

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Eduardo Queiroz Rangel

**Investigação Sistemática das propriedades eletromecânica de
componentes de Fluoreto Polivinilideno (PVDF) aplicados em *risers*.**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa
Coorientador: Daniel Ramos Louzada

Rio de Janeiro
Dezembro 2016

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Eduardo Queiroz Rangel

**Systematic investigation of the electromechanical properties of
Polyvinylidene Fluoride (PVDF) components applied in risers.**

Undergraduate Final Project

Graduation Project presented to the Engineering Department
Mechanics of PUC-Rio

Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa
Coorientador: Daniel Ramos Louzada

Rio de Janeiro
Dezembro 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Doutor Carlos Roberto Hall Barbosa, pelo acolhimento e pelos ensinamentos.

Agradeço ao meu coorientador, Doutor Daniel Ramos Louzada, por ter me acompanhado em todos os processos na realização do projeto.

Agradeço a Doutoranda Khrissy A. R. Medeiros, pelo grande auxílio nos ensaios experimentais.

Agradeço especialmente a meus pais e irmãos que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço aos meus colegas de curso, pela amizade que construímos.

Agradeço a Deus por ter me dado força e persistência nos momentos difíceis.

RESUMO

Este projeto tem como finalidade o estudo dos efeitos piezoelétricos existente no polímero fluoreto de polivinilideno (PVDF), quando aplicado pelas indústrias petrolíferas como uma das camadas que compõem o *riser* flexível, responsável na ligação do poço de petróleo com a plataforma flutuante.

O efeito piezoelétrico é a capacidade de alguns materiais gerarem tensão elétrica quando submetidos a perturbações mecânicas. Também podem ser geradas tensões mecânicas quando é aplicado um campo elétrico no material.

No desenvolvimento do projeto, serão comparadas as frequências de excitação no *riser* provocadas pelo desprendimento de vórtice (VIV), fenômeno a qual ocorre por variações de pressão na superfície do corpo quando submetido a um escoamento, com as frequências de excitação, realizadas no laboratório, em uma amostra de PVDF. Com objetivo de verificar se o material PVDF produzirá tensão elétrica quando ressignado a tais condições impostas no momento da extração do petróleo.

Palavras chaves: fluoreto de polivinilideno , PVDF, piezoeletricidade, riser flexível.

ABSTRACT

This project aims to study the existing piezoelectric effects on polyvinylidene fluoride polymer (PVDF), when applied by petroleum industries as one of the layers that make up the flexible riser, is responsible for the connection of the oil well with a floating platform.

The piezoelectric effect is a capability of some materials to generate electrical energy when subjected to mechanical disturbances. It is also not possible to generate mechanical stresses when an electric field is applied to any material.

In the development of the project, comparisons of excitation frequencies are not provoked by the vitiation of vices (VIV), the working conditions are as follows: In a sample of PVDF. With the objective of verifying that the PVDF material will produce the electrical tension when solved to such conditions imposed at the moment of the extraction of the petroleum

Key-words: Polyvinylidene fluoride, PVDF, piezoelectricity, flexible riser.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivo.	2
1.2. Motivação.....	2
2. Sistema de produção de petróleo.	3
2.1. <i>Risers</i>	4
2.1.1. <i>Risers</i> rígidos.	5
2.1.2. <i>Risers</i> flexíveis.....	6
2.1.3. Configurações geométricas.	8
2.2. Análise de carregamentos nos <i>Risers</i>	12
2.2.2. Desprendimento de vórtices.	15
2.2.3. Frequência natural do <i>riser</i>	24
3. Fluoreto de polivinilideno (PVDF).	25
3.1. A piezoelectricidade no PVDF- β	26
4. Procedimento Experimental.	30
5. Resultados.	32
6. Conclusão.	43
7. Bibliografia	45

