( 19) 2.338E+008
 19: ( 19) 2.455E+008 ( 20) 2.455E+008
 20: ( 20) 2.582E+008 ( 21) 2.582E+008
```

Tensões cédula 5,7- $h=-0.25597$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.362E+007 (  2)-3.362E+007
  2: (  2)-4.860E+007 (  3)-4.860E+007
  3: (  3) 3.743E+007 (  4) 3.743E+007
  4: (  4) 7.933E+007 (  5) 7.933E+007
  5: (  5) 1.047E+008 (  6) 1.047E+008
  6: (  6) 1.221E+008 (  7) 1.221E+008
  7: (  7) 1.354E+008 (  8) 1.354E+008
  8: (  8) 1.462E+008 (  9) 1.462E+008
  9: (  9) 1.556E+008 ( 10) 1.556E+008
 10: ( 10) 1.641E+008 ( 11) 1.641E+008
 11: ( 11) 1.723E+008 ( 12) 1.723E+008
 12: ( 12) 1.802E+008 ( 13) 1.802E+008
 13: ( 13) 1.883E+008 ( 14) 1.883E+008
 14: ( 14) 1.965E+008 ( 15) 1.965E+008
 15: ( 15) 2.052E+008 ( 16) 2.052E+008
 16: ( 16) 2.144E+008 ( 17) 2.144E+008
 17: ( 17) 2.242E+008 ( 18) 2.242E+008
 18: ( 18) 2.348E+008 ( 19) 2.348E+008
 19: ( 19) 2.464E+008 ( 20) 2.464E+008
 20: ( 20) 2.592E+008 ( 21) 2.592E+008
```

Tensões cédula 6,7- $h=0.195648$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.813E+007 (  2)-2.813E+007
  2: (  2)-2.333E+007 (  3)-2.333E+007
  3: (  3) 5.390E+007 (  4) 5.390E+007
  4: (  4) 9.159E+007 (  5) 9.159E+007
  5: (  5) 1.145E+008 (  6) 1.145E+008
  6: (  6) 1.303E+008 (  7) 1.303E+008
  7: (  7) 1.425E+008 (  8) 1.425E+008
  8: (  8) 1.525E+008 (  9) 1.525E+008
  9: (  9) 1.612E+008 ( 10) 1.612E+008
 10: ( 10) 1.693E+008 ( 11) 1.693E+008
 11: ( 11) 1.771E+008 ( 12) 1.771E+008
 12: ( 12) 1.847E+008 ( 13) 1.847E+008
 13: ( 13) 1.925E+008 ( 14) 1.925E+008
 14: ( 14) 2.006E+008 ( 15) 2.006E+008
 15: ( 15) 2.091E+008 ( 16) 2.091E+008
 16: ( 16) 2.181E+008 ( 17) 2.181E+008
 17: ( 17) 2.279E+008 ( 18) 2.279E+008
 18: ( 18) 2.384E+008 ( 19) 2.384E+008
 19: ( 19) 2.500E+008 ( 20) 2.500E+008
 20: ( 20) 2.627E+008 ( 21) 2.627E+008
```

Tensões cédula 7,7- h=0.434675

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.522E+007 (  2)-2.522E+007
  2: (  2)-9.954E+006 (  3)-9.954E+006
  3: (  3) 6.261E+007 (  4) 6.261E+007
  4: (  4) 9.807E+007 (  5) 9.807E+007
  5: (  5) 1.197E+008 (  6) 1.197E+008
  6: (  6) 1.347E+008 (  7) 1.347E+008
  7: (  7) 1.462E+008 (  8) 1.462E+008
  8: (  8) 1.558E+008 (  9) 1.558E+008
  9: (  9) 1.642E+008 ( 10) 1.642E+008
 10: ( 10) 1.721E+008 ( 11) 1.721E+008
 11: ( 11) 1.796E+008 ( 12) 1.796E+008
 12: ( 12) 1.871E+008 ( 13) 1.871E+008
 13: ( 13) 1.948E+008 ( 14) 1.948E+008
 14: ( 14) 2.027E+008 ( 15) 2.027E+008
 15: ( 15) 2.111E+008 ( 16) 2.111E+008
 16: ( 16) 2.201E+008 ( 17) 2.201E+008
 17: ( 17) 2.298E+008 ( 18) 2.298E+008
 18: ( 18) 2.403E+008 ( 19) 2.403E+008
 19: ( 19) 2.519E+008 ( 20) 2.519E+008
 20: ( 20) 2.646E+008 ( 21) 2.646E+008
```

Tensões cédula 8,7- h=0.141224

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.879E+007 (  2)-2.879E+007
  2: (  2)-2.637E+007 (  3)-2.637E+007
  3: (  3) 5.191E+007 (  4) 5.191E+007
  4: (  4) 9.011E+007 (  5) 9.011E+007
  5: (  5) 1.133E+008 (  6) 1.133E+008
  6: (  6) 1.293E+008 (  7) 1.293E+008
  7: (  7) 1.416E+008 (  8) 1.416E+008
  8: (  8) 1.517E+008 (  9) 1.517E+008
  9: (  9) 1.606E+008 ( 10) 1.606E+008
 10: ( 10) 1.687E+008 ( 11) 1.687E+008
 11: ( 11) 1.765E+008 ( 12) 1.765E+008
 12: ( 12) 1.842E+008 ( 13) 1.842E+008
 13: ( 13) 1.920E+008 ( 14) 1.920E+008
 14: ( 14) 2.001E+008 ( 15) 2.001E+008
 15: ( 15) 2.086E+008 ( 16) 2.086E+008
 16: ( 16) 2.177E+008 ( 17) 2.177E+008
 17: ( 17) 2.274E+008 ( 18) 2.274E+008
 18: ( 18) 2.380E+008 ( 19) 2.380E+008
 19: ( 19) 2.496E+008 ( 20) 2.496E+008
 20: ( 20) 2.623E+008 ( 21) 2.623E+008
```

Tensões cédula 9,7- h=-0.32952

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.452E+007 (  2)-3.452E+007
  2: (  2)-5.271E+007 (  3)-5.271E+007
  3: (  3) 3.475E+007 (  4) 3.475E+007
  4: (  4) 7.733E+007 (  5) 7.733E+007
  5: (  5) 1.031E+008 (  6) 1.031E+008
  6: (  6) 1.208E+008 (  7) 1.208E+008
  7: (  7) 1.342E+008 (  8) 1.342E+008
  8: (  8) 1.452E+008 (  9) 1.452E+008
  9: (  9) 1.547E+008 ( 10) 1.547E+008
 10: ( 10) 1.633E+008 ( 11) 1.633E+008
 11: ( 11) 1.715E+008 ( 12) 1.715E+008
 12: ( 12) 1.795E+008 ( 13) 1.795E+008
 13: ( 13) 1.876E+008 ( 14) 1.876E+008
 14: ( 14) 1.959E+008 ( 15) 1.959E+008
 15: ( 15) 2.045E+008 ( 16) 2.045E+008
 16: ( 16) 2.137E+008 ( 17) 2.137E+008
 17: ( 17) 2.236E+008 ( 18) 2.236E+008
 18: ( 18) 2.342E+008 ( 19) 2.342E+008
 19: ( 19) 2.459E+008 ( 20) 2.459E+008
 20: ( 20) 2.586E+008 ( 21) 2.586E+008
```

Tensões cédula 10,7- h=-0.40356

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.542E+007 (  2)-3.542E+007
  2: (  2)-5.685E+007 (  3)-5.685E+007
  3: (  3) 3.205E+007 (  4) 3.205E+007
  4: (  4) 7.532E+007 (  5) 7.532E+007
  5: (  5) 1.014E+008 (  6) 1.014E+008
  6: (  6) 1.194E+008 (  7) 1.194E+008
  7: (  7) 1.331E+008 (  8) 1.331E+008
  8: (  8) 1.441E+008 (  9) 1.441E+008
  9: (  9) 1.537E+008 ( 10) 1.537E+008
 10: ( 10) 1.624E+008 ( 11) 1.624E+008
 11: ( 11) 1.707E+008 ( 12) 1.707E+008
 12: ( 12) 1.788E+008 ( 13) 1.788E+008
 13: ( 13) 1.869E+008 ( 14) 1.869E+008
 14: ( 14) 1.952E+008 ( 15) 1.952E+008
 15: ( 15) 2.039E+008 ( 16) 2.039E+008
 16: ( 16) 2.131E+008 ( 17) 2.131E+008
 17: ( 17) 2.230E+008 ( 18) 2.230E+008
 18: ( 18) 2.337E+008 ( 19) 2.337E+008
 19: ( 19) 2.453E+008 ( 20) 2.453E+008
 20: ( 20) 2.580E+008 ( 21) 2.580E+008
```

Tensões cédula 11,7- $h=-0.01597$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.070E+007 (  2)-3.070E+007
  2: (  2)-3.517E+007 (  3)-3.517E+007
  3: (  3) 4.618E+007 (  4) 4.618E+007
  4: (  4) 8.584E+007 (  5) 8.584E+007
  5: (  5) 1.099E+008 (  6) 1.099E+008
  6: (  6) 1.265E+008 (  7) 1.265E+008
  7: (  7) 1.391E+008 (  8) 1.391E+008
  8: (  8) 1.495E+008 (  9) 1.495E+008
  9: (  9) 1.586E+008 ( 10) 1.586E+008
 10: ( 10) 1.669E+008 ( 11) 1.669E+008
 11: ( 11) 1.748E+008 ( 12) 1.748E+008
 12: ( 12) 1.826E+008 ( 13) 1.826E+008
 13: ( 13) 1.905E+008 ( 14) 1.905E+008
 14: ( 14) 1.987E+008 ( 15) 1.987E+008
 15: ( 15) 2.073E+008 ( 16) 2.073E+008
 16: ( 16) 2.164E+008 ( 17) 2.164E+008
 17: ( 17) 2.261E+008 ( 18) 2.261E+008
 18: ( 18) 2.367E+008 ( 19) 2.367E+008
 19: ( 19) 2.483E+008 ( 20) 2.483E+008
 20: ( 20) 2.611E+008 ( 21) 2.611E+008
```

Tensões cédula 12,7- $h=0.37709$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.592E+007 (  2)-2.592E+007
  2: (  2)-1.318E+007 (  3)-1.318E+007
  3: (  3) 6.051E+007 (  4) 6.051E+007
  4: (  4) 9.651E+007 (  5) 9.651E+007
  5: (  5) 1.184E+008 (  6) 1.184E+008
  6: (  6) 1.336E+008 (  7) 1.336E+008
  7: (  7) 1.453E+008 (  8) 1.453E+008
  8: (  8) 1.550E+008 (  9) 1.550E+008
  9: (  9) 1.635E+008 ( 10) 1.635E+008
 10: ( 10) 1.714E+008 ( 11) 1.714E+008
 11: ( 11) 1.790E+008 ( 12) 1.790E+008
 12: ( 12) 1.865E+008 ( 13) 1.865E+008
 13: ( 13) 1.942E+008 ( 14) 1.942E+008
 14: ( 14) 2.022E+008 ( 15) 2.022E+008
 15: ( 15) 2.106E+008 ( 16) 2.106E+008
 16: ( 16) 2.196E+008 ( 17) 2.196E+008
 17: ( 17) 2.293E+008 ( 18) 2.293E+008
 18: ( 18) 2.399E+008 ( 19) 2.399E+008
 19: ( 19) 2.514E+008 ( 20) 2.514E+008
 20: ( 20) 2.641E+008 ( 21) 2.641E+008
```

Tensões cédula 13,7- h=0.333895

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.645E+007 (  2)-2.645E+007
  2: (  2)-1.559E+007 (  3)-1.559E+007
  3: (  3) 5.893E+007 (  4) 5.893E+007
  4: (  4) 9.534E+007 (  5) 9.534E+007
  5: (  5) 1.175E+008 (  6) 1.175E+008
  6: (  6) 1.329E+008 (  7) 1.329E+008
  7: (  7) 1.447E+008 (  8) 1.447E+008
  8: (  8) 1.544E+008 (  9) 1.544E+008
  9: (  9) 1.630E+008 ( 10) 1.630E+008
 10: ( 10) 1.709E+008 ( 11) 1.709E+008
 11: ( 11) 1.785E+008 ( 12) 1.785E+008
 12: ( 12) 1.861E+008 ( 13) 1.861E+008
 13: ( 13) 1.938E+008 ( 14) 1.938E+008
 14: ( 14) 2.018E+008 ( 15) 2.018E+008
 15: ( 15) 2.103E+008 ( 16) 2.103E+008
 16: ( 16) 2.193E+008 ( 17) 2.193E+008
 17: ( 17) 2.290E+008 ( 18) 2.290E+008
 18: ( 18) 2.395E+008 ( 19) 2.395E+008
 19: ( 19) 2.511E+008 ( 20) 2.511E+008
 20: ( 20) 2.638E+008 ( 21) 2.638E+008
```

