

# 1 Introdução

## 1.1.Histórico

A indústria de Petróleo apresenta uma história de crescimento rápido para atender à demanda do mercado mundial pelos vários subprodutos gerados à partir da extração de óleo e gás dos combustíveis fósseis.

No Brasil, a demanda não é diferente do restante do globo, e o país mantém sua busca incessante da auto-suficiência dentro deste mercado. A Petrobras, junto com outras empresas da indústria petrolífera vem desenvolvendo novas tecnologias visando obter a maior eficiência na extração dos reservatórios localizados no país.

A história da exploração de petróleo no país teve seu início no final da década de 30 quando o primeiro poço produtor em terra foi aberto na Bahia. Nesta época o petróleo era importado para atender o mercado interno. Este cenário permaneceu desta forma até meados da década de 70, quando o mundo sofreu a 1ª grande crise do petróleo. Neste momento o Brasil se viu forçado a modificar sua estratégia de abastecimento. Foi iniciado então um movimento de desenvolvimento interno que buscava novas formas de alimentar a produção nacional.

O Brasil nunca foi proprietário de grandes poços de petróleo em terra, porém em alto mar foi descoberto o seu potencial de abastecimento. Ainda na década de 70, as explorações offshore eram poucas devido às restrições tecnológicas da época. Com a crise do Petróleo, a Petrobras investiu em tecnologia e em subfornecedores com o objetivo de avançar os limites existentes. Desta forma a empresa se tornou uma das pioneiras mundiais neste mercado. Desde então os recordes de profundidade em exploração de petróleo vem sendo quebrados ano a ano. O foco de desenvolvimento ocorreu principalmente na Bacia de Campos como apresentado na Figura 1, onde hoje se concentra o maior número de poços explorados.

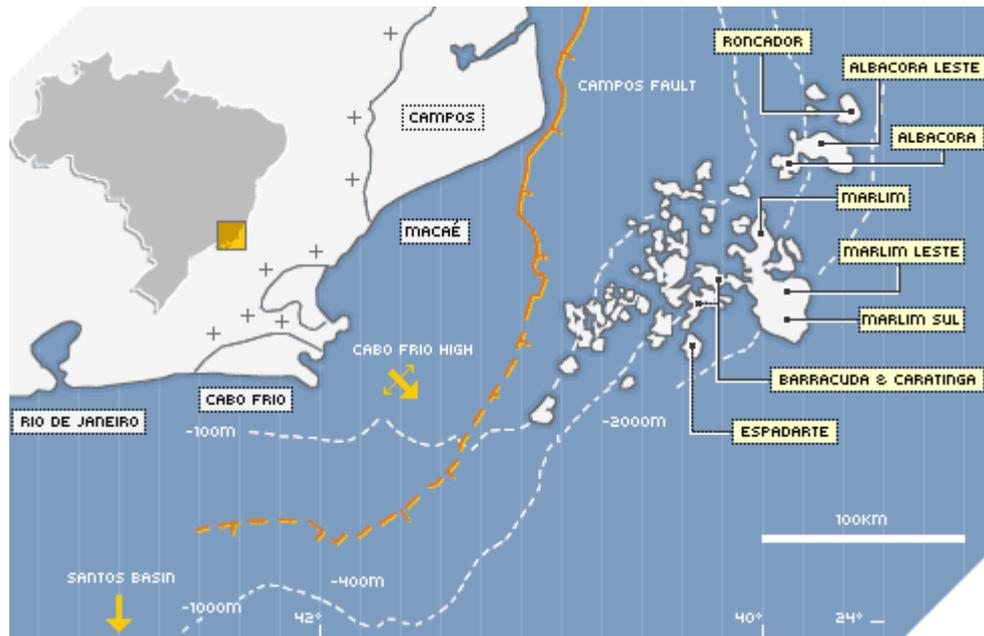


Figura 1 – Mapa da Bacia de Campos

O panorama brasileiro atual apresenta não somente a Petrobras como exploradora do litoral brasileiro, mas também mostra a presença de várias outras companhias como Shell, Hydro, Exxon, entre outras. Novos reservatórios são descobertos a cada dia com grande capacidade de produção. Além disso, atualmente há um movimento na construção de refinarias visando atender a produção nacional.