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 – Componentes de um sistema de extração Offshore.....	3
Figura 2 - Sistemas de produção offshore (Fonte: http://image.slidesharecdn.com/gb2011marceloschultzpetrobras-121023105726-phppapp01/95/gb2011-marcelo-schultzpetrobras-10-638.jpg?cb=1350989880).....	4
Figura 3 - <i>Riser</i> rígido. (Fonte: http://ebecms.s3.amazonaws.com/energiahoje/photo_static/300x176/2012/08/27/akerriser2.jpg).	5
Figura 4 - Configuração típica do <i>unbonded riser</i>	6
Figura 5 - Configuração TTR (Fonte: http://www.faend.com.br/arquivos/extracao_de_petroleo.pdf) ..	9
Figura 6 - Configuração SCR (Fonte: http://www.faend.com.br/arquivos/extracao_de_petroleo.pdf) .	10
Figura 7 - Configurações geométrica do <i>riser</i> flexível [4].....	10
Figura 8 - Força de empuxo atuando no corpo. (Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Impuls%C3%A3o)	13
Figura 9 - Regimes de escoamento (Fonte: https://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwi9IM3v86PQAhXFgJAKHVN5A2sQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fmagoo%2FABAAfIL0AJ-2.jpg&bvm=bv.138493631,d.Y2I&psig=AFQjCNHZZBGSp-dKIqC4ntztnc4GiHB-5A&ust=1479063636542305)	16
Figura 10 - Camada-limite sobre uma placa plana (Fonte: https://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwj_j9HV2KPQAhWHCpAKHZLrCL4QjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fmagoo%2FABAAf0YAA-2.jpg&psig=AFQjCNEmb1sieVaES64OGd_oFYwzPmNp0g&ust=1479055867636024)	18
Figura 11 – Separação do escoamento (Fonte: https://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwjVnrHmnqbQAhWFxpAKHQgGA3wQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fmagoo%2FABAAAgHTUAF-0.jpg&bvm=bv.138493631,d.Y2I&psig=AFQjCNGtwox00asT-hm8cB4qBXOPDJBKHg&ust=1479143950763063)	18
Figura 12 - Influência da viscosidade num perfil de velocidade na camada limite (fonte: http://fenomenosdairmacelma.blogspot.com.br/2011/09/separacao-da-camada-limite-e-entrada-em.html)	19
Figura 13 - Comportamento do escoamento para diferentes variação do número de Reynolds [12]	20
Figura 14 - Número de <i>Reynolds</i> em função do Número de <i>Strouhal</i> , em um cilindro	21
Figura 15 - <i>Strouhal</i> vs <i>Reynolds</i> alterando o regime do escoamento para cilindros lisos.....	22
Figura 16 - Amplitude do cilindro em relação a vibração da estrutura em razão com a frequência de <i>shedding</i> [12].....	23
Figura 17 - Vibração do <i>riser</i> . (Fonte: http://www.brunel.ac.uk/research/Institutes/Institute-of-Materials-and-Manufacturing/Structural-Integrity/Research-Area-About-us/Fluid-structure-interaction)	24
Figura 18 - Efeito piezoelétrico sobre tração e compressão. (Fonte: http://www.uq.edu.au/_School_Science_Lessons/32.1.1.2.GIF)	27
Figura 19 - Deslocamento elétrico em função da tensão [13]	27
Figura 20 - Deformação do material em função do campo Elétrico [13].....	28

Figura 21 – Configuração do teste de excitação do PVDF no shaker.	30
Figura 22 – Analisador dinâmico de sinal.	31
Figura 22 - Amplificador de Sinal	32
Figura 24 - Configuração catenária do Riser.	34
Figura 25 - Número de <i>Reynolds</i> em função da velocidade e do ângulo.	36
Figura 26 - Frequência de desprendimento de vórtice em função da velocidade e do ângulo	37
Figura 27 - Coeficiente de arrasto em função do número de <i>Reynolds</i>	38
Figura 28- Força de <i>Lift</i> em função da velocidade e do tempo.....	39
Figura 29 - Varredura do ruído branco.....	40
Figura 30 - Ensaio de Frequências de 50 Hz a 500 Hz	41
Figura 31 - Tensão em função da aceleração nas frequências de 100 Hz até 500 Hz.	41
Figura 32 - Tensão em função da frequência de excitação para diferentes acelerações.....	42
Figura 33 - Tensão em função da aceleração em frequências de 1.000 Hz até 6.000 Hz	43

ÍNDICE DE TABELAS.

Tabela 1 - Características geométricas do Riser.	33
Tabela 2 - Propriedades dos fluidos e dimensões verticais e horizontais da lamina d'água.	33
Tabela 3 - Frequência natural em função do número de modo.....	35
Tabela 4 - Velocidade do escoamento em função do ângulo.	35

1. Introdução.

O petróleo é uma das fontes energéticas naturais mais importantes atualmente. Sua matéria bruta permite o desenvolvimento de diversos derivados como combustíveis e matéria prima para vários setores industriais (construção, farmacêutico, bélica e outras). Consequentemente, o consumo do petróleo cresce ano após ano exigindo maior intensificação na extração pelas indústrias de óleo e gás. Nesse cenário, o desenvolvimento de novas tecnologias de extração buscam otimizar o processo como um todo, tornando-o mais seguras e rentável mesmo em ambientes cada vez mais hostis.

No Brasil a descoberta da Petrobras do campo de Carmópolis (no estado de Sergipe), no ano de 1963, impulsionou as atividades exploratórias em todo o país. Já no ano de 1968, iniciou-se a primeira produção de petróleo em reservatórios marítimos de águas rasas (45,7 metros de profundidade) do litoral brasileiro, localizado no campo de Guaricema na Bacia de Sergipe. Em 1974, foi localizado o primeiro campo com volume comercial na Bacia de Campos (Campo de Garoupa), com 124 metros de profundidade. Porém, a produção de petróleo apenas iniciou-se em 1977 devido as limitações das atividades de produção *offshore* no Brasil. Nos anos seguintes foram descobertos novos campos petrolíferos em ambientes mais hostis, forçando o desenvolvimento de novas tecnologias de extração de petróleo. Em 2006, o Brasil atingiu a autossuficiência em petróleo, passando a produzir um volume superior à demanda nacional. Hoje o Brasil opera em 9 bacias: bacias de Campo; de Santos; do Espírito Santo; do Solimões; Potiguar; Sergipe-Alagoas; do Recôncavo; de Camamu-Almada; do Tucano; do Jequitinhonha. No ano de 2007, é anunciada a descoberta de um novo campo de exploração petrolífera na chamada camada pré-sal. Essas reservas de petróleo são encontradas a sete mil metros de profundidade e apresentam imensos poços de petróleo em excelente estado de conservação, possibilitando dobrar a produção de óleo e gás no Brasil.

