

# 1 Introdução

## 1.1. Caracterização do Problema

O início da exploração de petróleo em reservatórios situados na área *offshore* no Brasil se deu em 1968, na Bacia de Sergipe, campo de Guaricema, situado em lâmina d'água de cerca de 30 metros na costa do estado de Sergipe, na região Nordeste. Hoje em dia, passados pouco mais de quarenta anos, a produção em bacias *offshore* é responsável por mais de 80% do petróleo prospectado no Brasil. Face aos grandes desafios enfrentados, não é por acaso que o país assumiu a liderança mundial em tecnologias de exploração em águas profundas: já em 2003 o recorde de prospecção a 1886 m de profundidade em lâmina d'água foi alcançado no campo de Roncador na Bacia de Campos, com a completação e o início de produção do poço RO-21; no dia 1 de maio de 2009 deu-se início à produção de óleo no Pólo Pré-Sal da Bacia de Santos com o Teste de Longa Duração (TLD) do campo de Tupi com volume de óleo equivalente (petróleo e gás) recuperável estimado entre 5 e 8 bilhões de barris. Este é o maior já descoberto no Brasil e pode vir a aumentar as reservas de petróleo e gás do país em até 60%. Com 28.5° API, baixa acidez e baixo teor de enxofre, este é um petróleo de alta qualidade extraído em condições bastante severas: 2140 m de profundidade em lâmina d'água, mais de 3000 m a partir do fundo do mar, abaixo de 2000 m da camada de sal e a uma distância de 300 km da costa do estado de São Paulo. A Fig. 1.1 [64] ilustra uma série de recordes relativos à profundidade da lâmina d'água das instalações marítimas de produção de petróleo, colocadas em operação pela Petrobras. Nesta figura, pode-se observar que a maior parte das reservas brasileiras de petróleo e gás natural está localizada em camadas geológicas denominadas pós-sal na Bacia de Campos com predominância de óleo pesado. No entanto, com as descobertas recentes de grandes volumes de óleo leve e gás natural na camada de pré-sal na Bacia de Santos se marca o início de um

novo modelo exploratório demandando por tecnologias mais resistentes à corrosão, altas temperaturas e pressão.

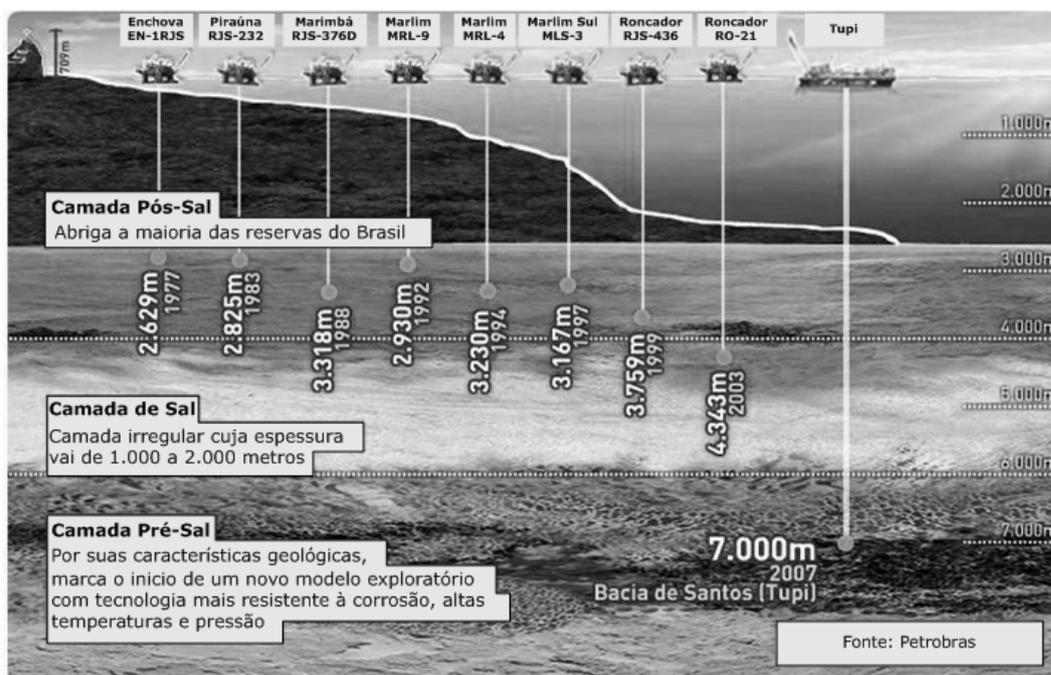


Figura 1.1 – Evolução da tecnologia brasileira em águas profundas [64].