Tensões cédula 14,7- h=-0.07655

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.144E+007 (  2)-3.144E+007
  2: (  2)-3.856E+007 (  3)-3.856E+007
  3: (  3) 4.397E+007 (  4) 4.397E+007
  4: (  4) 8.420E+007 (  5) 8.420E+007
  5: (  5) 1.085E+008 (  6) 1.085E+008
  6: (  6) 1.254E+008 (  7) 1.254E+008
  7: (  7) 1.382E+008 (  8) 1.382E+008
  8: (  8) 1.487E+008 (  9) 1.487E+008
  9: (  9) 1.578E+008 ( 10) 1.578E+008
 10: ( 10) 1.662E+008 ( 11) 1.662E+008
 11: ( 11) 1.742E+008 ( 12) 1.742E+008
 12: ( 12) 1.820E+008 ( 13) 1.820E+008
 13: ( 13) 1.900E+008 ( 14) 1.900E+008
 14: ( 14) 1.981E+008 ( 15) 1.981E+008
 15: ( 15) 2.067E+008 ( 16) 2.067E+008
 16: ( 16) 2.159E+008 ( 17) 2.159E+008
 17: ( 17) 2.256E+008 ( 18) 2.256E+008
 18: ( 18) 2.363E+008 ( 19) 2.363E+008
 19: ( 19) 2.478E+008 ( 20) 2.478E+008
 20: ( 20) 2.606E+008 ( 21) 2.606E+008
```

Tensões cédula 15,7- h=-0.3768

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.509E+007 (  2)-3.509E+007
  2: (  2)-5.536E+007 (  3)-5.536E+007
  3: (  3) 3.303E+007 (  4) 3.303E+007
  4: (  4) 7.605E+007 (  5) 7.605E+007
  5: (  5) 1.020E+008 (  6) 1.020E+008
  6: (  6) 1.199E+008 (  7) 1.199E+008
  7: (  7) 1.335E+008 (  8) 1.335E+008
  8: (  8) 1.445E+008 (  9) 1.445E+008
  9: (  9) 1.541E+008 ( 10) 1.541E+008
 10: ( 10) 1.628E+008 ( 11) 1.628E+008
 11: ( 11) 1.710E+008 ( 12) 1.710E+008
 12: ( 12) 1.790E+008 ( 13) 1.790E+008
 13: ( 13) 1.871E+008 ( 14) 1.871E+008
 14: ( 14) 1.954E+008 ( 15) 1.954E+008
 15: ( 15) 2.041E+008 ( 16) 2.041E+008
 16: ( 16) 2.133E+008 ( 17) 2.133E+008
 17: ( 17) 2.232E+008 ( 18) 2.232E+008
 18: ( 18) 2.339E+008 ( 19) 2.339E+008
 19: ( 19) 2.455E+008 ( 20) 2.455E+008
 20: ( 20) 2.582E+008 ( 21) 2.582E+008
```

Tensões cédula 16,7- h=-0.25454

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.360E+007 (  2)-3.360E+007
  2: (  2)-4.852E+007 (  3)-4.852E+007
  3: (  3) 3.748E+007 (  4) 3.748E+007
  4: (  4) 7.937E+007 (  5) 7.937E+007
  5: (  5) 1.047E+008 (  6) 1.047E+008
  6: (  6) 1.221E+008 (  7) 1.221E+008
  7: (  7) 1.354E+008 (  8) 1.354E+008
  8: (  8) 1.462E+008 (  9) 1.462E+008
  9: (  9) 1.556E+008 ( 10) 1.556E+008
 10: ( 10) 1.642E+008 ( 11) 1.642E+008
 11: ( 11) 1.723E+008 ( 12) 1.723E+008
 12: ( 12) 1.802E+008 ( 13) 1.802E+008
 13: ( 13) 1.883E+008 ( 14) 1.883E+008
 14: ( 14) 1.965E+008 ( 15) 1.965E+008
 15: ( 15) 2.052E+008 ( 16) 2.052E+008
 16: ( 16) 2.144E+008 ( 17) 2.144E+008
 17: ( 17) 2.242E+008 ( 18) 2.242E+008
 18: ( 18) 2.348E+008 ( 19) 2.348E+008
 19: ( 19) 2.465E+008 ( 20) 2.465E+008
 20: ( 20) 2.592E+008 ( 21) 2.592E+008
```

Tensões cédula 17,7- h=0.132271

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.890E+007 (  2)-2.890E+007
  2: (  2)-2.687E+007 (  3)-2.687E+007
  3: (  3) 5.158E+007 (  4) 5.158E+007
  4: (  4) 8.987E+007 (  5) 8.987E+007
  5: (  5) 1.131E+008 (  6) 1.131E+008
  6: (  6) 1.292E+008 (  7) 1.292E+008
  7: (  7) 1.415E+008 (  8) 1.415E+008
  8: (  8) 1.516E+008 (  9) 1.516E+008
  9: (  9) 1.605E+008 ( 10) 1.605E+008
 10: ( 10) 1.686E+008 ( 11) 1.686E+008
 11: ( 11) 1.764E+008 ( 12) 1.764E+008
 12: ( 12) 1.841E+008 ( 13) 1.841E+008
 13: ( 13) 1.919E+008 ( 14) 1.919E+008
 14: ( 14) 2.000E+008 ( 15) 2.000E+008
 15: ( 15) 2.085E+008 ( 16) 2.085E+008
 16: ( 16) 2.176E+008 ( 17) 2.176E+008
 17: ( 17) 2.273E+008 ( 18) 2.273E+008
 18: ( 18) 2.379E+008 ( 19) 2.379E+008
 19: ( 19) 2.495E+008 ( 20) 2.495E+008
 20: ( 20) 2.622E+008 ( 21) 2.622E+008
```

Tensões cédula 18,7- h=0.348493

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.627E+007 (  2)-2.627E+007
  2: (  2)-1.478E+007 (  3)-1.478E+007
  3: (  3) 5.947E+007 (  4) 5.947E+007
  4: (  4) 9.573E+007 (  5) 9.573E+007
  5: (  5) 1.178E+008 (  6) 1.178E+008
  6: (  6) 1.331E+008 (  7) 1.331E+008
  7: (  7) 1.449E+008 (  8) 1.449E+008
  8: (  8) 1.546E+008 (  9) 1.546E+008
  9: (  9) 1.632E+008 ( 10) 1.632E+008
 10: ( 10) 1.711E+008 ( 11) 1.711E+008
 11: ( 11) 1.787E+008 ( 12) 1.787E+008
 12: ( 12) 1.863E+008 ( 13) 1.863E+008
 13: ( 13) 1.940E+008 ( 14) 1.940E+008
 14: ( 14) 2.020E+008 ( 15) 2.020E+008
 15: ( 15) 2.104E+008 ( 16) 2.104E+008
 16: ( 16) 2.194E+008 ( 17) 2.194E+008
 17: ( 17) 2.291E+008 ( 18) 2.291E+008
 18: ( 18) 2.397E+008 ( 19) 2.397E+008
 19: ( 19) 2.512E+008 ( 20) 2.512E+008
 20: ( 20) 2.639E+008 ( 21) 2.639E+008
```

Tensões cédula 19,7- h=0.174449

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.839E+007 (  2)-2.839E+007
  2: (  2)-2.451E+007 (  3)-2.451E+007
  3: (  3) 5.312E+007 (  4) 5.312E+007
  4: (  4) 9.101E+007 (  5) 9.101E+007
  5: (  5) 1.140E+008 (  6) 1.140E+008
  6: (  6) 1.300E+008 (  7) 1.300E+008
  7: (  7) 1.421E+008 (  8) 1.421E+008
  8: (  8) 1.522E+008 (  9) 1.522E+008
  9: (  9) 1.610E+008 ( 10) 1.610E+008
 10: ( 10) 1.691E+008 ( 11) 1.691E+008
 11: ( 11) 1.768E+008 ( 12) 1.768E+008
 12: ( 12) 1.845E+008 ( 13) 1.845E+008
 13: ( 13) 1.923E+008 ( 14) 1.923E+008
 14: ( 14) 2.004E+008 ( 15) 2.004E+008
 15: ( 15) 2.089E+008 ( 16) 2.089E+008
 16: ( 16) 2.179E+008 ( 17) 2.179E+008
 17: ( 17) 2.277E+008 ( 18) 2.277E+008
 18: ( 18) 2.383E+008 ( 19) 2.383E+008
 19: ( 19) 2.498E+008 ( 20) 2.498E+008
 20: ( 20) 2.625E+008 ( 21) 2.625E+008
```

Tensões cédula 20,7- h=-0.14166

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.223E+007 (  2)-3.223E+007
  2: (  2)-4.220E+007 (  3)-4.220E+007
  3: (  3) 4.160E+007 (  4) 4.160E+007
  4: (  4) 8.243E+007 (  5) 8.243E+007
  5: (  5) 1.071E+008 (  6) 1.071E+008
  6: (  6) 1.242E+008 (  7) 1.242E+008
  7: (  7) 1.372E+008 (  8) 1.372E+008
  8: (  8) 1.478E+008 (  9) 1.478E+008
  9: (  9) 1.570E+008 ( 10) 1.570E+008
 10: ( 10) 1.655E+008 ( 11) 1.655E+008
 11: ( 11) 1.735E+008 ( 12) 1.735E+008
 12: ( 12) 1.814E+008 ( 13) 1.814E+008
 13: ( 13) 1.893E+008 ( 14) 1.893E+008
 14: ( 14) 1.976E+008 ( 15) 1.976E+008
 15: ( 15) 2.062E+008 ( 16) 2.062E+008
 16: ( 16) 2.153E+008 ( 17) 2.153E+008
 17: ( 17) 2.251E+008 ( 18) 2.251E+008
 18: ( 18) 2.357E+008 ( 19) 2.357E+008
 19: ( 19) 2.473E+008 ( 20) 2.473E+008
 20: ( 20) 2.601E+008 ( 21) 2.601E+008
```

(ESTADO DE MAR 8)

Tensões cédula 1,8- h=-0.43361

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.578E+007 (  2)-3.578E+007
  2: (  2)-5.854E+007 (  3)-5.854E+007
  3: (  3) 3.096E+007 (  4) 3.096E+007
  4: (  4) 7.450E+007 (  5) 7.450E+007
  5: (  5) 1.008E+008 (  6) 1.008E+008
  6: (  6) 1.189E+008 (  7) 1.189E+008
  7: (  7) 1.326E+008 (  8) 1.326E+008
  8: (  8) 1.437E+008 (  9) 1.437E+008
  9: (  9) 1.534E+008 ( 10) 1.534E+008
 10: ( 10) 1.621E+008 ( 11) 1.621E+008
 11: ( 11) 1.704E+008 ( 12) 1.704E+008
 12: ( 12) 1.785E+008 ( 13) 1.785E+008
 13: ( 13) 1.866E+008 ( 14) 1.866E+008
 14: ( 14) 1.949E+008 ( 15) 1.949E+008
 15: ( 15) 2.036E+008 ( 16) 2.036E+008
 16: ( 16) 2.129E+008 ( 17) 2.129E+008
 17: ( 17) 2.227E+008 ( 18) 2.227E+008
 18: ( 18) 2.334E+008 ( 19) 2.334E+008
 19: ( 19) 2.450E+008 ( 20) 2.450E+008
 20: ( 20) 2.578E+008 ( 21) 2.578E+008
```