1.1. Objetivo.

O objetivo deste projeto é promover e analisar testes de vibração mecânica em componentes de PVDF utilizados em revestimentos de *Risers*, variando a excitação tanto na frequência quanto na aceleração, de forma a caracterizar a geração de tensões elétricas, indicando procedimentos operacionais que minimizem riscos na extração de petróleo.

1.2. Motivação.

O processo de extração de petróleo movimenta um grande setor industrial, gerando alto investimentos em pesquisa e infraestrutura. A medida que poços petrolíferos se esgotam, a procura por outros que os substituam é acentuada. Regiões como em grande profundidade ou sobre camadas de sal, que antes não eram foco de exploração começam a figurar no cenário. Dessa forma, componentes como os *Risers*, são submetidos a condições mais extremas, e esses efeitos devem ser analisados para que se evitem complicações ao processo de extração. Sob esse cenário, pretende-se estudar o comportamento de amostras de revestimento em PVDF (utilizados como isolante em *Raises*), observando principalmente a geração de tensões elétricas quando o mesmo se encontra submetido a regimes de excitação periódica. Pretende-se entender esse processo para avaliar os riscos de ignição do fluido extraído.

O presente trabalho aborda estudos relativos ao comportamento eletromecânico de uma amostra de PVDF, o qual é utilizado como revestimento em *Risers*.

2. Sistema de produção de petróleo.

A produção de petróleo em regiões oceânicas necessita de um conjunto de estruturas conhecido como sistema de produção *offshore*. Esse sistema é composto basicamente por três componentes principais: a unidade flutuante ou plataforma, os risers e o sistema de ancoragem (figura 1).



Figura 1 – Componentes de um sistema de extração Offshore.

O primeiro componente do sistema de produção para a extração de petróleo é constituída da unidade flutuante. Esta é instalada no local sobre o poço, para que a produção possa ser escoada e processada. O segundo componente, e responsável por transportar o óleo desde o poço até a unidade flutuante é um duto ascendente, denominado *riser*. Devido às condições ambientais extremas presentes em um campo de produção tais como correntes marítimas, ventos e ondas, a unidade flutuante precisa de um sistema de ancoragem (terceiro componente) para reduzir possíveis deslocamentos em torno da sua posição original. Mesmo com o sistema de ancoragem é possível que a unidade flutuante sofra pequenos deslocamentos e esses sejam transmitidos ao riser gerando uma onda compressiva que se propaga desde o topo até o ponto de contato do riser com o solo, provocando o fenômeno conhecido como flambagem, capaz de provocar o colapso estrutural do sistema [3].

Na figura 2, pode ser observado ilustrações que exemplificam diferentes sistemas de produção *offshore*, sendo possível observar cada um dos seus componentes.



Figura 2 - Sistemas de produção offshore (Fonte: <http://image.slidesharecdn.com/gb2011marceloschultzpetrobras-121023105726-phpapp01/95/gb2011-marcelo-schultzpetrobras-10-638.jpg?cb=1350989880>)

Neste projeto, estaremos interessados somente em analisar o comportamento do riser quando submetidos a perturbações impostas no momento de extração.

2.1. Risers.

Os *risers* são estruturas suspensas, tubulares esbeltas, que conectam a cabeça do poço de petróleo no leito marinho até a unidade de exploração e produção. É identificado por suas regiões características: a região suspensa, a região próxima da zona onde o tubo toca o fundo do mar ou *touch-down zone* (TDZ), e aparte na qual o tubo fica deitado sobre o leito do oceano, denominado *flowline* [4]. Os *risers* podem ser classificados dependendo da sua operação.

- *Riser* de Perfuração
- *Riser* de Produção
- *Riser* de Injeção
- *Riser* de Exportação

Risers de perfuração tem como principal função a passagem dos equipamentos de perfuração e completação pelo seu interior, assim como a retirada dos detritos do poço e do fluido de perfuração. Os *risers* de produção, são utilizados no transporte de óleo e gás produzidos do poço para as unidades flutuantes. Já os *risers* de injeção, possuem, como sugere seu nome, a função de injetar água no reservatório evitando a diminuição da pressão, impedindo assim, o desprendimento de gases dissolvidos no óleo. O último, o *riser* de exportação, é utilizado na transmissão do fluido processado da plataforma até a terra ou outra unidade [2-4].

Os *risers* também podem ser classificados pela forma estrutural, e para estes existem basicamente dois tipos de *risers*, flexíveis e rígidos.

2.1.1. *Risers* rígidos.

São constituídos por materiais rígidos, normalmente aço, mas podem ser de titânio ou compósitos, e possuem grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e flexão. Tem sido largamente empregados na exploração em águas profundas por possibilitar a utilização de grandes diâmetros.

Na figura 3, é possível observar uma foto de uma seção de um *riser* rígido.



Figura 3 - *Riser* rígido. (Fonte:

http://ebecms.s3.amazonaws.com/energiahoje/photo_static/300x176/2012/08/27/akerriser2.jpg)

Pode operar com maior variação de pressões internas. É de fabricação mais simples que os flexíveis, mas oferecem maior dificuldade de manuseio, armazenagem, transporte e instalação [3].