Outro mercado que tem sido explorado é o de exportação de gás, por motivos políticos, econômicos e ecológicos. Até o final da década passada todo gás produzido em embarcações de produção (FPSO, por exemplo) era queimado. A queima de gás é um dos grandes agentes na destruição da camada de ozônio, e conseqüentemente responsável pelo aumento do efeito estufa. Estes são fatores que contribuem para o aquecimento global e motivaram campanhas intensas sobre a preservação do meio ambiente. O gás ao invés de ser queimado offshore pode ser reaproveitado e transportado para terra por meio de dutos de exportação. Com a crise na Bolívia e a exigência administrativa do gasoduto Brasil-Bolívia por parte dos bolivianos, ficou clara a necessidade de fornecimento de gás através de outras fontes. Portanto, a demanda na conjuntura atual é a instalação de tubulações que permitam aumentar a produção e o fornecimento interno de gás.

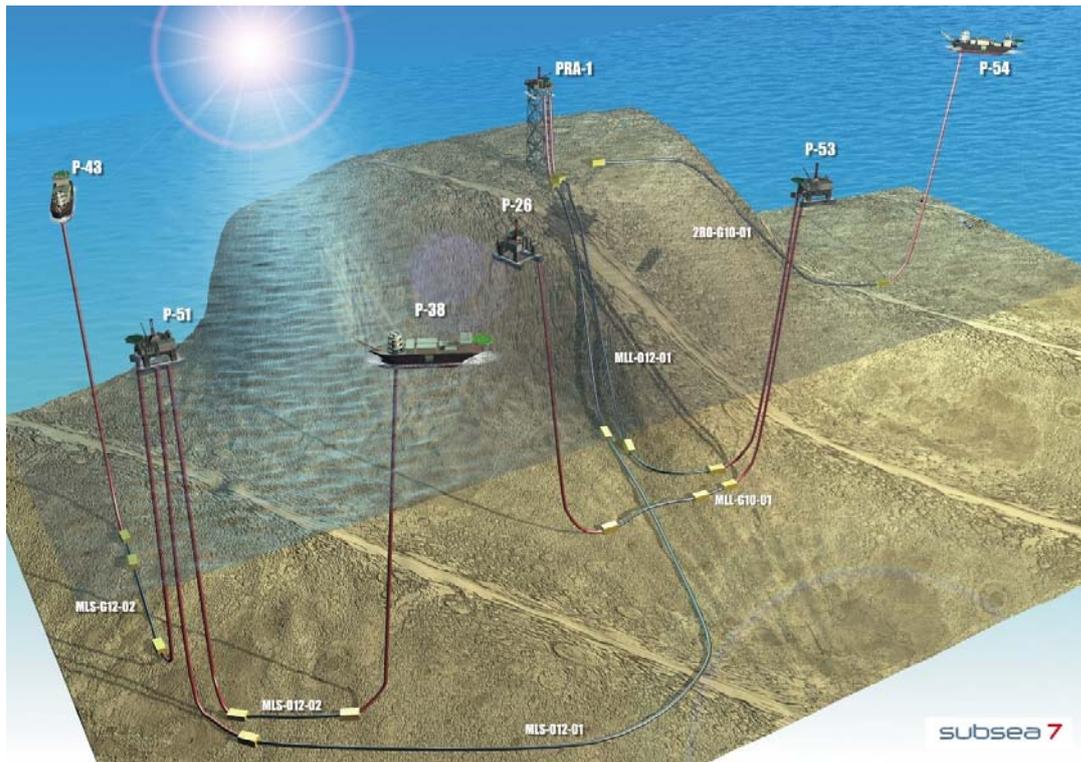


Figura 2 – Projeto PDEG-B [Subsea 7]

Empresas como a Subsea 7 são responsáveis pela etapa de instalação de tubulações de óleo e gás em alto mar. Isto pode ser realizado através de dutos rígidos ou flexíveis. O processo de instalação é complexo e depende diretamente do tipo de tubulação a ser utilizada. No processo, inúmeras variáveis precisam ser avaliadas, com o objetivo de manter a integridade estrutural durante e após a instalação. A observação cuidadosa de algumas destas variáveis possibilita o desenvolvimento e pesquisas, as quais esta dissertação de mestrado está vinculada. Este trabalho procura estabelecer alguns critérios que viabilizem projetos necessários para o desenvolvimento tecnológico da indústria petrolífera.