Tensões cédula 2,8- h=-0.01997

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.075E+007 (  2)-3.075E+007
  2: (  2)-3.539E+007 (  3)-3.539E+007
  3: (  3) 4.604E+007 (  4) 4.604E+007
  4: (  4) 8.573E+007 (  5) 8.573E+007
  5: (  5) 1.098E+008 (  6) 1.098E+008
  6: (  6) 1.264E+008 (  7) 1.264E+008
  7: (  7) 1.391E+008 (  8) 1.391E+008
  8: (  8) 1.495E+008 (  9) 1.495E+008
  9: (  9) 1.585E+008 ( 10) 1.585E+008
 10: ( 10) 1.668E+008 ( 11) 1.668E+008
 11: ( 11) 1.748E+008 ( 12) 1.748E+008
 12: ( 12) 1.826E+008 ( 13) 1.826E+008
 13: ( 13) 1.905E+008 ( 14) 1.905E+008
 14: ( 14) 1.986E+008 ( 15) 1.986E+008
 15: ( 15) 2.072E+008 ( 16) 2.072E+008
 16: ( 16) 2.163E+008 ( 17) 2.163E+008
 17: ( 17) 2.261E+008 ( 18) 2.261E+008
 18: ( 18) 2.367E+008 ( 19) 2.367E+008
 19: ( 19) 2.483E+008 ( 20) 2.483E+008
 20: ( 20) 2.610E+008 ( 21) 2.610E+008
```

Tensões cédula 3,8- h=0.408433

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.554E+007 (  2)-2.554E+007
  2: (  2)-1.142E+007 (  3)-1.142E+007
  3: (  3) 6.165E+007 (  4) 6.165E+007
  4: (  4) 9.736E+007 (  5) 9.736E+007
  5: (  5) 1.191E+008 (  6) 1.191E+008
  6: (  6) 1.342E+008 (  7) 1.342E+008
  7: (  7) 1.458E+008 (  8) 1.458E+008
  8: (  8) 1.554E+008 (  9) 1.554E+008
  9: (  9) 1.639E+008 ( 10) 1.639E+008
 10: ( 10) 1.718E+008 ( 11) 1.718E+008
 11: ( 11) 1.793E+008 ( 12) 1.793E+008
 12: ( 12) 1.869E+008 ( 13) 1.869E+008
 13: ( 13) 1.945E+008 ( 14) 1.945E+008
 14: ( 14) 2.025E+008 ( 15) 2.025E+008
 15: ( 15) 2.109E+008 ( 16) 2.109E+008
 16: ( 16) 2.199E+008 ( 17) 2.199E+008
 17: ( 17) 2.296E+008 ( 18) 2.296E+008
 18: ( 18) 2.401E+008 ( 19) 2.401E+008
 19: ( 19) 2.517E+008 ( 20) 2.517E+008
 20: ( 20) 2.644E+008 ( 21) 2.644E+008
```

Tensões cédula 4,8- h=0.484668

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.461E+007 (  2)-2.461E+007
  2: (  2)-7.156E+006 (  3)-7.156E+006
  3: (  3) 6.443E+007 (  4) 6.443E+007
  4: (  4) 9.943E+007 (  5) 9.943E+007
  5: (  5) 1.207E+008 (  6) 1.207E+008
  6: (  6) 1.356E+008 (  7) 1.356E+008
  7: (  7) 1.470E+008 (  8) 1.470E+008
  8: (  8) 1.565E+008 (  9) 1.565E+008
  9: (  9) 1.649E+008 ( 10) 1.649E+008
 10: ( 10) 1.726E+008 ( 11) 1.726E+008
 11: ( 11) 1.801E+008 ( 12) 1.801E+008
 12: ( 12) 1.876E+008 ( 13) 1.876E+008
 13: ( 13) 1.952E+008 ( 14) 1.952E+008
 14: ( 14) 2.032E+008 ( 15) 2.032E+008
 15: ( 15) 2.116E+008 ( 16) 2.116E+008
 16: ( 16) 2.205E+008 ( 17) 2.205E+008
 17: ( 17) 2.302E+008 ( 18) 2.302E+008
 18: ( 18) 2.407E+008 ( 19) 2.407E+008
 19: ( 19) 2.523E+008 ( 20) 2.523E+008
 20: ( 20) 2.650E+008 ( 21) 2.650E+008
```

Tensões cédula 5,8- h=0.096274

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.934E+007 (  2)-2.934E+007
  2: (  2)-2.889E+007 (  3)-2.889E+007
  3: (  3) 5.027E+007 (  4) 5.027E+007
  4: (  4) 8.889E+007 (  5) 8.889E+007
  5: (  5) 1.123E+008 (  6) 1.123E+008
  6: (  6) 1.285E+008 (  7) 1.285E+008
  7: (  7) 1.409E+008 (  8) 1.409E+008
  8: (  8) 1.511E+008 (  9) 1.511E+008
  9: (  9) 1.600E+008 ( 10) 1.600E+008
 10: ( 10) 1.682E+008 ( 11) 1.682E+008
 11: ( 11) 1.760E+008 ( 12) 1.760E+008
 12: ( 12) 1.837E+008 ( 13) 1.837E+008
 13: ( 13) 1.916E+008 ( 14) 1.916E+008
 14: ( 14) 1.997E+008 ( 15) 1.997E+008
 15: ( 15) 2.082E+008 ( 16) 2.082E+008
 16: ( 16) 2.173E+008 ( 17) 2.173E+008
 17: ( 17) 2.271E+008 ( 18) 2.271E+008
 18: ( 18) 2.376E+008 ( 19) 2.376E+008
 19: ( 19) 2.492E+008 ( 20) 2.492E+008
 20: ( 20) 2.619E+008 ( 21) 2.619E+008
```

Tensões cédula 6,8- h=-0.37191

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.503E+007 (  2)-3.503E+007
  2: (  2)-5.508E+007 (  3)-5.508E+007
  3: (  3) 3.321E+007 (  4) 3.321E+007
  4: (  4) 7.618E+007 (  5) 7.618E+007
  5: (  5) 1.021E+008 (  6) 1.021E+008
  6: (  6) 1.200E+008 (  7) 1.200E+008
  7: (  7) 1.336E+008 (  8) 1.336E+008
  8: (  8) 1.446E+008 (  9) 1.446E+008
  9: (  9) 1.541E+008 ( 10) 1.541E+008
 10: ( 10) 1.628E+008 ( 11) 1.628E+008
 11: ( 11) 1.710E+008 ( 12) 1.710E+008
 12: ( 12) 1.791E+008 ( 13) 1.791E+008
 13: ( 13) 1.872E+008 ( 14) 1.872E+008
 14: ( 14) 1.955E+008 ( 15) 1.955E+008
 15: ( 15) 2.042E+008 ( 16) 2.042E+008
 16: ( 16) 2.134E+008 ( 17) 2.134E+008
 17: ( 17) 2.232E+008 ( 18) 2.232E+008
 18: ( 18) 2.339E+008 ( 19) 2.339E+008
 19: ( 19) 2.455E+008 ( 20) 2.455E+008
 20: ( 20) 2.583E+008 ( 21) 2.583E+008
```

Tensões cédula 7,8- $h=-0.43442$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.579E+007 (  2)-3.579E+007
  2: (  2)-5.858E+007 (  3)-5.858E+007
  3: (  3) 3.093E+007 (  4) 3.093E+007
  4: (  4) 7.448E+007 (  5) 7.448E+007
  5: (  5) 1.008E+008 (  6) 1.008E+008
  6: (  6) 1.189E+008 (  7) 1.189E+008
  7: (  7) 1.326E+008 (  8) 1.326E+008
  8: (  8) 1.437E+008 (  9) 1.437E+008
  9: (  9) 1.533E+008 ( 10) 1.533E+008
 10: ( 10) 1.621E+008 ( 11) 1.621E+008
 11: ( 11) 1.704E+008 ( 12) 1.704E+008
 12: ( 12) 1.785E+008 ( 13) 1.785E+008
 13: ( 13) 1.866E+008 ( 14) 1.866E+008
 14: ( 14) 1.949E+008 ( 15) 1.949E+008
 15: ( 15) 2.036E+008 ( 16) 2.036E+008
 16: ( 16) 2.129E+008 ( 17) 2.129E+008
 17: ( 17) 2.227E+008 ( 18) 2.227E+008
 18: ( 18) 2.334E+008 ( 19) 2.334E+008
 19: ( 19) 2.450E+008 ( 20) 2.450E+008
 20: ( 20) 2.578E+008 ( 21) 2.578E+008
```

Tensões cédula 8,8- $h=-0.11265$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.188E+007 (  2)-3.188E+007
  2: (  2)-4.058E+007 (  3)-4.058E+007
  3: (  3) 4.266E+007 (  4) 4.266E+007
  4: (  4) 8.322E+007 (  5) 8.322E+007
  5: (  5) 1.078E+008 (  6) 1.078E+008
  6: (  6) 1.247E+008 (  7) 1.247E+008
  7: (  7) 1.376E+008 (  8) 1.376E+008
  8: (  8) 1.482E+008 (  9) 1.482E+008
  9: (  9) 1.574E+008 ( 10) 1.574E+008
 10: ( 10) 1.658E+008 ( 11) 1.658E+008
 11: ( 11) 1.738E+008 ( 12) 1.738E+008
 12: ( 12) 1.817E+008 ( 13) 1.817E+008
 13: ( 13) 1.896E+008 ( 14) 1.896E+008
 14: ( 14) 1.978E+008 ( 15) 1.978E+008
 15: ( 15) 2.064E+008 ( 16) 2.064E+008
 16: ( 16) 2.155E+008 ( 17) 2.155E+008
 17: ( 17) 2.254E+008 ( 18) 2.254E+008
 18: ( 18) 2.360E+008 ( 19) 2.360E+008
 19: ( 19) 2.476E+008 ( 20) 2.476E+008
 20: ( 20) 2.603E+008 ( 21) 2.603E+008
```

Tensões cédula 9,8- h=0.245882

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.752E+007 (  2)-2.752E+007
  2: (  2)-2.052E+007 (  3)-2.052E+007
  3: (  3) 5.573E+007 (  4) 5.573E+007
  4: (  4) 9.295E+007 (  5) 9.295E+007
  5: (  5) 1.156E+008 (  6) 1.156E+008
  6: (  6) 1.313E+008 (  7) 1.313E+008
  7: (  7) 1.433E+008 (  8) 1.433E+008
  8: (  8) 1.532E+008 (  9) 1.532E+008
  9: (  9) 1.619E+008 ( 10) 1.619E+008
 10: ( 10) 1.699E+008 ( 11) 1.699E+008
 11: ( 11) 1.776E+008 ( 12) 1.776E+008
 12: ( 12) 1.852E+008 ( 13) 1.852E+008
 13: ( 13) 1.930E+008 ( 14) 1.930E+008
 14: ( 14) 2.010E+008 ( 15) 2.010E+008
 15: ( 15) 2.095E+008 ( 16) 2.095E+008
 16: ( 16) 2.185E+008 ( 17) 2.185E+008
 17: ( 17) 2.283E+008 ( 18) 2.283E+008
 18: ( 18) 2.388E+008 ( 19) 2.388E+008
 19: ( 19) 2.504E+008 ( 20) 2.504E+008
 20: ( 20) 2.631E+008 ( 21) 2.631E+008
```