2.1.2. Risers flexíveis.

Os risers flexíveis são compostos por diversas camadas metálicas e poliméricas, cujo conjunto das camadas proporcionam resistência mecânica e tornam a tubulação estanque, sem comprometer a sua flexibilidade. O *riser* flexível pode ser classificado de acordo com a sua função e camada interna e quanto a sua construção. Pela sua função e camada interna o mesmo pode ser:

- Rough Bore: Duto com parede interna rugosa, envolvendo o transporte de fluidos que possuem gás (Produção e exportação de óleo, injeção, produção e exportação de gás). Possui obrigatoriamente carcaça [4].
- Smooth Bore: Duto com parede interna lisa, envolvendo transporte de fluidos sem gás (injeção de água). Não há necessidade da carcaça [4].
- Há também outra classificação de acordo com sua construção:
- Unbonded pipe: As camadas metálicas e poliméricas não são unidas entre si, garantindo um movimento relativo entre elas (figura 4) [4].
- *Bonded pipe*: As camadas são coladas por um processo de vulcanização com um elastômero [4].

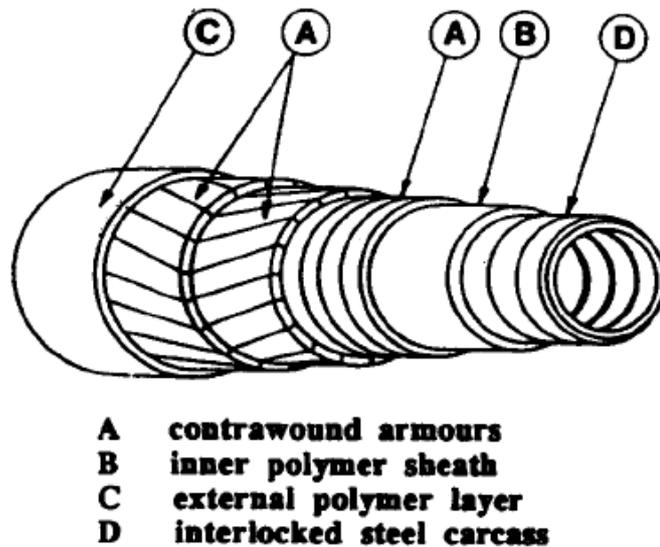


Figura 4 - Configuração típica do *unbonded riser*

A. Contrawound armours.

Localizada na região intermediária do *riser*, constituída por duas armaduras, de pressão e tração, e uma camada de pressão.

A camada de pressão é formada por material termoplástico, da qual possui atribuição principal de assegurar a estanqueidade do *riser* e transmitir os esforços provenientes do aumento de pressão interna para as armaduras subsequentes. É importante ter o conhecimento de todos os fatores, como pressão e temperatura, que irão influenciar diretamente na vida útil da camada de pressão, além da compatibilidade química do fluido interno com o material da camada [4].

Armadura de Pressão é constituída por metal, possui um perfil espiral em hélice. Deve resistir aos esforços radiais causados principalmente pela pressão interna do fluido e da armadura de tração, pelos tensionadores e pelos equipamentos auxiliares. Ela também ajuda a carcaça a resistir ao aumento da pressão externa oriunda por dano à camada mais externa do *riser*. À certos momentos a qual é transportado gases do fluido pela camada polimérica interna, podendo ocasionar um ambiente corrosivo, danificando todas as outras camadas, até mesmo as camadas metálicas. Mediante a este fato, é importante saber a previsão de difusão do gás do fluido interno [4,7].

A armadura de tração é constituída por “fios chatos de aço fabricados em pares e aplicados de forma helicoidal, de modo que sua resistência e funcionalidade iram variar de acordo com o ângulo de aplicação dessas hélices” [4]. Sua função é resistir à tração e compressão, cargas axiais provocadas pelo peso ao longo do *riser*, dos movimentos da plataforma flutuante e das correntes marinhas. Além de resistir as cargas compressivas no tubo, deve suportar as cargas radiais da pressão interna e aos esforços de torção [4,7].

B. Camada polimérica interna.

Constituída por um polímero capaz de suportar a pressões internas que o fluido exerce ao escoar dentro do tubo. Além disso, tem como objetivo de vedação, garantindo a integridade do escoamento do fluido no interior. Esta camada é mais simples que as metálicas, e é inserida no tubo por meio de extrusão direta, cobrindo e permitindo maior aderência a carcaça intertravante [7].

C. Camada polimérica externa.

Produzida de forma semelhante à camada polimérica interna, também é chamada de “capa plástica”, possui como funções de proteger a integridade dos componentes do interior do *riser* do ambiente externo e enclausurar as armaduras de forma a evitar a instabilidade estática e a ocorrência de *Bird Caging*. Por estar em contato direto com o ambiente externo, este deve ser capaz de resistir todas as condições externas impostas [7].

D. Carcaça Intertravada.

Constituído de uma espira em hélice, possui como função principal de proteger o tubo da pressão externa à qual está submetido o *riser*, prevenindo o colapso do mesmo. Deve suportar o desgaste causado pelo deslocamento de sondas de inspeção e ferramentas em seu interior. Por sua localização permitir o contato direto com o fluido, é de extrema importância o conhecimento prévio deste, pois esta camada não pode reagir com o seu conteúdo, uma vez que a liberação de produtos de reação química acabará contaminando o que estiver circulando em seu interior, seja petróleo ou água [4,7].