Entre os principais agentes que possibilitaram este desenvolvimento tecnológico na produção *offshore*, estão as linhas flexíveis (*risers* flexíveis) utilizadas no transporte do óleo, desde a cabeça de poço até as plataformas baseadas em sistemas flutuantes (plataformas semi-submersíveis ou navios). As linhas flexíveis estão continuamente submetidas a severas condições ambientais e ações dinâmicas (correnteza, ondas e indiretamente ventos atuando sobre o casco da plataforma), razão pela qual são consideradas como uma das partes críticas do complexo sistema de produção *offshore*. Qualquer falha importante no sistema pode deteriorar o ambiente marinho e provocar uma interrupção na produção de óleo, onde altos custos estão envolvidos, inclusive para recuperação do meio ambiente. As linhas flexíveis se caracterizam por serem estruturas compostas pelo agrupamento de diversas camadas concêntricas de materiais metálicos e poliméricos. A sua composição, quanto ao arranjo estrutural, é semelhante a um material compósito, onde cada camada responde a um tipo de solicitação e tem uma função específica. Neste caso, as camadas poliméricas têm a função de conferir à linha estanqueidade, resistência à corrosão marinha, baixa rigidez à

flexão e redução do atrito entre as camadas metálicas. Estas, por sua vez, destinam-se a resistir os carregamentos de pressão interna e externa, de tração e de torção. Acrescente-se o fato da disposição das camadas metálicas serem na forma helicoidal, o que também confere à estrutura rigidez à flexão menor do que as camadas sólidas.

A composição das linhas flexíveis variam de acordo com as diferentes concepções resultantes do desenvolvimento tecnológico. No entanto, para efeito de classificação, podem ser divididas em apenas dois grupos: linhas de camadas não-aderentes (*unbonded*) e linhas de camadas aderentes (*bonded*). A diferença básica, apontada por esta divisão, recai sobre a possibilidade das camadas possuírem liberdade de movimento relativo entre si nas primeiras, ou de não permitir o movimento entre as camadas nas segundas. Nas linhas com camadas aderentes (Fig. 1.2) a estrutura metálica é integrada ao conjunto num processo de vulcanização com materiais elastoméricos. Isso faz com que as camadas atuem de maneira uniforme, ou seja, como uma única camada.

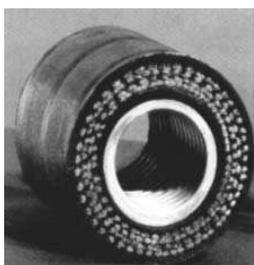


Figura 1.2 – Linha flexível aderente [78].

Nas linhas flexíveis não-aderentes, suas camadas são livres para se moverem relativamente entre si, permitindo ao duto fletir a maiores curvaturas do que dutos de aço da mesma dimensão.

A Fig. 1.3 ilustra uma típica linha flexível não-aderente com as diversas camadas constituintes cuja função estrutural de cada uma é descrita na Tabela 1.1.

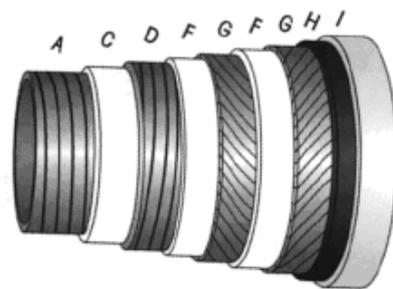


Figura 1.3 – Típica linha flexível não-aderente [27].

Tabela 1.1 – Descrição das camadas de uma Linha Flexível não-aderente [27].

Camadas	Função Estrutural
A - Carcaça Intertravada	Resistir à Pressão Externa
C - Camada Plástica	Estanqueidade
D - Camada Zeta	Resistir a esforços radiais devido à Pressão Externa e Interna
F - Camada Plástica	Estanqueidade e diminuição de atrito
G - Armaduras de Tração	Rigidez à torção e aos carregamentos axiais
H - Adesivo	Aderência das Camadas G e I
I - Camada Plástica Externa	Proteger a linha dos efeitos do ambiente marinho e assegurar estanqueidade