Tensões cédula 10,8- h=0.344239

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.632E+007 (  2)-2.632E+007
  2: (  2)-1.501E+007 (  3)-1.501E+007
  3: (  3) 5.931E+007 (  4) 5.931E+007
  4: (  4) 9.562E+007 (  5) 9.562E+007
  5: (  5) 1.177E+008 (  6) 1.177E+008
  6: (  6) 1.330E+008 (  7) 1.330E+008
  7: (  7) 1.448E+008 (  8) 1.448E+008
  8: (  8) 1.545E+008 (  9) 1.545E+008
  9: (  9) 1.631E+008 ( 10) 1.631E+008
 10: ( 10) 1.710E+008 ( 11) 1.710E+008
 11: ( 11) 1.786E+008 ( 12) 1.786E+008
 12: ( 12) 1.862E+008 ( 13) 1.862E+008
 13: ( 13) 1.939E+008 ( 14) 1.939E+008
 14: ( 14) 2.019E+008 ( 15) 2.019E+008
 15: ( 15) 2.104E+008 ( 16) 2.104E+008
 16: ( 16) 2.194E+008 ( 17) 2.194E+008
 17: ( 17) 2.291E+008 ( 18) 2.291E+008
 18: ( 18) 2.396E+008 ( 19) 2.396E+008
 19: ( 19) 2.512E+008 ( 20) 2.512E+008
 20: ( 20) 2.639E+008 ( 21) 2.639E+008
```

Tensões cédula 11,8- h=0.138014

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.883E+007 (  2)-2.883E+007
  2: (  2)-2.655E+007 (  3)-2.655E+007
  3: (  3) 5.179E+007 (  4) 5.179E+007
  4: (  4) 9.002E+007 (  5) 9.002E+007
  5: (  5) 1.132E+008 (  6) 1.132E+008
  6: (  6) 1.293E+008 (  7) 1.293E+008
  7: (  7) 1.416E+008 (  8) 1.416E+008
  8: (  8) 1.517E+008 (  9) 1.517E+008
  9: (  9) 1.605E+008 ( 10) 1.605E+008
 10: ( 10) 1.687E+008 ( 11) 1.687E+008
 11: ( 11) 1.765E+008 ( 12) 1.765E+008
 12: ( 12) 1.842E+008 ( 13) 1.842E+008
 13: ( 13) 1.920E+008 ( 14) 1.920E+008
 14: ( 14) 2.001E+008 ( 15) 2.001E+008
 15: ( 15) 2.086E+008 ( 16) 2.086E+008
 16: ( 16) 2.176E+008 ( 17) 2.176E+008
 17: ( 17) 2.274E+008 ( 18) 2.274E+008
 18: ( 18) 2.380E+008 ( 19) 2.380E+008
 19: ( 19) 2.495E+008 ( 20) 2.495E+008
 20: ( 20) 2.623E+008 ( 21) 2.623E+008
```

Tensões cédula 12,8- h=-0.11948

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.196E+007 (  2)-3.196E+007
  2: (  2)-4.096E+007 (  3)-4.096E+007
  3: (  3) 4.241E+007 (  4) 4.241E+007
  4: (  4) 8.303E+007 (  5) 8.303E+007
  5: (  5) 1.076E+008 (  6) 1.076E+008
  6: (  6) 1.246E+008 (  7) 1.246E+008
  7: (  7) 1.375E+008 (  8) 1.375E+008
  8: (  8) 1.481E+008 (  9) 1.481E+008
  9: (  9) 1.573E+008 ( 10) 1.573E+008
 10: ( 10) 1.657E+008 ( 11) 1.657E+008
 11: ( 11) 1.737E+008 ( 12) 1.737E+008
 12: ( 12) 1.816E+008 ( 13) 1.816E+008
 13: ( 13) 1.896E+008 ( 14) 1.896E+008
 14: ( 14) 1.978E+008 ( 15) 1.978E+008
 15: ( 15) 2.064E+008 ( 16) 2.064E+008
 16: ( 16) 2.155E+008 ( 17) 2.155E+008
 17: ( 17) 2.253E+008 ( 18) 2.253E+008
 18: ( 18) 2.359E+008 ( 19) 2.359E+008
 19: ( 19) 2.475E+008 ( 20) 2.475E+008
 20: ( 20) 2.602E+008 ( 21) 2.602E+008
```

Tensões cédula 13,8- h=-0.22788

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.328E+007 (  2)-3.328E+007
  2: (  2)-4.702E+007 (  3)-4.702E+007
  3: (  3) 3.846E+007 (  4) 3.846E+007
  4: (  4) 8.009E+007 (  5) 8.009E+007
  5: (  5) 1.053E+008 (  6) 1.053E+008
  6: (  6) 1.226E+008 (  7) 1.226E+008
  7: (  7) 1.358E+008 (  8) 1.358E+008
  8: (  8) 1.466E+008 (  9) 1.466E+008
  9: (  9) 1.559E+008 ( 10) 1.559E+008
 10: ( 10) 1.645E+008 ( 11) 1.645E+008
 11: ( 11) 1.726E+008 ( 12) 1.726E+008
 12: ( 12) 1.805E+008 ( 13) 1.805E+008
 13: ( 13) 1.885E+008 ( 14) 1.885E+008
 14: ( 14) 1.968E+008 ( 15) 1.968E+008
 15: ( 15) 2.054E+008 ( 16) 2.054E+008
 16: ( 16) 2.146E+008 ( 17) 2.146E+008
 17: ( 17) 2.244E+008 ( 18) 2.244E+008
 18: ( 18) 2.351E+008 ( 19) 2.351E+008
 19: ( 19) 2.467E+008 ( 20) 2.467E+008
 20: ( 20) 2.594E+008 ( 21) 2.594E+008
```

Tensões cédula 14,8- h=-0.18259

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.273E+007 (  2)-3.273E+007
  2: (  2)-4.449E+007 (  3)-4.449E+007
  3: (  3) 4.011E+007 (  4) 4.011E+007
  4: (  4) 8.132E+007 (  5) 8.132E+007
  5: (  5) 1.062E+008 (  6) 1.062E+008
  6: (  6) 1.235E+008 (  7) 1.235E+008
  7: (  7) 1.365E+008 (  8) 1.365E+008
  8: (  8) 1.472E+008 (  9) 1.472E+008
  9: (  9) 1.565E+008 ( 10) 1.565E+008
 10: ( 10) 1.650E+008 ( 11) 1.650E+008
 11: ( 11) 1.730E+008 ( 12) 1.730E+008
 12: ( 12) 1.810E+008 ( 13) 1.810E+008
 13: ( 13) 1.890E+008 ( 14) 1.890E+008
 14: ( 14) 1.972E+008 ( 15) 1.972E+008
 15: ( 15) 2.058E+008 ( 16) 2.058E+008
 16: ( 16) 2.150E+008 ( 17) 2.150E+008
 17: ( 17) 2.248E+008 ( 18) 2.248E+008
 18: ( 18) 2.354E+008 ( 19) 2.354E+008
 19: ( 19) 2.470E+008 ( 20) 2.470E+008
 20: ( 20) 2.598E+008 ( 21) 2.598E+008
```

Tensões cédula 15,8- $h=-0.00556$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.058E+007 (  2)-3.058E+007
  2: (  2)-3.459E+007 (  3)-3.459E+007
  3: (  3) 4.656E+007 (  4) 4.656E+007
  4: (  4) 8.612E+007 (  5) 8.612E+007
  5: (  5) 1.101E+008 (  6) 1.101E+008
  6: (  6) 1.267E+008 (  7) 1.267E+008
  7: (  7) 1.393E+008 (  8) 1.393E+008
  8: (  8) 1.497E+008 (  9) 1.497E+008
  9: (  9) 1.587E+008 ( 10) 1.587E+008
 10: ( 10) 1.670E+008 ( 11) 1.670E+008
 11: ( 11) 1.749E+008 ( 12) 1.749E+008
 12: ( 12) 1.827E+008 ( 13) 1.827E+008
 13: ( 13) 1.906E+008 ( 14) 1.906E+008
 14: ( 14) 1.988E+008 ( 15) 1.988E+008
 15: ( 15) 2.073E+008 ( 16) 2.073E+008
 16: ( 16) 2.164E+008 ( 17) 2.164E+008
 17: ( 17) 2.262E+008 ( 18) 2.262E+008
 18: ( 18) 2.368E+008 ( 19) 2.368E+008
 19: ( 19) 2.484E+008 ( 20) 2.484E+008
 20: ( 20) 2.611E+008 ( 21) 2.611E+008
```

Tensões cédula 16,8- $h=0.18513$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.826E+007 (  2)-2.826E+007
  2: (  2)-2.392E+007 (  3)-2.392E+007
  3: (  3) 5.351E+007 (  4) 5.351E+007
  4: (  4) 9.130E+007 (  5) 9.130E+007
  5: (  5) 1.142E+008 (  6) 1.142E+008
  6: (  6) 1.301E+008 (  7) 1.301E+008
  7: (  7) 1.423E+008 (  8) 1.423E+008
  8: (  8) 1.523E+008 (  9) 1.523E+008
  9: (  9) 1.611E+008 ( 10) 1.611E+008
 10: ( 10) 1.692E+008 ( 11) 1.692E+008
 11: ( 11) 1.770E+008 ( 12) 1.770E+008
 12: ( 12) 1.846E+008 ( 13) 1.846E+008
 13: ( 13) 1.924E+008 ( 14) 1.924E+008
 14: ( 14) 2.005E+008 ( 15) 2.005E+008
 15: ( 15) 2.090E+008 ( 16) 2.090E+008
 16: ( 16) 2.180E+008 ( 17) 2.180E+008
 17: ( 17) 2.278E+008 ( 18) 2.278E+008
 18: ( 18) 2.383E+008 ( 19) 2.383E+008
 19: ( 19) 2.499E+008 ( 20) 2.499E+008
 20: ( 20) 2.626E+008 ( 21) 2.626E+008
```

Tensões cédula 17,8- h=0.208299

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.797E+007 (  2)-2.797E+007
  2: (  2)-2.262E+007 (  3)-2.262E+007
  3: (  3) 5.436E+007 (  4) 5.436E+007
  4: (  4) 9.193E+007 (  5) 9.193E+007
  5: (  5) 1.147E+008 (  6) 1.147E+008
  6: (  6) 1.306E+008 (  7) 1.306E+008
  7: (  7) 1.427E+008 (  8) 1.427E+008
  8: (  8) 1.527E+008 (  9) 1.527E+008
  9: (  9) 1.614E+008 ( 10) 1.614E+008
 10: ( 10) 1.695E+008 ( 11) 1.695E+008
 11: ( 11) 1.772E+008 ( 12) 1.772E+008
 12: ( 12) 1.849E+008 ( 13) 1.849E+008
 13: ( 13) 1.926E+008 ( 14) 1.926E+008
 14: ( 14) 2.007E+008 ( 15) 2.007E+008
 15: ( 15) 2.092E+008 ( 16) 2.092E+008
 16: ( 16) 2.182E+008 ( 17) 2.182E+008
 17: ( 17) 2.280E+008 ( 18) 2.280E+008
 18: ( 18) 2.385E+008 ( 19) 2.385E+008
 19: ( 19) 2.501E+008 ( 20) 2.501E+008
 20: ( 20) 2.628E+008 ( 21) 2.628E+008
```