2.1.3. Configurações geométricas.

Dependendo das particularidades de um projeto estudado, a configuração geométrica do *riser*, flexível ou rígido, seguirão tais exigências como o tipo de unidade flutuante e as condições de operação. As principais configurações geométricas serão apresentadas.

Configurações para *Risers* rígidos:

- ***Top Tensioned Riser (TTR):***

A configuração do tipo TTR, o *riser* rígido é ordenado verticalmente da plataforma, tracionado por flutuadores ou tracionadores hidráulicos, até a cabeça do poço submarino, figura 5. Pela utilização destes dispositivos no topo da estrutura a movimentação vertical da plataforma é amenizada, diminuindo o risco de flambagem [4].

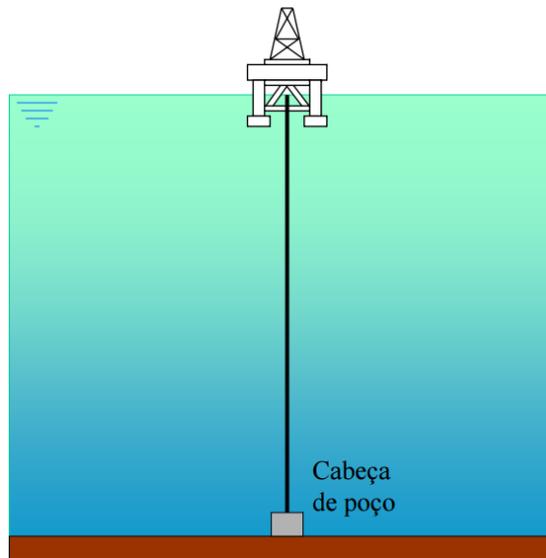


Figura 5 - Configuração TTR (Fonte: http://www.faend.com.br/arquivos/extracao_de_petroleo.pdf)

- ***Steel Catenary Riser (SCR):***

Riser suspenso em extensão livre, da extremidade superior ligado à plataforma até a extremidade inferior ligada no leito marinho, adquirindo a forma catenária, figura 6. A configuração SCR é mais simples de instalar, no entanto, nesta configuração o *riser* sofre elevadas cargas devido ao movimento da embarcação. Com maiores movimentos da embarcação, a configuração catenária tende a sofrer flambagem por compressão dinâmica no ponto de contato com o solo (*touch-down point* - TDP). Em grandes profundidades o *riser* deve apresentar maior comprimento, logo a tensão no topo será maior devido a resistência de seu peso.

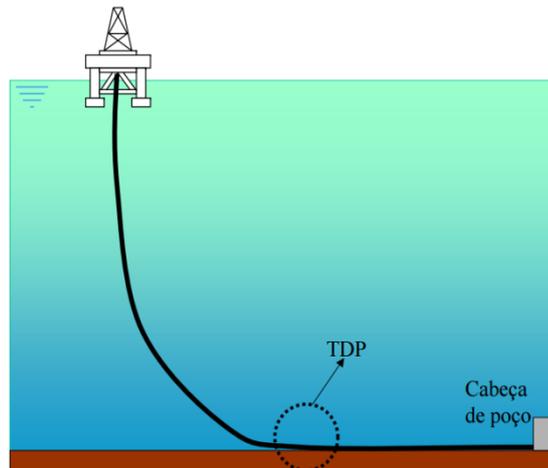


Figura 6 - Configuração SCR (Fonte: http://www.faend.com.br/arquivos/extracao_de_petroleo.pdf)

Configurações para *Risers* flexíveis:

Existem diferentes configurações possíveis para os *risers* que podem ser implementadas. Na figura 7 pode ser observado algumas delas com suas respectivas denominações.

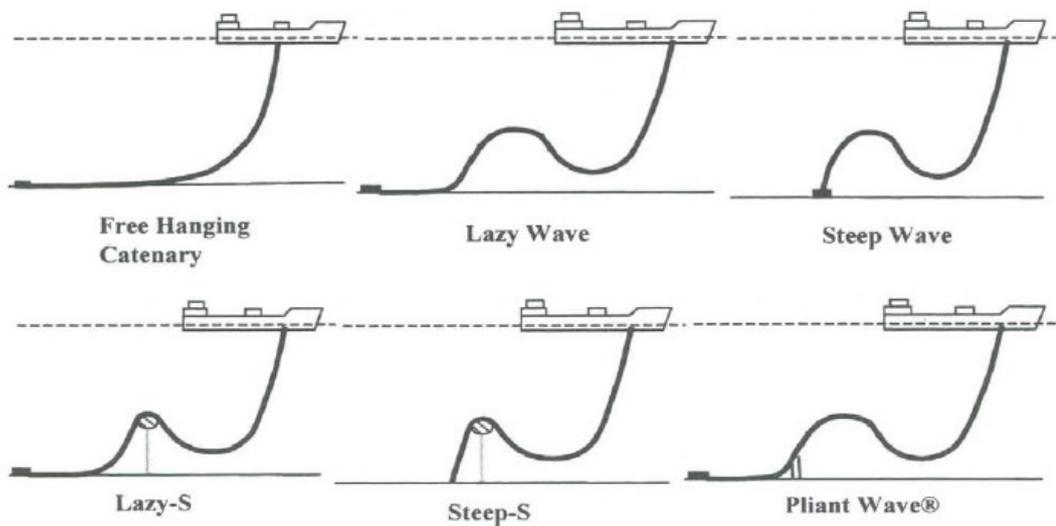


Figura 7 - Configurações geométrica do *riser* flexível [4]

- ***Free Hanging Catenary:***

Configuração mais simples e mais comum para risers flexíveis. A mais fácil e barata de instalar por exigir menor infraestrutura submarina. Por possuir a mesma configuração da

SCR, comporta-se de maneira igual. Sendo um *riser* flexível, apresenta menor rigidez a flexão comparado com o *riser* rígido utilizado na SCR.