Os efeitos dos esforços dinâmicos nas linhas flexíveis geralmente ocorrem quando estas interligam pontos entre unidades de produção e equipamentos submarinos. Os movimentos relativos entre esses pontos são devidos às forças representadas por carregamentos oriundos de condições ambientais, tais como ventos, correnteza e irregularidades no fundo. Essas solicitações transmitidas às linhas dificultam a operação em águas profundas. Para a redução dos efeitos causados por essas forças, são utilizadas configurações de *risers* específicas, tais como:

#### a) Configuração Catenária Simples

A configuração em catenária simples ou *free hanging*, mostrada na Fig. 1.4, é basicamente uma catenária livre, onde o *riser* fica preso à plataforma e se estende livremente até o solo. Esta pode ser considerada a configuração mais interessante devido à simplicidade de sua forma. Isso se deve a baixa utilização de componentes redutores de esforços, o que possibilita que esta configuração tenha um baixo custo de material e de instalação [78]. Com o aumento da profundidade dos poços a serem explorados, três problemas podem inviabilizar uma catenária [85]: excesso de tração no topo, pois todo o comprimento suspenso é sustentado pelo ponto de conexão com a plataforma; compressão dinâmica, relacionada à ocorrência de flambagem no ponto de contato com o solo (*touch down point* ou TDP) transmitido ao *riser* quando ondas muito grandes atingem a plataforma; baixa vida útil devido à fadiga, principalmente no TDP e no topo. Esta configuração é uma solução especialmente potencial para aplicações em águas profundas com ambientes moderados.

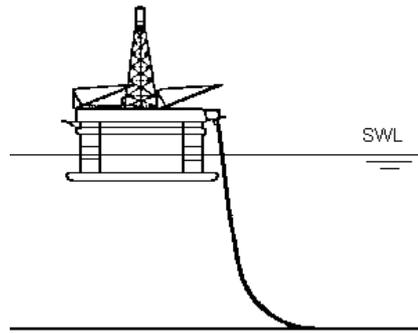


Figura 1.4 – Riser na configuração catenária livre.

### b) Configuração *Lazy-wave*

A configuração *lazy-wave*, apresentada na Fig. 1.5, é obtida com a utilização de elementos de flutuação (flutuadores) distribuídos em um trecho central, o que faz com que após o equilíbrio estático inicial, o sistema assumira uma forma “ondulada”, e a seção inferior do *riser* permaneça apoiada em catenária no fundo do mar. Os flutuadores aliviam a tração no topo do *riser* devido ao peso próprio já que compensam parte deste peso e podem diminuir a movimentação no TDP, aumentando a vida útil do *riser* e evitando a compressão dinâmica. Esta configuração permite acompanhar os movimentos da plataforma devido a sua característica “complacente” e é aplicado em águas profundas com ambientes severos, entre as desvantagens estão sua complexa instalação e alto custo.

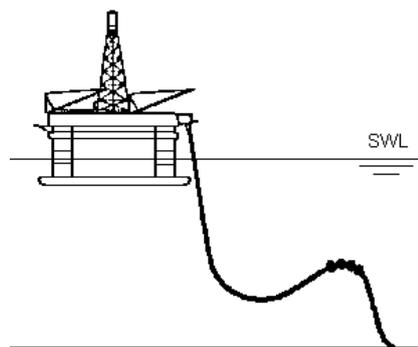


Figura 1.5 – Riser na configuração *Lazy-wave*.

### c) Configuração *Steep-wave*

A configuração *steep-wave*, mostrada na Fig. 1.6, é semelhante à geometria da *lazy-wave*, porém o trecho de flutuação prolonga-se até próximo a extremidade inferior da linha na ancoragem. Nesta configuração a extremidade inferior da

linha não repousa em catenária no fundo do mar, e a ancoragem do *riser* se dá sob tração em uma base fixa no leito marinho. Esta configuração é menos “complacente” que a configuração *lazy-wave*, não apresenta problema no TDP e é recomendada para situações em que existe um espaço muito pequeno para o segmento apoiado.

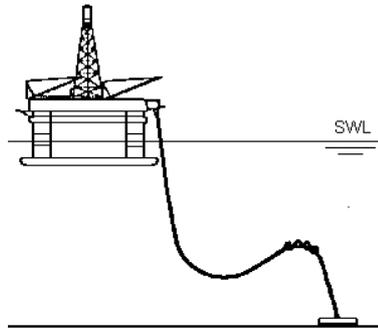


Figura 1.6 – *Riser* na configuração *Steep-wave*.