## 1.2.Motivação e objetivo

Nos últimos anos a utilização de dutos rígidos nas instalações marítimas em águas profundas vem aumentando rapidamente. Apesar da instalação deste tipo de duto possuir um custo mais alto, esta solução a cada ano ganha mais apoio das empresas exploradoras, uma vez que os dutos flexíveis com as tecnologias atuais estão chegando ao seu limite de capacidade de profundidade de instalação. A limitação das tubulações rígidas está atrelada principalmente ao limite das embarcações disponíveis no mercado.

Apesar da estrutura simples dos dutos rígidos, existem diversas questões complexas referentes à utilização das normas que necessitam de uma avaliação criteriosa dos problemas existentes durante a fase de projeto. Portanto é necessário o entendimento profundo do que as normas propõem como limites de projeto. Em conseqüência, deve haver o entendimento da base de dados que foi utilizada no desenvolvimento das normas. Desta forma é possível identificar quais as limitações de aplicabilidade das normas disponíveis no mercado. Para se obter um projeto otimizado devem ser entendidos os pontos de conservadorismos empregados pelas mesmas.

A motivação deste trabalho está na avaliação dos critérios disponíveis atualmente na área de projetos em “offshore”, em especial a DNV (2000), norma de maior emprego para projetos de dutos rígidos submarinos no Brasil. Um caminho para esta avaliação está na seleção de um problema entre os muitos existentes na área.

Uma questão que vem sendo bastante abordada há algum tempo é sobre os estudos das deformações longitudinais em dutos submetidos ao enrolamento em embarcações do tipo PLSV “reel lay”. Apesar dos cálculos analíticos já estarem bastante desenvolvidos nesta área, nos últimos anos surgiram diversas dúvidas sobre a instalação de elementos auxiliares nos dutos, tais como sapatas de anodo e juntas de transição, entre outros elementos. Estes elementos geram concentrações de deformações na estrutura do duto. As concentrações geradas podem resultar em efeitos catastróficos durante o carregamento de dutos na embarcação. Qualquer interrupção no processo de enrolamento culmina em prejuízos para a empresa proprietária da embarcação uma vez que o faturamento referente à operação desta é função do pagamento de diárias por parte do empregador do serviço. Em um projeto, cerca de 30% do custo do projeto está atrelado ao custo de embarcação. Uma falha no duto também é crítica, visto que nestas ocasiões uma parte considerável da seção do duto precisa ser removida. O custo dos dutos em um projeto está na faixa de 30% a 40%. Portanto estes são motivos suficientes para os proprietários de embarcações terem a necessidade de conhecerem e adquirirem todo conhecimento possível em projetos envolvendo tubulações rígidas.

O problema escolhido para ser avaliado neste trabalho foi o efeito de concentração de deformação durante o processo de enrolamento devido à instalação de sapatas de anodo sobre tubulações rígidas de aço através de uma abordagem numérica.

Assim, procurou-se entender todos os problemas dentro do processo de enrolamento e desenrolamento de dutos nas embarcações devidos aos SNCFs gerados pelas sapatas de anodo. Para isso propõe-se avaliar os critérios disponíveis, entender as suas limitações e, se possível, produzir um procedimento específico para a avaliação destes elementos concentradores de deformação.

Para esta avaliação foi escolhida uma família de dutos que atende a uma faixa da relação DE/t entre os valores de 7 a 20. Esta faixa atende aos dutos comumente utilizados no processo de enrolamento. A Tabela 1 apresenta os valores selecionados de diâmetros externos e espessura de parede em função da relação DE/t crescente. Todas as dimensões apresentadas são fornecidas pelo mercado.