- ***Lazy Wave:***

Empregado como uma solução viável para aplicações em águas profundas, em ambientes severos. Esse tipo de configuração *wave* possibilita a redução do peso suspenso do *riser* através de instalações de módulos flutuantes, tomando uma forma ondulada, criando uma força de empuxo para cima e diminuindo a movimentação do TDP, aumentando a vida útil do *riser* evitando compressão dinâmica. *Lazy waves* são propensos a alteração de configuração se ocorrer mudanças de densidade do fluido no interior do tubo durante o tempo de vida do *riser* [9].

- ***Lazy S***

Nesta configuração, é introduzida uma boia na região intermediária do *riser*, conseqüentemente reduzindo a tração estática no ponto de conexão da plataforma por resistir uma parcela do peso livre do *riser*, e também impedir a transmissão direta de esforços dinâmicos no TDP. Uma boia maior é suscetível ao aumento no carregamento hidrodinâmico, sendo assim um fator importante na concepção do projeto deste tipo de configuração [9]. *Risers* ordenado desta maneira são menos adaptáveis aos movimentos da plataforma proporcionando em maiores esforços [8].

- ***Steep S:***

Como na *Lazy S*, a configuração *Steep S* utiliza uma boia como sistema de flutuabilidade. Apresenta maior vulnerabilidade á instabilidade torsional comparado a configuração *Lazy S*. Esta configuração é recomendada para situações em que o fluido interno apresenta grandes variações de densidade e quando as dimensões do segmento apoiado sejam muito pequenas que exista um espaço muito pequeno para o segmento apoiado [8,9].

- ***Steep Wave:***

A configuração *Steep Wave* possui o trecho de flutuação prolongado até próximo a extremidade inferior da linha de ancoragem, onde esta é sempre tracionada em uma base fixo 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 à grande variação de

densidade no fluido interno, como na configuração *Steep S*, e quando existe espaço pequeno para o segmento apoiado [8,9].

- ***Pliant Wave:***

Parecido com a configuração *steep wave*, todavia o extremo do *riser* é fixado ao solo através de um tendão com o objetivo de diminuir seus movimentos laterais causados pela corrente e, assim, evitar que esforços sejam transferidos à extremidade do *riser* e restringir o movimento no TDP, ocasionando o aumento da vida útil do *riser* por fadiga [5]. A *Pliant Wave* é usualmente utilizada quando à existência de perigo de choque entre risers ou quando o espaço disponível no campo é pequeno [9]. Devido a instalação da configuração ser complexa, seria apenas necessária se as configurações simples catenária, *lazy wave* ou *steep wave* não fossem viáveis.

2.2. Análise de carregamentos nos *Risers*.

Quando em operação em águas ultra profundas, os risers estão submetidos a elevados carregamentos estáticos e dinâmicos, oriundos do seu peso próprio, da ação de correntezas e ondas, dos movimentos induzidos da plataforma de produção e carregamentos devido ao escoamento interno dos fluidos produzidos.

Os carregamentos agindo sobre a estrutura podem ser classificados como estático ou dinâmico. Os carregamentos estáticos são o peso morto do sistema, flutuabilidade, correnteza e offset da unidade flutuante devido à ação de correnteza, ondas e vento agindo sobre ela mesma. Apenas os efeitos das ondas serão considerados carregamentos dinâmicos, movimentos de primeira ordem da unidade flutuante, e o escoamento interno será considerado carregamentos dinâmicos.

2.2.1. Carregamentos estáticos.

Para a análise estática do *riser*, deve-se reconhecer os carregamentos agindo na estrutura como peso morto, peso do fluido no interior do *riser*, força de empuxo e tração na estrutura.

Carregamento Hidrostático.

De acordo com o princípio de Arquimedes, todo corpo imerso a um fluido em equilíbrio, sofre a ação de uma força contrária e equivalente ao peso do volume do fluido deslocado, esta força é chamada de empuxo. A figura 8 ilustra a reação da força de empuxo sobre o objeto.

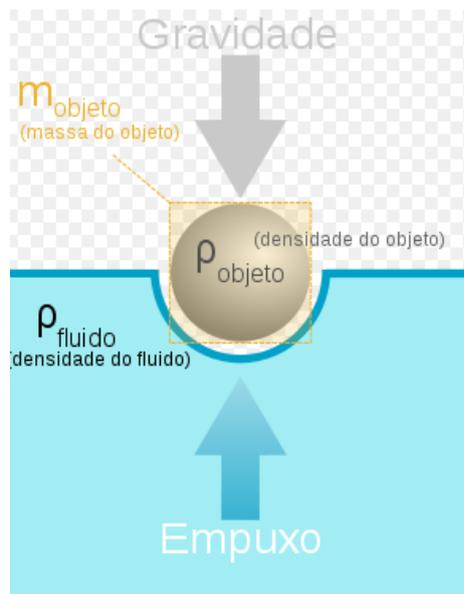


Figura 8 - Força de empuxo atuando no corpo. (Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Impuls%C3%A3o>)

A força de empuxo pode ser representada pela seguinte forma.

$$E = \rho * V * g = \gamma * V \quad (1)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, V o volume do fluido deslocado, g a aceleração da gravidade, E a força de empuxo e $\gamma = g * \rho$ é o peso específico.