#### d) Configuração *Lazy-s*

A configuração *lazy-s*, mostrada na Fig. 1.7, é caracterizada por um elemento de flutuação concentrado (uma bóia) em uma posição intermediária da linha, onde uma catenária suspensa parte do navio e é conectada à bóia. Por sua vez, da bóia parte uma catenária simples que se estende até o fundo do mar. A bóia tem como funções impedir a transferência direta de esforços dinâmicos no TDP e suportar parte do peso do *riser*, reduzindo a tração estática no ponto de conexão com a plataforma. O movimento no TDP é controlado pelo movimento lateral da bóia. Uma bóia maior é suscetível ao aumento no carregamento hidrodinâmico, sendo isto uma consideração importante no projeto deste tipo de configuração [6]. *Risers* dispostos desta maneira são menos adaptáveis ao movimento da plataforma levando a maiores esforços [85].

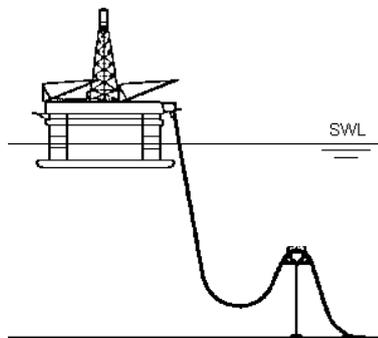


Figura 1.7 – *Riser* na configuração *Lazy-s*.

### e) Configuração *Steep-s*

A configuração *steep-s*, mostrada na Fig. 1.8, é semelhante à geometria da *step-wave*, porém o trecho de flutuação é fornecido pela utilização de uma bóia. Esta configuração é mais suscetível à instabilidade torsional que a configuração *lazy-s* [6], e é recomendada em situações em que o fluido interno apresenta grandes variações de densidade e para situações em que exista um espaço muito pequeno para o segmento apoiado [85].

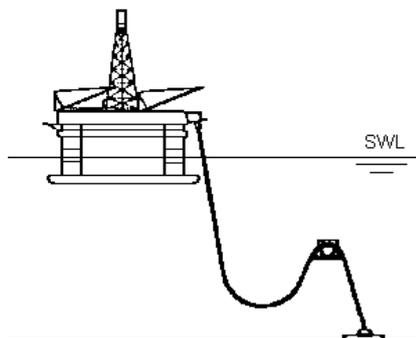


Figura 1.8 – Riser na configuração *Steep-s*.

### f) Configuração *Pliant-wave*

Na configuração *pliant-wave*, apresentada na Fig. 1.9, um tendão fixa o tubo próximo ao solo, com a função de diminuir o movimento lateral e evitar que esforços sejam transmitidos à extremidade. Esta configuração é normalmente utilizada quando o espaço disponível no campo é pequeno ou existe o perigo de que ocorra choque entre *risers* [80].

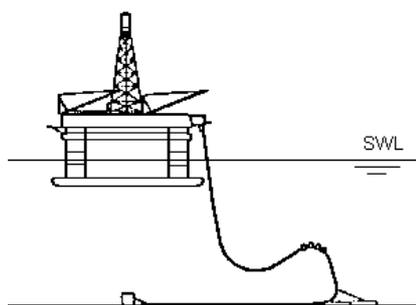


Figura 1.9 – Riser na configuração *Pliant-wave*.

A seleção da configuração do sistema de *riser* em operação é baseada em considerações do comportamento estático e dinâmico, da facilidade de instalação, da adaptabilidade e do custo.

Os *risers* rígidos constituem-se em uma alternativa aos *risers* flexíveis, formados por tubos de aço em serie com seções de aproximadamente 12 metros de comprimento, acoplados umas às outras, geralmente por soldas a topo. Quando em lâminas d'água profundas podem estar envolvidos por flutuadores, para diminuir o seu peso aparente. Os *risers* rígidos são pouco resistentes aos esforços gerados pela movimentação da plataforma sendo, maiormente utilizados em atividades de perfuração e de produção, em plataformas fixas ou baseadas em plataformas de pernas tensionadas (*Tension Leg Platform – TLP*), que apresentam deslocamentos relativamente menores do que os que ocorrem em plataformas semi-submersíveis ou navios. No entanto, recentemente configurações de *risers* rígidos em catenária (*SCR – Steel Catenary Risers*) conectadas a plataformas semi-submersíveis têm surgido como principal alternativa aos *risers* flexíveis para aplicações em águas profundas com ambientes moderados. Na Petrobras a primeira instalação de um *riser* rígido foi realizada no ano de 1998 na plataforma P-18, localizada no campo de Marlim, na Bacia de Campos, em lâmina d'água de 910m. Esta instalação foi um fato histórico marcante, pois além de ter sido a primeira instalação de um SCR na Petrobras, foi a primeira instalação no mundo de um SCR em uma unidade flutuante semi-submersível [77]. As principais vantagens dos *risers* rígidos são: permitem o uso de grandes diâmetros ainda não provados em *risers* flexíveis; maior faixa de trabalho quanto à pressão e à temperatura; a operação com equipamentos convencionais para a instalação e desinstalação; possuem impacto marginal no projeto da estrutura flutuante; suportam intervenções de sonda; apresentam custo de investimento menor. Entretanto, apesar dos benefícios de sua utilização, os *risers* rígidos demandam desconexão submarina; necessitam de *flex-joint* (elo de conexão e acoplamento do *riser* rígido com a plataforma); despedem maior tempo na operação de instalação e remoção; provocam tensionamentos não desejáveis nos equipamentos submarinos.