DE [mm (pol)]	t [mm (pol)]	DE/t
168.3 (6.625)	19.05 (0.75)	8.83
273.1 (10.75)	25.4 (1.00)	10.75
323.9 (12.75)	25.4 (1.00)	12.75
273.1 (10.75)	17.5 (0.69)	15.60
323.9 (12.75)	17.5 (0.69)	18.51
323.9 (12.75)	15.9 (0.63)	20.37

Tabela 1 – Dutos utilizados nos estudos realizados

### 1.3.Revisão de literatura

No processo de enrolamento a falha de um duto é devida à flambagem localizada na parede do duto. Atualmente existe uma vasta disponibilidade na literatura de informações referentes ao assunto de flambagem localizada. O entendimento deste mecanismo de falha foi essencial para o entendimento das análises realizadas neste trabalho.

Kyriakides e Corona (2007) apresentam diversas publicações referentes a flambagem em geral. Diversas publicações são voltadas aos efeitos de flambagem em um duto devido à flexão pura, associada ou não a efeitos de pressão e carga axial. Seus estudos envolvem testes reais e modelos numéricos que, juntos, resultam em um ótimo conhecimento do problema.

Apesar de ser mais generalista, Bai (2005) apresenta boas explicações sobre os momentos limites necessários para a definição das deformações limites que podem vir a ser confrontadas com os valores apresentados pela DNV (2000). As explicações apresentadas por Bai (2005) foram baseadas em um relatório SUPERB (1996). Este relatório foi realizado em uma parceria da empresa Snamprogetti com a DNV e o assunto abordado é de análise limite de flambagem e colapso. Nele foram calibradas diversas curvas de testes. Os resultados apresentados na atual DNV-OS-F101 são baseados neste relatório.

O efeito de flambagem localizada somente pode ser estudado a partir do entendimento do comportamento elasto-plástico dos aços. Apesar de ser uma referência mais antiga, Johnson e Mellor (1975) fazem uma explicação minuciosa da curva tensão-deformação que auxiliam nas definições dos materiais utilizados neste trabalho.

Em relação às análises de enrolamento, são poucas as publicações que tratam especificamente sobre o assunto. Um bom exemplo foi apresentado por Martinez e Brown (2005). Eles apresentaram um modelo numérico de ciclo completo similar ao apresentado neste trabalho. Nesta publicação havia o interesse de apresentar os efeitos de anisotropia dos aços durante o ciclo de enrolamento e desenrolamento. Outras publicações foram revisadas como por exemplo a de Tivelli (2005) e a de Haunch (2000). No entanto nenhuma delas realiza um tratamento sobre efeitos de concentrações de deformação. Mesmo assim, estas publicações foram muito úteis para a construção dos modelos de elementos finitos utilizados neste trabalho.

## 1.4. Organização do trabalho

Este trabalho está subdividido em 8 capítulos e 8 Apêndices que apresentam todo o estudo realizado.

No capítulo 2 são apresentados diversos conceitos relacionados à engenharia mecânica, termos técnicos do mercado e apresentação do processo de enrolamento de tubulações em embarcações do tipo “reel lay”.

No capítulo 3 são apresentados os critérios de normas e publicações aplicáveis a dutos sob efeitos de flexão, característicos de processos de enrolamento.

No capítulo 4 são apresentados os cálculos analíticos com o objetivo de fornecer informações de entrada para os modelos de elementos finitos, e gerar parâmetros que permitam comparar com os resultados obtidos destas análises numéricas.

No capítulo 5 são apresentados todos os modelos de elementos finitos utilizados nas avaliações dos elementos concentradores de deformação. Nesta parte, os critérios apresentados no capítulo 3 serão validados. Modelos de enrolamento serão desenvolvidos a partir da utilização de uma metodologia básica até atingir uma configuração avançada. Ciclos completos de enrolamento e desenrolamento de dutos também serão vistos e ainda serão avaliados os efeitos combinados das sapatas de anodo com a presença de revestimentos. Em todas estas análises serão apresentados os modelos usados, os resultados obtidos e as discussões sobre os mesmos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões referentes aos exercícios realizados nas Seções 3, 4 e 5. Será também apresentada uma metodologia de trabalho a partir dos resultados obtidos para a solução de problemas envolvendo sapatas de anodo.

No capítulo 7 são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros baseados em algumas conclusões obtidas a partir deste trabalho.

No capítulo 8 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para o auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Após os capítulos, foram inseridos os Apêndices referentes às demonstrações e resultados utilizados no desenvolvimento das conclusões.