Equação de um cabo flexível

Como o comprimento do *riser* é muito longo em águas profundas, sua rigidez a flexão pode ser considerada desprezível, e logo, tratada como um cabo. Porém, vale lembrar que a rigidez a flexão na região do TDP não pode ser considerada desprezível, para isso pode ser analisada como uma viga. O desenvolvimento da equação diferencial de equilíbrio para um cabo flexível catenária tem como início [17]:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\mu}{T_0} \frac{ds}{dx} \quad (2)$$

Primeiramente podemos substituir a identidade $ds^2 = dx^2 + dy^2$, obtemos.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\mu}{T_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Esta equação é a equação diferencial da curva catenária formada pelo cabo. Agora, substituindo $p = \frac{dy}{dx}$ para facilitar a resolução.

$$\frac{dp}{\sqrt{1+p^2}} = \frac{\mu}{T_0} dx$$

Integrando a equação.

$$\ln(p + \sqrt{1+p^2}) = \frac{\mu}{T_0} dx + C1$$

Quando $x=0$, $\frac{dy}{dx} = p = 0$, logo a constante $C1$ será zero. Substituindo $p = \frac{dy}{dx}$, mudamos para a forma exponencial e eliminando a raiz da equação.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{e^{\frac{\mu x}{T_0}} - e^{-\frac{\mu x}{T_0}}}{2} = \sinh \frac{\mu x}{T_0}$$

Integrando a equação.

$$y(x) = \frac{T_0}{\mu} \cosh \frac{\mu x}{T_0} + C2$$

Considerando a condição de contorno e substituindo na equação acima:

$$y(x=0) = 0 \rightarrow C2 = \frac{-T_0}{\mu}$$

Logo temos a equação da curva catenária:

$$y(x) = \frac{T_0}{\mu} \left(\cosh \frac{\mu x}{T_0} - 1 \right) \quad (3)$$

Através do diagrama de corpo livre do cabo sabemos que $\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \frac{\mu s}{T_0}$. Com isso da equação anterior para a inclinação,

$$s = \frac{T_0}{\mu} \sinh \frac{\mu x}{T_0} \quad (4)$$

Para obter a força de tração no cabo é preciso fazer o triângulo de equilíbrio das forças. Assim temos:

$$T^2 = (\mu s)^2 + T_o^2 \quad (5)$$

Combinando com a equação 4,

$$T^2 = T_o^2 \left(1 + \sinh^2 \frac{\mu x}{T_o}\right) = T_o^2 \cosh^2 \frac{\mu x}{T_o}$$

Ou podemos obterá força de tração em termos de y combinando a equação 3 com a 5,

$$T = T_o + \mu y \quad (6)$$

A qual μ é dada como peso do cabo por unidade de comprimento por unidade e T_o é a força horizontal de tração no cabo.

Força peso da estrutura.

Os cálculos das forças peso da estrutura e do fluido se dão por:

$$P_{riser} = A_{riser} * \gamma_{riser} * L \quad (7)$$

$$P_{int} = A_{int} * \gamma_{int} * L \quad (8)$$

Sabendo que P_{riser} é o peso do riser suspenso, A_{riser} é a área transversal do duto, γ_{riser} peso específico do material, L o comprimento do riser, P_{int} o peso do fluido no interior do riser, A_{int} área transversal preenchida pelo fluido e γ_{int} é o peso específico do fluido

2.2.2. Desprendimento de vórtices.

Número de Reynolds vs Regimes de escoamento.

O físico britânico *Osborne Reynolds* em 1883, para demonstrar a diferença qualitativa entre escoamento laminar e turbulento realizou um experimento onde a água, armazenada em um reservatório, escoava através de um tubo transparente. Logo em seguida, um fino filamento de corante é introduzido na entrada do tubo. Foi observado que em vazões baixas, ou seja, número de *Reynolds* baixo, o filamento do corante inserido permanece em linha reta, com pequena dispersão de corante. Isso se deve pelos efeitos de forças viscosas, ou seja, forças causadas pela tensão de cisalhamento, presentes nas camadas do fluido [12]. Não há mistura macroscópica de camadas adjacentes de fluidos. Este comportamento

do escoamento do fluido é chamada de regime laminar. Já em vazões altas, número de *Reynolds* alto, o filamento do corante torna-se instável e apresenta movimentos aleatórios devido a forças de origem inercial, este estado do fluido é chamado de regime turbulento. Quando ocorre a transformação do regime laminar para o turbulento, é chamado de regime transitório. A figura 9 mostra a transição dos regimes de escoamento do fluido.