Além das modalidades de *risers* flexíveis e rígidos empregam-se nas atividades de produção também os sistemas híbridos de *risers* (Fig. 1.10). Estes sistemas objetivam minimizar os principais problemas encontrados da utilização de um único tipo de *riser* em águas profundas: a necessidade de maiores diâmetros para linhas flexíveis, o que inviabiliza o transporte e produção; e para

os *risers* rígidos em catenária (SCR), a presença de esforços concentrados na região de topo e em contato com o solo.

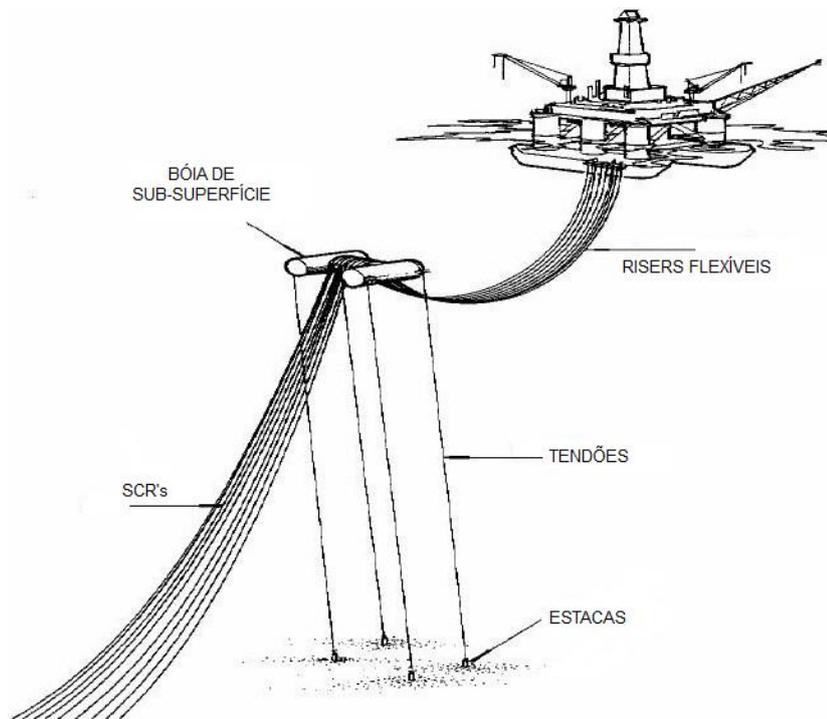


Figura 1.10 – Configuração híbrida de *Risers* [26].

As condições de trabalho requeridas na superfície interna e externa do *riser* são muito bem definidas, exigindo-se materiais que devem combinar as melhores propriedades das cerâmicas e dos metais: baixa densidade e alta resistência, boa resistência à corrosão e à temperatura, alta tenacidade à fratura e boa usinabilidade, etc. Uma alternativa para atingir tais exigências é o emprego dos materiais com gradação funcional (MGF), que constituem-se numa nova geração de compósitos formados por duas ou mais fases constituintes, cuja principal característica é possuir uma composição continuamente variável. Estes materiais quando utilizados com diligência na prática da engenharia podem reduzir as tensões térmicas, as tensões residuais e a concentração de tensões na região crítica de transição, como ocorre nas configurações de *risers* de múltiplas camadas. Neste trabalho procura-se avaliar o possível emprego de MGF no projeto de *risers* com objetivo de atender as múltiplas, e por vezes conflitantes, características constitutivas de *risers* flexíveis e rígidos de grande esbeltez.