Tensões cédula 18,8- h=0.03635

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.007E+007 (  2)-3.007E+007
  2: (  2)-3.224E+007 (  3)-3.224E+007
  3: (  3) 4.809E+007 (  4) 4.809E+007
  4: (  4) 8.726E+007 (  5) 8.726E+007
  5: (  5) 1.110E+008 (  6) 1.110E+008
  6: (  6) 1.274E+008 (  7) 1.274E+008
  7: (  7) 1.400E+008 (  8) 1.400E+008
  8: (  8) 1.503E+008 (  9) 1.503E+008
  9: (  9) 1.592E+008 ( 10) 1.592E+008
 10: ( 10) 1.675E+008 ( 11) 1.675E+008
 11: ( 11) 1.754E+008 ( 12) 1.754E+008
 12: ( 12) 1.831E+008 ( 13) 1.831E+008
 13: ( 13) 1.910E+008 ( 14) 1.910E+008
 14: ( 14) 1.992E+008 ( 15) 1.992E+008
 15: ( 15) 2.077E+008 ( 16) 2.077E+008
 16: ( 16) 2.168E+008 ( 17) 2.168E+008
 17: ( 17) 2.266E+008 ( 18) 2.266E+008
 18: ( 18) 2.372E+008 ( 19) 2.372E+008
 19: ( 19) 2.487E+008 ( 20) 2.487E+008
 20: ( 20) 2.615E+008 ( 21) 2.615E+008
```

Tensões cédula 19,8- h=-0.1683

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.256E+007 (  2)-3.256E+007
  2: (  2)-4.369E+007 (  3)-4.369E+007
  3: (  3) 4.063E+007 (  4) 4.063E+007
  4: (  4) 8.171E+007 (  5) 8.171E+007
  5: (  5) 1.066E+008 (  6) 1.066E+008
  6: (  6) 1.237E+008 (  7) 1.237E+008
  7: (  7) 1.368E+008 (  8) 1.368E+008
  8: (  8) 1.474E+008 (  9) 1.474E+008
  9: (  9) 1.567E+008 ( 10) 1.567E+008
 10: ( 10) 1.651E+008 ( 11) 1.651E+008
 11: ( 11) 1.732E+008 ( 12) 1.732E+008
 12: ( 12) 1.811E+008 ( 13) 1.811E+008
 13: ( 13) 1.891E+008 ( 14) 1.891E+008
 14: ( 14) 1.973E+008 ( 15) 1.973E+008
 15: ( 15) 2.059E+008 ( 16) 2.059E+008
 16: ( 16) 2.151E+008 ( 17) 2.151E+008
 17: ( 17) 2.249E+008 ( 18) 2.249E+008
 18: ( 18) 2.355E+008 ( 19) 2.355E+008
 19: ( 19) 2.471E+008 ( 20) 2.471E+008
 20: ( 20) 2.599E+008 ( 21) 2.599E+008
```

Tensões cédula 20,8- h=-0.17776

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.267E+007 (  2)-3.267E+007
  2: (  2)-4.422E+007 (  3)-4.422E+007
  3: (  3) 4.028E+007 (  4) 4.028E+007
  4: (  4) 8.145E+007 (  5) 8.145E+007
  5: (  5) 1.064E+008 (  6) 1.064E+008
  6: (  6) 1.235E+008 (  7) 1.235E+008
  7: (  7) 1.366E+008 (  8) 1.366E+008
  8: (  8) 1.473E+008 (  9) 1.473E+008
  9: (  9) 1.566E+008 ( 10) 1.566E+008
 10: ( 10) 1.650E+008 ( 11) 1.650E+008
 11: ( 11) 1.731E+008 ( 12) 1.731E+008
 12: ( 12) 1.810E+008 ( 13) 1.810E+008
 13: ( 13) 1.890E+008 ( 14) 1.890E+008
 14: ( 14) 1.972E+008 ( 15) 1.972E+008
 15: ( 15) 2.059E+008 ( 16) 2.059E+008
 16: ( 16) 2.150E+008 ( 17) 2.150E+008
 17: ( 17) 2.248E+008 ( 18) 2.248E+008
 18: ( 18) 2.355E+008 ( 19) 2.355E+008
 19: ( 19) 2.471E+008 ( 20) 2.471E+008
 20: ( 20) 2.598E+008 ( 21) 2.598E+008
```

(ESTADO DE MAR 9)

Tensões cédula 1,9- $h=-0.2517$

Output of Beam: Worst Stress.

Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
1: (1)-3.357E+007 (2)-3.357E+007
2: (2)-4.836E+007 (3)-4.836E+007
3: (3) 3.759E+007 (4) 3.759E+007
4: (4) 7.944E+007 (5) 7.944E+007
5: (5) 1.047E+008 (6) 1.047E+008
6: (6) 1.222E+008 (7) 1.222E+008
7: (7) 1.354E+008 (8) 1.354E+008
8: (8) 1.463E+008 (9) 1.463E+008
9: (9) 1.556E+008 (10) 1.556E+008
10: (10) 1.642E+008 (11) 1.642E+008
11: (11) 1.723E+008 (12) 1.723E+008
12: (12) 1.803E+008 (13) 1.803E+008
13: (13) 1.883E+008 (14) 1.883E+008
14: (14) 1.966E+008 (15) 1.966E+008
15: (15) 2.052E+008 (16) 2.052E+008
16: (16) 2.144E+008 (17) 2.144E+008
17: (17) 2.242E+008 (18) 2.242E+008
18: (18) 2.349E+008 (19) 2.349E+008
19: (19) 2.465E+008 (20) 2.465E+008
20: (20) 2.592E+008 (21) 2.592E+008

Tensões cédula 2,9- $h=0.272832$

Output of Beam: Worst Stress.

Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
1: (1)-2.719E+007 (2)-2.719E+007
2: (2)-1.901E+007 (3)-1.901E+007
3: (3) 5.671E+007 (4) 5.671E+007
4: (4) 9.368E+007 (5) 9.368E+007
5: (5) 1.161E+008 (6) 1.161E+008
6: (6) 1.317E+008 (7) 1.317E+008
7: (7) 1.437E+008 (8) 1.437E+008
8: (8) 1.536E+008 (9) 1.536E+008
9: (9) 1.622E+008 (10) 1.622E+008
10: (10) 1.702E+008 (11) 1.702E+008
11: (11) 1.779E+008 (12) 1.779E+008
12: (12) 1.855E+008 (13) 1.855E+008
13: (13) 1.932E+008 (14) 1.932E+008
14: (14) 2.013E+008 (15) 2.013E+008
15: (15) 2.097E+008 (16) 2.097E+008
16: (16) 2.188E+008 (17) 2.188E+008
17: (17) 2.285E+008 (18) 2.285E+008
18: (18) 2.390E+008 (19) 2.390E+008
19: (19) 2.506E+008 (20) 2.506E+008
20: (20) 2.633E+008 (21) 2.633E+008

Tensões cédula 3,9- h=0.560919

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.368E+007 (  2)-2.368E+007
  2: (  2)-2.890E+006 (  3)-2.890E+006
  3: (  3) 6.721E+007 (  4) 6.721E+007
  4: (  4) 1.015E+008 (  5) 1.015E+008
  5: (  5) 1.224E+008 (  6) 1.224E+008
  6: (  6) 1.370E+008 (  7) 1.370E+008
  7: (  7) 1.482E+008 (  8) 1.482E+008
  8: (  8) 1.576E+008 (  9) 1.576E+008
  9: (  9) 1.658E+008 ( 10) 1.658E+008
 10: ( 10) 1.735E+008 ( 11) 1.735E+008
 11: ( 11) 1.810E+008 ( 12) 1.810E+008
 12: ( 12) 1.884E+008 ( 13) 1.884E+008
 13: ( 13) 1.960E+008 ( 14) 1.960E+008
 14: ( 14) 2.039E+008 ( 15) 2.039E+008
 15: ( 15) 2.122E+008 ( 16) 2.122E+008
 16: ( 16) 2.212E+008 ( 17) 2.212E+008
 17: ( 17) 2.308E+008 ( 18) 2.308E+008
 18: ( 18) 2.413E+008 ( 19) 2.413E+008
 19: ( 19) 2.529E+008 ( 20) 2.529E+008
 20: ( 20) 2.656E+008 ( 21) 2.656E+008
```

Tensões cédula 4,9- h=0.445253

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.509E+007 (  2)-2.509E+007
  2: (  2)-9.362E+006 (  3)-9.362E+006
  3: (  3) 6.299E+007 (  4) 6.299E+007
  4: (  4) 9.836E+007 (  5) 9.836E+007
  5: (  5) 1.199E+008 (  6) 1.199E+008
  6: (  6) 1.349E+008 (  7) 1.349E+008
  7: (  7) 1.464E+008 (  8) 1.464E+008
  8: (  8) 1.560E+008 (  9) 1.560E+008
  9: (  9) 1.644E+008 ( 10) 1.644E+008
 10: ( 10) 1.722E+008 ( 11) 1.722E+008
 11: ( 11) 1.797E+008 ( 12) 1.797E+008
 12: ( 12) 1.872E+008 ( 13) 1.872E+008
 13: ( 13) 1.949E+008 ( 14) 1.949E+008
 14: ( 14) 2.028E+008 ( 15) 2.028E+008
 15: ( 15) 2.112E+008 ( 16) 2.112E+008
 16: ( 16) 2.202E+008 ( 17) 2.202E+008
 17: ( 17) 2.299E+008 ( 18) 2.299E+008
 18: ( 18) 2.404E+008 ( 19) 2.404E+008
 19: ( 19) 2.520E+008 ( 20) 2.520E+008
 20: ( 20) 2.647E+008 ( 21) 2.647E+008
```

Tensões cédula 5,9- h=-0.0222

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
 1: ( 1)-3.078E+007 ( 2)-3.078E+007
 2: ( 2)-3.552E+007 ( 3)-3.552E+007
 3: ( 3) 4.595E+007 ( 4) 4.595E+007
 4: ( 4) 8.567E+007 ( 5) 8.567E+007
 5: ( 5) 1.097E+008 ( 6) 1.097E+008
 6: ( 6) 1.264E+008 ( 7) 1.264E+008
 7: ( 7) 1.391E+008 ( 8) 1.391E+008
 8: ( 8) 1.494E+008 ( 9) 1.494E+008
 9: ( 9) 1.585E+008 (10) 1.585E+008
10: (10) 1.668E+008 (11) 1.668E+008
11: (11) 1.747E+008 (12) 1.747E+008
12: (12) 1.826E+008 (13) 1.826E+008
13: (13) 1.905E+008 (14) 1.905E+008
14: (14) 1.986E+008 (15) 1.986E+008
15: (15) 2.072E+008 (16) 2.072E+008
16: (16) 2.163E+008 (17) 2.163E+008
17: (17) 2.261E+008 (18) 2.261E+008
18: (18) 2.367E+008 (19) 2.367E+008
19: (19) 2.483E+008 (20) 2.483E+008
20: (20) 2.610E+008 (21) 2.610E+008
```