Devido à sua versatilidade, o método dos elementos finitos é hoje a alternativa mais adequada para a representação numérica das análises estática e

dinâmica de linhas, em que os efeitos não-lineares do comportamento estrutural e de carregamento a que a linha está submetida são incorporados de forma direta na formulação. No movimento de uma linha marítima podem-se identificar comportamentos classificados em três categorias, diferenciadas pelas escalas de tempo resultantes das características físicas e do carregamento a que está submetida [88]:

- a) Movimentos causados pela resposta quasi-estática da estrutura flutuante e da linha às cargas de correnteza e aos efeitos de baixa frequência (segunda ordem) de ondas e ventos. Nesta categoria, os movimentos apresentam grande amplitude (5% da lâmina d'água) e baixíssima frequência, com períodos naturais típicos de 100s, devido a que a rigidez efetiva do *riser* é pequena comparada à grande massa da estrutura flutuante.
- b) Movimentos associados à resposta dinâmica da estrutura flutuante e da própria linha ao carregamento de ondas (em efeitos de primeira ordem). Nesta categoria, encontram-se os movimentos onde a resposta dinâmica global da linha é mais acentuada, com períodos na faixa entre 6 e 20s e amplitudes da ordem de 3m. Os movimentos na estrutura flutuante induzidos por ondas são pouco influenciados pelas linhas de ancoragem e *risers* [88], assim, cada linha pode ser simulada assumindo um movimento imposto no topo.
- c) Movimentos da linha induzidos por vórtices gerados a partir da passagem do fluido pelo *riser*. As vibrações induzidas por vórtices (VIV) são movimentos de pequena amplitude (não maior que dois diâmetros da linha) e alta frequência (tipicamente maiores a 2Hz). Este efeito provoca uma mudança na resposta no plano do *riser* aumentando significativamente o coeficiente de arrasto de um valor nominal de 1.2 (para números de Reynolds até  $3 \times 10^5$ ) a valores iguais ou superiores a 3.0, e produz tensões cíclicas fora do plano do *riser* o que reduz significativamente sua vida útil à fadiga [56].

Duas abordagens são usualmente empregadas na análise dinâmica de sistemas estruturais de linhas utilizando-se a discretização espacial das equações de equilíbrio pelo método dos elementos finitos: a) análise por superposição modal (análise no domínio da frequência) e b) integração temporal direta. Na primeira, considera-se a hipótese em que a estrutura apresenta resposta quasi-estática não-linear; apesar de requerer um menor esforço computacional para a análise numérica, é adequada nas condições de pequenos deslocamentos (que

caracteriza o comportamento dinâmico) em torno da configuração de equilíbrio estático. Neste caso as equações diferenciais de equilíbrio são linearizadas com relação à rigidez, inércia e forças hidrodinâmicas e a solução obtida em espectro de frequência e amplitudes de movimentos. Em condições extremas, no entanto, ou mesmo naquelas operacionais em que ocorrem oscilações de grande amplitude faz-se necessário um estudo que considere as não-linearidades estruturais e de carregamento decorrentes dos grandes deslocamentos. Neste caso, a integração temporal direta das equações diferenciais de equilíbrio torna-se necessária possibilitando a representação desses efeitos não-lineares.

No departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio foram desenvolvidos, em duas dissertações de mestrado (Lustosa, E.M. [48] e Andrews, A.T. [9]), programas de elementos finitos para a análise estática e/ou dinâmica de linhas marítimas, sob grandes deslocamentos e rotações, incluídos os efeitos não lineares do contato com o fundo marinho mas sob condições de pequenas deformações, utilizando-se a formulação Lagrangeana co-rotacionada. No entanto, o modelo desenvolvido carece ainda de incorporar-se à análise estática/dinâmica disponível, a representação de linhas marítimas com relação constitutiva dos materiais referente à gradação funcional na espessura da seção tubular. Considerando-se as características favoráveis dos MGF, conforme é descrito mais adiante, espera-se através da simulação numérica, realizar estudos de viabilidade da aplicação destes materiais em linhas marítimas reais.

## **1.2. Objetivos**

- Investigar a viabilidade do emprego de materiais com gradação funcional no projeto de linhas marítimas, utilizando a simulação numérica.
- Estender o programa de elementos finitos ANFLEX para a análise tridimensional estática e dinâmica de linhas marítimas com MGF, em que a não-linearidade geométrica resulta de grandes deslocamentos e rotações, mas com pequenas deformações.