Tensões cédula 6,9- h=-0.51938

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
 1: ( 1)-3.683E+007 ( 2)-3.683E+007
 2: ( 2)-6.333E+007 ( 3)-6.333E+007
 3: ( 3) 2.783E+007 ( 4) 2.783E+007
 4: ( 4) 7.218E+007 ( 5) 7.218E+007
 5: ( 5) 9.893E+007 ( 6) 9.893E+007
 6: ( 6) 1.173E+008 ( 7) 1.173E+008
 7: ( 7) 1.312E+008 ( 8) 1.312E+008
 8: ( 8) 1.425E+008 ( 9) 1.425E+008
 9: ( 9) 1.523E+008 (10) 1.523E+008
10: (10) 1.611E+008 (11) 1.611E+008
11: (11) 1.695E+008 (12) 1.695E+008
12: (12) 1.776E+008 (13) 1.776E+008
13: (13) 1.858E+008 (14) 1.858E+008
14: (14) 1.942E+008 (15) 1.942E+008
15: (15) 2.029E+008 (16) 2.029E+008
16: (16) 2.122E+008 (17) 2.122E+008
17: (17) 2.220E+008 (18) 2.220E+008
18: (18) 2.327E+008 (19) 2.327E+008
19: (19) 2.444E+008 (20) 2.444E+008
20: (20) 2.571E+008 (21) 2.571E+008
```

Tensões cédula 7,9- $h=-0.60582$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.788E+007 (  2)-3.788E+007
  2: (  2)-6.817E+007 (  3)-6.817E+007
  3: (  3) 2.468E+007 (  4) 2.468E+007
  4: (  4) 6.983E+007 (  5) 6.983E+007
  5: (  5) 9.705E+007 (  6) 9.705E+007
  6: (  6) 1.158E+008 (  7) 1.158E+008
  7: (  7) 1.299E+008 (  8) 1.299E+008
  8: (  8) 1.413E+008 (  9) 1.413E+008
  9: (  9) 1.512E+008 ( 10) 1.512E+008
 10: ( 10) 1.601E+008 ( 11) 1.601E+008
 11: ( 11) 1.685E+008 ( 12) 1.685E+008
 12: ( 12) 1.767E+008 ( 13) 1.767E+008
 13: ( 13) 1.850E+008 ( 14) 1.850E+008
 14: ( 14) 1.934E+008 ( 15) 1.934E+008
 15: ( 15) 2.022E+008 ( 16) 2.022E+008
 16: ( 16) 2.114E+008 ( 17) 2.114E+008
 17: ( 17) 2.213E+008 ( 18) 2.213E+008
 18: ( 18) 2.320E+008 ( 19) 2.320E+008
 19: ( 19) 2.437E+008 ( 20) 2.437E+008
 20: ( 20) 2.565E+008 ( 21) 2.565E+008
```

Tensões cédula 8,9- $h=-0.16684$

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.254E+007 (  2)-3.254E+007
  2: (  2)-4.361E+007 (  3)-4.361E+007
  3: (  3) 4.068E+007 (  4) 4.068E+007
  4: (  4) 8.175E+007 (  5) 8.175E+007
  5: (  5) 1.066E+008 (  6) 1.066E+008
  6: (  6) 1.237E+008 (  7) 1.237E+008
  7: (  7) 1.368E+008 (  8) 1.368E+008
  8: (  8) 1.474E+008 (  9) 1.474E+008
  9: (  9) 1.567E+008 ( 10) 1.567E+008
 10: ( 10) 1.652E+008 ( 11) 1.652E+008
 11: ( 11) 1.732E+008 ( 12) 1.732E+008
 12: ( 12) 1.811E+008 ( 13) 1.811E+008
 13: ( 13) 1.891E+008 ( 14) 1.891E+008
 14: ( 14) 1.973E+008 ( 15) 1.973E+008
 15: ( 15) 2.059E+008 ( 16) 2.059E+008
 16: ( 16) 2.151E+008 ( 17) 2.151E+008
 17: ( 17) 2.249E+008 ( 18) 2.249E+008
 18: ( 18) 2.355E+008 ( 19) 2.355E+008
 19: ( 19) 2.471E+008 ( 20) 2.471E+008
 20: ( 20) 2.599E+008 ( 21) 2.599E+008
```

Tensões cédula 9,9- h=0.462781

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.488E+007 (  2)-2.488E+007
  2: (  2)-8.381E+006 (  3)-8.381E+006
  3: (  3) 6.363E+007 (  4) 6.363E+007
  4: (  4) 9.884E+007 (  5) 9.884E+007
  5: (  5) 1.203E+008 (  6) 1.203E+008
  6: (  6) 1.352E+008 (  7) 1.352E+008
  7: (  7) 1.467E+008 (  8) 1.467E+008
  8: (  8) 1.562E+008 (  9) 1.562E+008
  9: (  9) 1.646E+008 ( 10) 1.646E+008
 10: ( 10) 1.724E+008 ( 11) 1.724E+008
 11: ( 11) 1.799E+008 ( 12) 1.799E+008
 12: ( 12) 1.874E+008 ( 13) 1.874E+008
 13: ( 13) 1.950E+008 ( 14) 1.950E+008
 14: ( 14) 2.030E+008 ( 15) 2.030E+008
 15: ( 15) 2.114E+008 ( 16) 2.114E+008
 16: ( 16) 2.204E+008 ( 17) 2.204E+008
 17: ( 17) 2.300E+008 ( 18) 2.300E+008
 18: ( 18) 2.406E+008 ( 19) 2.406E+008
 19: ( 19) 2.521E+008 ( 20) 2.521E+008
 20: ( 20) 2.648E+008 ( 21) 2.648E+008
```

Tensões cédula 10,9- h=0.691285

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.210E+007 (  2)-2.210E+007
  2: (  2) 4.404E+006 (  3) 4.404E+006
  3: (  3) 7.196E+007 (  4) 7.196E+007
  4: (  4) 1.050E+008 (  5) 1.050E+008
  5: (  5) 1.252E+008 (  6) 1.252E+008
  6: (  6) 1.394E+008 (  7) 1.394E+008
  7: (  7) 1.503E+008 (  8) 1.503E+008
  8: (  8) 1.594E+008 (  9) 1.594E+008
  9: (  9) 1.675E+008 ( 10) 1.675E+008
 10: ( 10) 1.750E+008 ( 11) 1.750E+008
 11: ( 11) 1.823E+008 ( 12) 1.823E+008
 12: ( 12) 1.897E+008 ( 13) 1.897E+008
 13: ( 13) 1.972E+008 ( 14) 1.972E+008
 14: ( 14) 2.050E+008 ( 15) 2.050E+008
 15: ( 15) 2.134E+008 ( 16) 2.134E+008
 16: ( 16) 2.223E+008 ( 17) 2.223E+008
 17: ( 17) 2.319E+008 ( 18) 2.319E+008
 18: ( 18) 2.424E+008 ( 19) 2.424E+008
 19: ( 19) 2.539E+008 ( 20) 2.539E+008
 20: ( 20) 2.666E+008 ( 21) 2.666E+008
```

Tensões cédula 11,9- h=0.24557

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.752E+007 (  2)-2.752E+007
  2: (  2)-2.053E+007 (  3)-2.053E+007
  3: (  3) 5.571E+007 (  4) 5.571E+007
  4: (  4) 9.294E+007 (  5) 9.294E+007
  5: (  5) 1.155E+008 (  6) 1.155E+008
  6: (  6) 1.312E+008 (  7) 1.312E+008
  7: (  7) 1.433E+008 (  8) 1.433E+008
  8: (  8) 1.532E+008 (  9) 1.532E+008
  9: (  9) 1.619E+008 ( 10) 1.619E+008
 10: ( 10) 1.699E+008 ( 11) 1.699E+008
 11: ( 11) 1.776E+008 ( 12) 1.776E+008
 12: ( 12) 1.852E+008 ( 13) 1.852E+008
 13: ( 13) 1.930E+008 ( 14) 1.930E+008
 14: ( 14) 2.010E+008 ( 15) 2.010E+008
 15: ( 15) 2.095E+008 ( 16) 2.095E+008
 16: ( 16) 2.185E+008 ( 17) 2.185E+008
 17: ( 17) 2.283E+008 ( 18) 2.283E+008
 18: ( 18) 2.388E+008 ( 19) 2.388E+008
 19: ( 19) 2.504E+008 ( 20) 2.504E+008
 20: ( 20) 2.631E+008 ( 21) 2.631E+008
```

Tensões cédula 12,9- h=-0.40426

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.543E+007 (  2)-3.543E+007
  2: (  2)-5.689E+007 (  3)-5.689E+007
  3: (  3) 3.203E+007 (  4) 3.203E+007
  4: (  4) 7.530E+007 (  5) 7.530E+007
  5: (  5) 1.014E+008 (  6) 1.014E+008
  6: (  6) 1.194E+008 (  7) 1.194E+008
  7: (  7) 1.330E+008 (  8) 1.330E+008
  8: (  8) 1.441E+008 (  9) 1.441E+008
  9: (  9) 1.537E+008 ( 10) 1.537E+008
 10: ( 10) 1.624E+008 ( 11) 1.624E+008
 11: ( 11) 1.707E+008 ( 12) 1.707E+008
 12: ( 12) 1.788E+008 ( 13) 1.788E+008
 13: ( 13) 1.869E+008 ( 14) 1.869E+008
 14: ( 14) 1.952E+008 ( 15) 1.952E+008
 15: ( 15) 2.039E+008 ( 16) 2.039E+008
 16: ( 16) 2.131E+008 ( 17) 2.131E+008
 17: ( 17) 2.230E+008 ( 18) 2.230E+008
 18: ( 18) 2.336E+008 ( 19) 2.336E+008
 19: ( 19) 2.453E+008 ( 20) 2.453E+008
 20: ( 20) 2.580E+008 ( 21) 2.580E+008
```

Tensões cédula 13,9- h=-0.61532

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.799E+007 (  2)-3.799E+007
  2: (  2)-6.870E+007 (  3)-6.870E+007
  3: (  3) 2.433E+007 (  4) 2.433E+007
  4: (  4) 6.957E+007 (  5) 6.957E+007
  5: (  5) 9.685E+007 (  6) 9.685E+007
  6: (  6) 1.156E+008 (  7) 1.156E+008
  7: (  7) 1.297E+008 (  8) 1.297E+008
  8: (  8) 1.412E+008 (  9) 1.412E+008
  9: (  9) 1.511E+008 ( 10) 1.511E+008
 10: ( 10) 1.600E+008 ( 11) 1.600E+008
 11: ( 11) 1.684E+008 ( 12) 1.684E+008
 12: ( 12) 1.767E+008 ( 13) 1.767E+008
 13: ( 13) 1.849E+008 ( 14) 1.849E+008
 14: ( 14) 1.933E+008 ( 15) 1.933E+008
 15: ( 15) 2.021E+008 ( 16) 2.021E+008
 16: ( 16) 2.114E+008 ( 17) 2.114E+008
 17: ( 17) 2.213E+008 ( 18) 2.213E+008
 18: ( 18) 2.320E+008 ( 19) 2.320E+008
 19: ( 19) 2.436E+008 ( 20) 2.436E+008
 20: ( 20) 2.564E+008 ( 21) 2.564E+008
```

Tensões cédula 14,9- h=-0.28184

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.394E+007 (  2)-3.394E+007
  2: (  2)-5.004E+007 (  3)-5.004E+007
  3: (  3) 3.649E+007 (  4) 3.649E+007
  4: (  4) 7.862E+007 (  5) 7.862E+007
  5: (  5) 1.041E+008 (  6) 1.041E+008
  6: (  6) 1.217E+008 (  7) 1.217E+008
  7: (  7) 1.350E+008 (  8) 1.350E+008
  8: (  8) 1.458E+008 (  9) 1.458E+008
  9: (  9) 1.553E+008 ( 10) 1.553E+008
 10: ( 10) 1.638E+008 ( 11) 1.638E+008
 11: ( 11) 1.720E+008 ( 12) 1.720E+008
 12: ( 12) 1.800E+008 ( 13) 1.800E+008
 13: ( 13) 1.880E+008 ( 14) 1.880E+008
 14: ( 14) 1.963E+008 ( 15) 1.963E+008
 15: ( 15) 2.050E+008 ( 16) 2.050E+008
 16: ( 16) 2.141E+008 ( 17) 2.141E+008
 17: ( 17) 2.240E+008 ( 18) 2.240E+008
 18: ( 18) 2.346E+008 ( 19) 2.346E+008
 19: ( 19) 2.462E+008 ( 20) 2.462E+008
 20: ( 20) 2.590E+008 ( 21) 2.590E+008
```

Tensões cédula 15,9- h=0.215232

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
 1: ( 1)-2.789E+007 ( 2)-2.789E+007
 2: ( 2)-2.223E+007 ( 3)-2.223E+007
 3: ( 3) 5.461E+007 ( 4) 5.461E+007
 4: ( 4) 9.212E+007 ( 5) 9.212E+007
 5: ( 5) 1.149E+008 ( 6) 1.149E+008
 6: ( 6) 1.307E+008 ( 7) 1.307E+008
 7: ( 7) 1.428E+008 ( 8) 1.428E+008
 8: ( 8) 1.528E+008 ( 9) 1.528E+008
 9: ( 9) 1.615E+008 (10) 1.615E+008
10: (10) 1.695E+008 (11) 1.695E+008
11: (11) 1.773E+008 (12) 1.773E+008
12: (12) 1.849E+008 (13) 1.849E+008
13: (13) 1.927E+008 (14) 1.927E+008
14: (14) 2.008E+008 (15) 2.008E+008
15: (15) 2.092E+008 (16) 2.092E+008
16: (16) 2.183E+008 (17) 2.183E+008
17: (17) 2.280E+008 (18) 2.280E+008
18: (18) 2.386E+008 (19) 2.386E+008
19: (19) 2.501E+008 (20) 2.501E+008
20: (20) 2.629E+008 (21) 2.629E+008
```

Tensões cédula 16,9- h=0.456371

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
 1: ( 1)-2.496E+007 ( 2)-2.496E+007
 2: ( 2)-8.740E+006 ( 3)-8.740E+006
 3: ( 3) 6.340E+007 ( 4) 6.340E+007
 4: ( 4) 9.866E+007 ( 5) 9.866E+007
 5: ( 5) 1.201E+008 ( 6) 1.201E+008
 6: ( 6) 1.351E+008 ( 7) 1.351E+008
 7: ( 7) 1.466E+008 ( 8) 1.466E+008
 8: ( 8) 1.561E+008 ( 9) 1.561E+008
 9: ( 9) 1.645E+008 (10) 1.645E+008
10: (10) 1.723E+008 (11) 1.723E+008
11: (11) 1.798E+008 (12) 1.798E+008
12: (12) 1.873E+008 (13) 1.873E+008
13: (13) 1.950E+008 (14) 1.950E+008
14: (14) 2.029E+008 (15) 2.029E+008
15: (15) 2.113E+008 (16) 2.113E+008
16: (16) 2.203E+008 (17) 2.203E+008
17: (17) 2.300E+008 (18) 2.300E+008
18: (18) 2.405E+008 (19) 2.405E+008
19: (19) 2.520E+008 (20) 2.520E+008
20: (20) 2.647E+008 (21) 2.647E+008
```

Tensões cédula 17,9- h=0.354746

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.619E+007 (  2)-2.619E+007
  2: (  2)-1.443E+007 (  3)-1.443E+007
  3: (  3) 5.969E+007 (  4) 5.969E+007
  4: (  4) 9.590E+007 (  5) 9.590E+007
  5: (  5) 1.179E+008 (  6) 1.179E+008
  6: (  6) 1.332E+008 (  7) 1.332E+008
  7: (  7) 1.450E+008 (  8) 1.450E+008
  8: (  8) 1.547E+008 (  9) 1.547E+008
  9: (  9) 1.632E+008 ( 10) 1.632E+008
 10: ( 10) 1.712E+008 ( 11) 1.712E+008
 11: ( 11) 1.788E+008 ( 12) 1.788E+008
 12: ( 12) 1.863E+008 ( 13) 1.863E+008
 13: ( 13) 1.940E+008 ( 14) 1.940E+008
 14: ( 14) 2.020E+008 ( 15) 2.020E+008
 15: ( 15) 2.104E+008 ( 16) 2.104E+008
 16: ( 16) 2.195E+008 ( 17) 2.195E+008
 17: ( 17) 2.292E+008 ( 18) 2.292E+008
 18: ( 18) 2.397E+008 ( 19) 2.397E+008
 19: ( 19) 2.512E+008 ( 20) 2.512E+008
 20: ( 20) 2.639E+008 ( 21) 2.639E+008
```

Tensões cédula 18,9- h=0.065151

Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-2.972E+007 (  2)-2.972E+007
  2: (  2)-3.063E+007 (  3)-3.063E+007
  3: (  3) 4.914E+007 (  4) 4.914E+007
  4: (  4) 8.804E+007 (  5) 8.804E+007
  5: (  5) 1.116E+008 (  6) 1.116E+008
  6: (  6) 1.280E+008 (  7) 1.280E+008
  7: (  7) 1.404E+008 (  8) 1.404E+008
  8: (  8) 1.507E+008 (  9) 1.507E+008
  9: (  9) 1.596E+008 ( 10) 1.596E+008
 10: ( 10) 1.678E+008 ( 11) 1.678E+008
 11: ( 11) 1.757E+008 ( 12) 1.757E+008
 12: ( 12) 1.834E+008 ( 13) 1.834E+008
 13: ( 13) 1.913E+008 ( 14) 1.913E+008
 14: ( 14) 1.994E+008 ( 15) 1.994E+008
 15: ( 15) 2.080E+008 ( 16) 2.080E+008
 16: ( 16) 2.170E+008 ( 17) 2.170E+008
 17: ( 17) 2.268E+008 ( 18) 2.268E+008
 18: ( 18) 2.374E+008 ( 19) 2.374E+008
 19: ( 19) 2.490E+008 ( 20) 2.490E+008
 20: ( 20) 2.617E+008 ( 21) 2.617E+008
```

Tensões cédula 19,9- h=-0.27358

Output of Beam: Worst Stress.

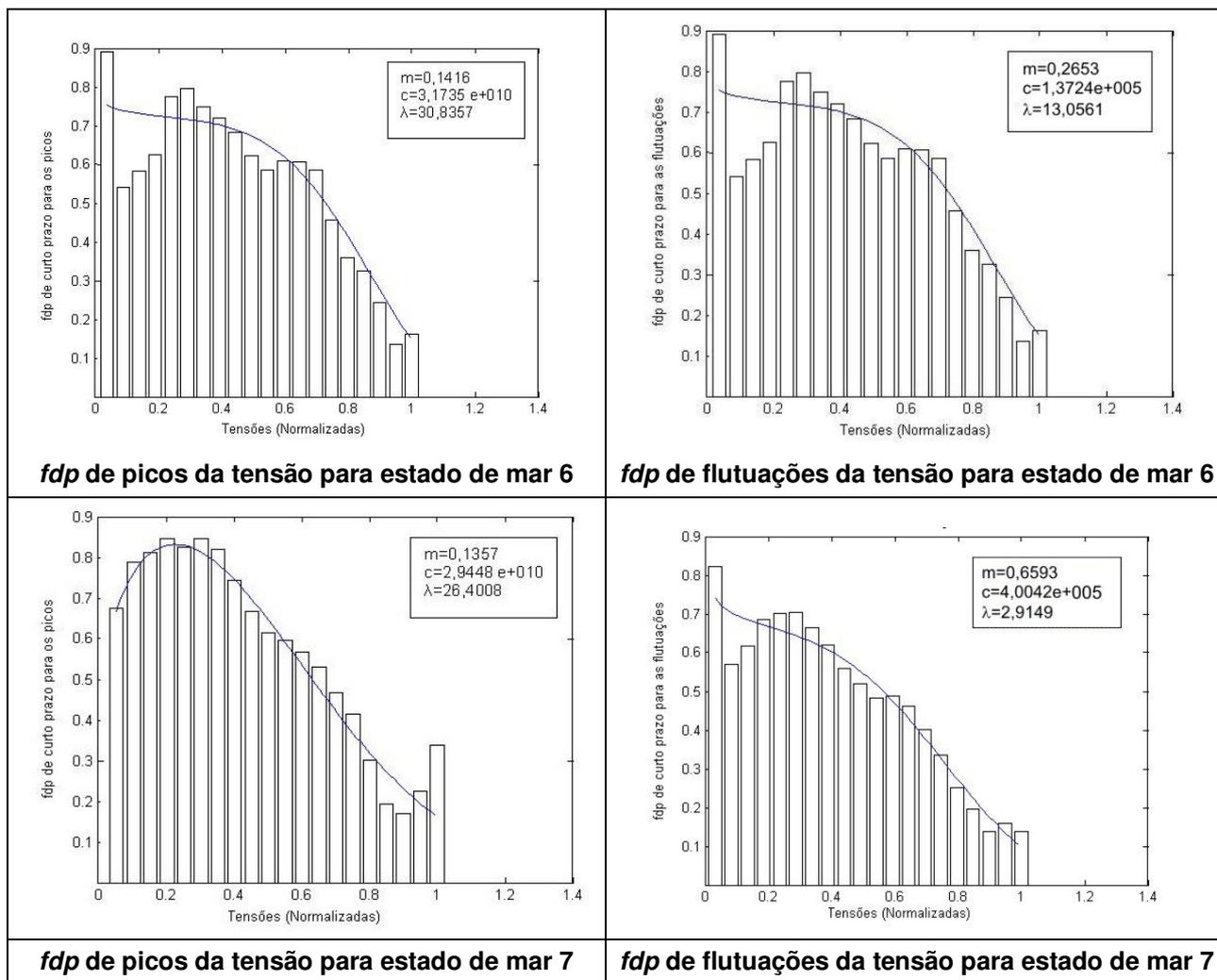
```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.384E+007 (  2)-3.384E+007
  2: (  2)-4.958E+007 (  3)-4.958E+007
  3: (  3) 3.679E+007 (  4) 3.679E+007
  4: (  4) 7.885E+007 (  5) 7.885E+007
  5: (  5) 1.043E+008 (  6) 1.043E+008
  6: (  6) 1.218E+008 (  7) 1.218E+008
  7: (  7) 1.351E+008 (  8) 1.351E+008
  8: (  8) 1.460E+008 (  9) 1.460E+008
  9: (  9) 1.554E+008 ( 10) 1.554E+008
 10: ( 10) 1.639E+008 ( 11) 1.639E+008
 11: ( 11) 1.721E+008 ( 12) 1.721E+008
 12: ( 12) 1.801E+008 ( 13) 1.801E+008
 13: ( 13) 1.881E+008 ( 14) 1.881E+008
 14: ( 14) 1.964E+008 ( 15) 1.964E+008
 15: ( 15) 2.050E+008 ( 16) 2.050E+008
 16: ( 16) 2.142E+008 ( 17) 2.142E+008
 17: ( 17) 2.240E+008 ( 18) 2.240E+008
 18: ( 18) 2.347E+008 ( 19) 2.347E+008
 19: ( 19) 2.463E+008 ( 20) 2.463E+008
 20: ( 20) 2.590E+008 ( 21) 2.590E+008
```

Tensões cédula 20,9- h=-0.45892

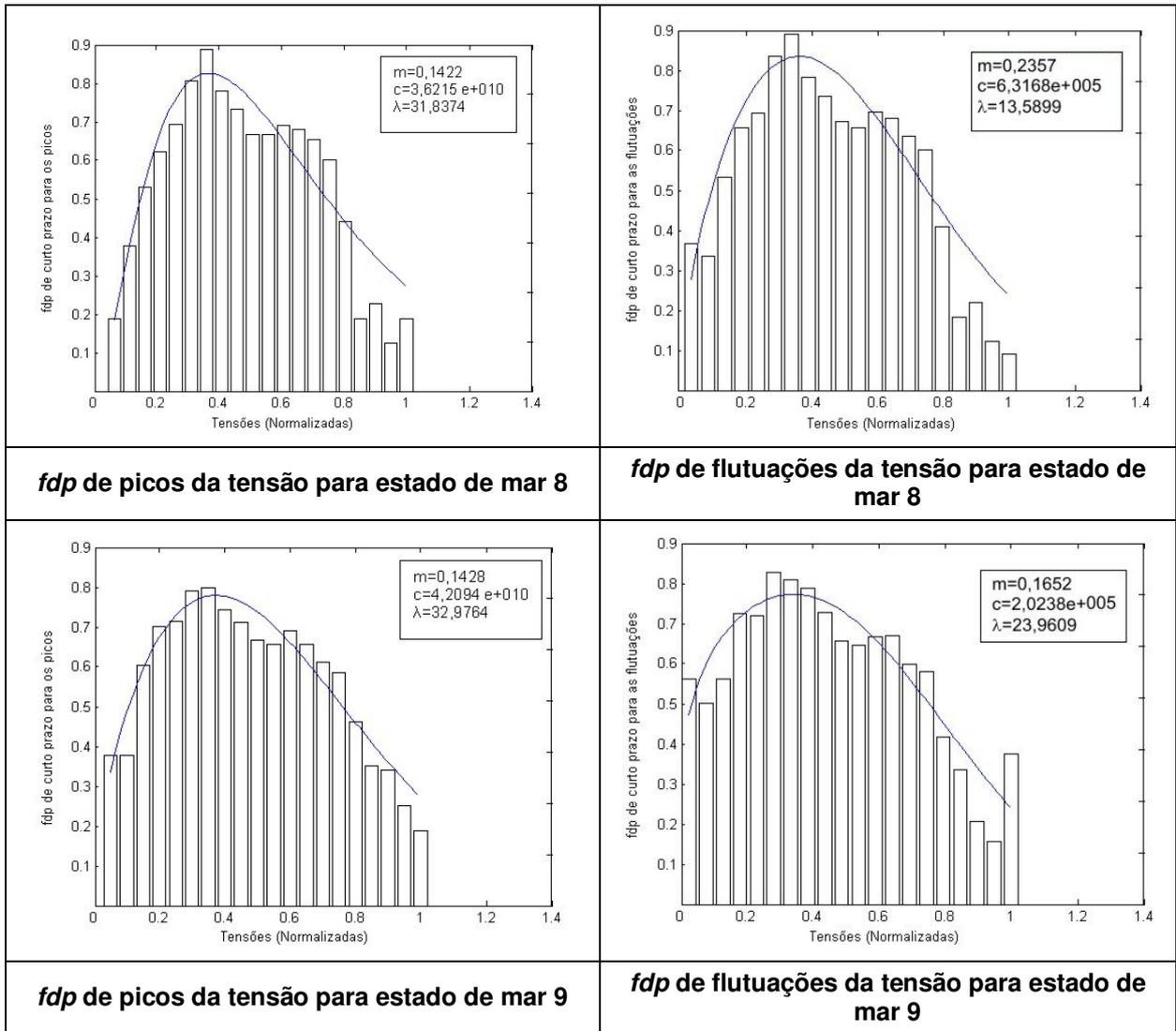
Output of Beam: Worst Stress.

```
          Group 1 of type 22
Ele #: (node)value ...
  1: (  1)-3.609E+007 (  2)-3.609E+007
  2: (  2)-5.995E+007 (  3)-5.995E+007
  3: (  3) 3.003E+007 (  4) 3.003E+007
  4: (  4) 7.382E+007 (  5) 7.382E+007
  5: (  5) 1.002E+008 (  6) 1.002E+008
  6: (  6) 1.184E+008 (  7) 1.184E+008
  7: (  7) 1.322E+008 (  8) 1.322E+008
  8: (  8) 1.434E+008 (  9) 1.434E+008
  9: (  9) 1.530E+008 ( 10) 1.530E+008
 10: ( 10) 1.618E+008 ( 11) 1.618E+008
 11: ( 11) 1.701E+008 ( 12) 1.701E+008
 12: ( 12) 1.782E+008 ( 13) 1.782E+008
 13: ( 13) 1.864E+008 ( 14) 1.864E+008
 14: ( 14) 1.947E+008 ( 15) 1.947E+008
 15: ( 15) 2.034E+008 ( 16) 2.034E+008
 16: ( 16) 2.127E+008 ( 17) 2.127E+008
 17: ( 17) 2.225E+008 ( 18) 2.225E+008
 18: ( 18) 2.332E+008 ( 19) 2.332E+008
 19: ( 19) 2.448E+008 ( 20) 2.448E+008
 20: ( 20) 2.576E+008 ( 21) 2.576E+008
```

ANEXO D GRÁFICOS DAS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE CURTO PRAZO DE PICOS E FLUTUAÇÕES DA TENSÃO

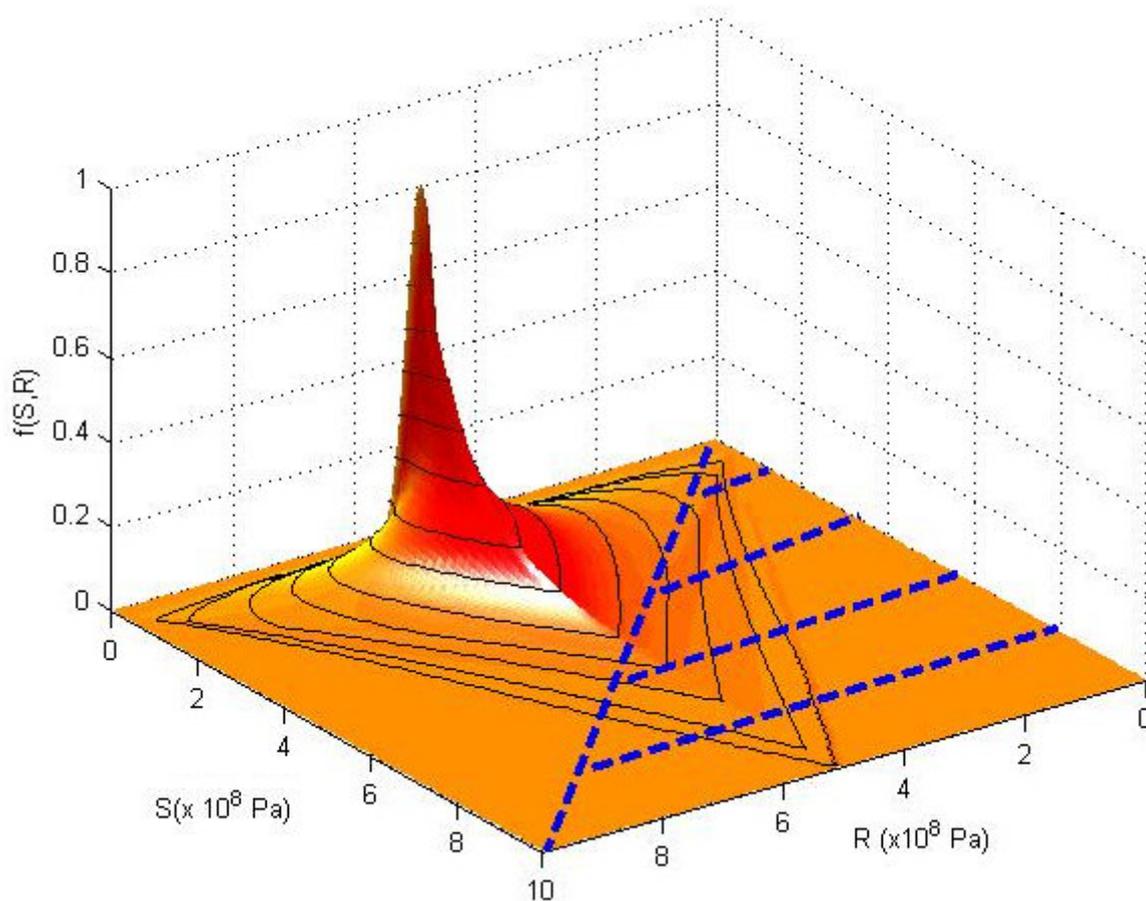


Continuação



ANEXO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA PROBABILIDADE DE FALHA POR FADIGA E POR ESCOAMENTO

Superfície tridimensional que representa a probabilidade conjunta do limite de resistência à fadiga e a tensão alternada corrigida

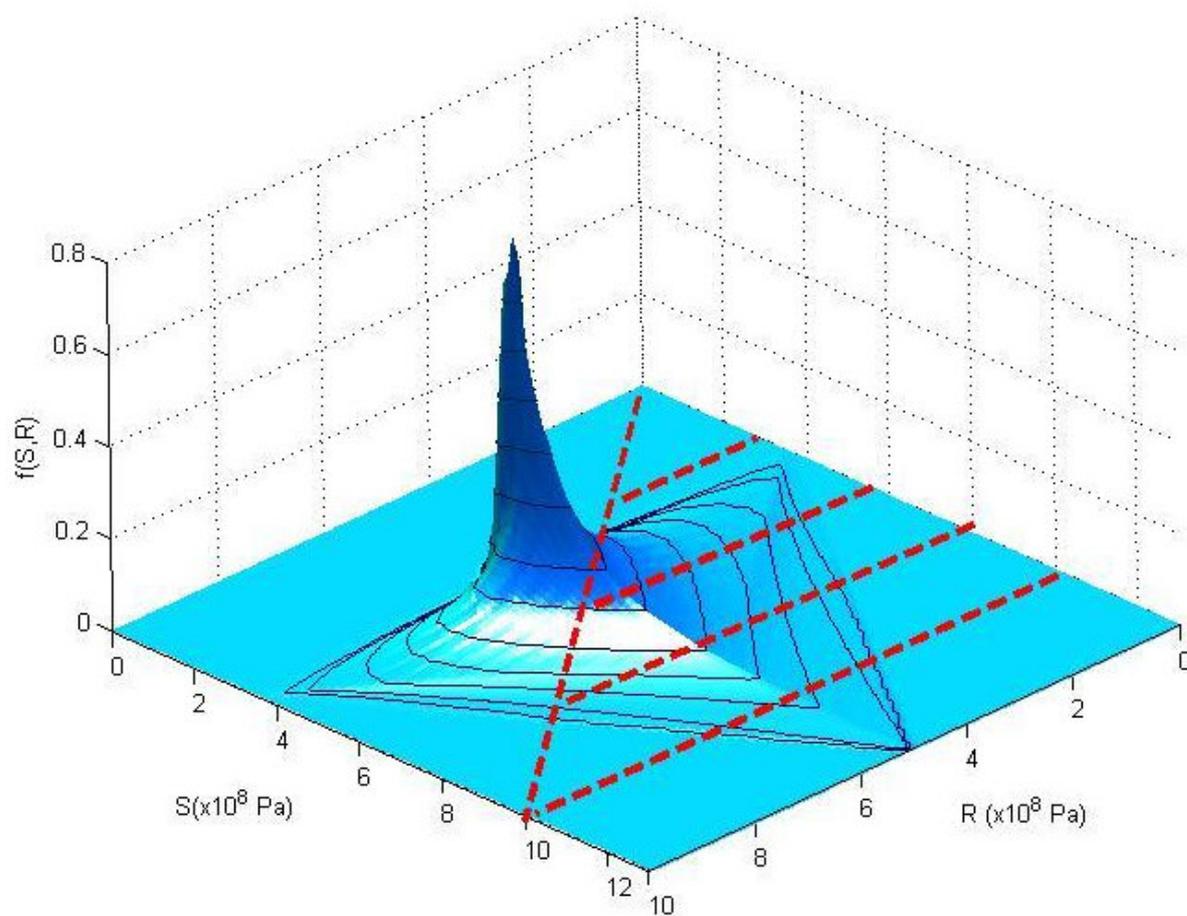


R (S_f)- limite de resistência à fadiga

S ($(\sigma_a)_c$)- tensão alternada corrigida

continuação

Superfície tridimensional que representa a probabilidade conjunta da tensão de escoamento e a tensão estática



R (S_e)- tensão de escoamento

S (σ_{est})- tensão estática

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](#)