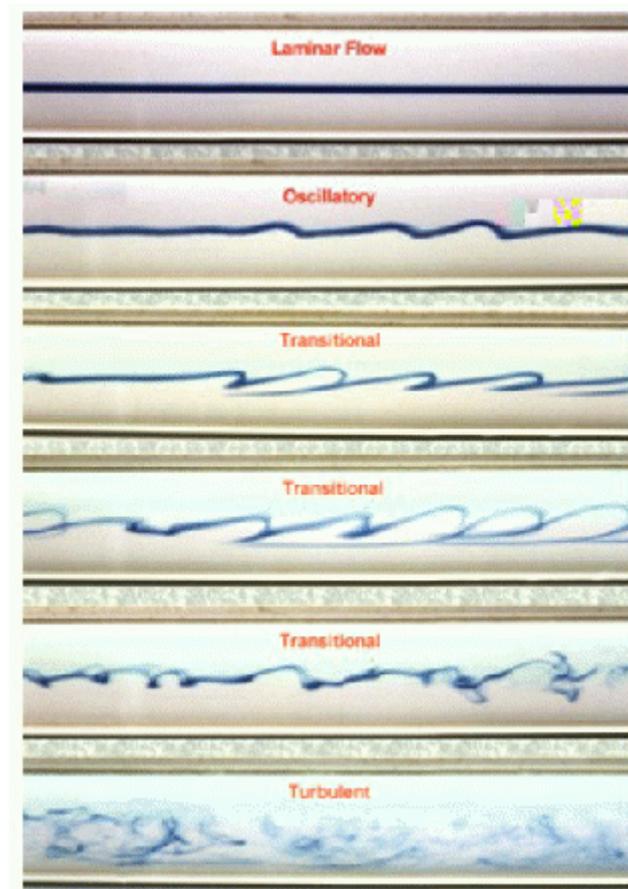


Figura 9 - Regimes de escoamento (Fonte:

<https://www.google.com.br/url?sa=i&rc=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwi9IM3v86PQAhXFgJAKHVN5A2sQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fmagoo%2FABAAAFIL0AJ-2.jpg&bvm=bv.138493631,d.Y2I&psig=AFQjCNHZZBGSdKIqC4ntznc4GiHB-5A&ust=1479063636542305>)

Com base no seu experimento, *Reynolds* nomeou número absoluto adimensional a qual governa o comportamento do escoamento do fluido, é chamado de número de *Reynolds*:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{u} \quad (9)$$

Este número também relaciona forças hidráulicas como:

$$Re = \frac{\text{Força de Inércia}}{\text{Força de Viscosidade}} \quad (10)$$

Onde a força de inércia é a força necessária para movimentar uma determinada massa de fluido. Força de viscosidade é a força de resistência a movimentação dessa massa de fluido [11].

Se o número de *Reynolds* for “grande”, os efeitos viscosos serão desprezíveis pelo menos na maior parte do escoamento; se o número de *Reynolds* for pequeno, os efeitos viscosos serão dominantes. Finalmente se o número de *Reynolds* não for grande nem pequeno, nenhuma conclusão geral poderá ser tirada.

Conceito de Camada-limite.

Em 1904, o conhecimento de camada limite foi introduzido pelo físico alemão *Ludwing Prandtl*. *Prandtl* disse que, embora de forma geral o atrito seja desprezível para escoamentos com valores altos do número de *Reynolds*, existirá sempre uma camada-limite delgada na qual o atrito é significativo, e, através dela, a velocidade aumenta rapidamente de zero (na superfície) até o valor previsto pela teoria do escoamento invíscido (sobre a borda externa da camada-limite).

O conceito de camada-limite pode ser apresentado considerando o escoamento de um fluido sobre uma placa plana imóvel (figura 8). A partir do momento a qual o fluido entra em contato com a superfície da placa, tensões de cisalhamento atuam a fim de reduzir a velocidade das partículas do fluido. Essas partículas tem sua velocidade reduzida significativamente em relação à velocidade do fluido total. Na maioria dos casos é válido supor que a velocidade da partícula na parede é nula. As partículas do fluido na superfície acabam provocando sucessivos retardamentos da velocidade para as próximas camadas, até que, a uma distância delta (denominada de espessura da camada-limite), o efeito se torne desprezível. Com o incremento da distância da superfície em relação a y, a velocidade do fluido em x, aumenta até atingir o valor de corrente livre. Conforme a velocidade do fluido varia com y, o gradiente de velocidade toma um perfil característico chamado perfil de velocidade na camada-limite, figura 10 [10].

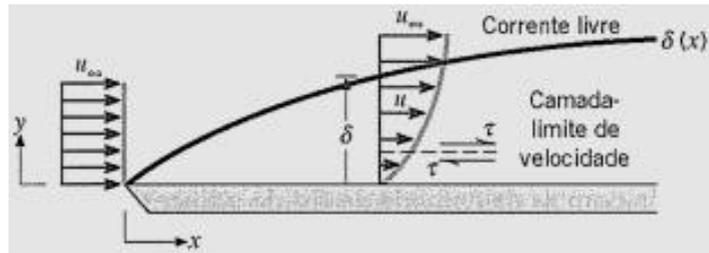


Figura 10 - Camada-limite sobre uma placa plana (Fonte:

https://www.google.com.br/url?sa=i&rc=t=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwj_j9HV2KPQAhWHCPAKHZLrCL4QjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fmagoo%2FABAAafp0YAA-2.jpg&psig=AFQjCNEmb1sieVaES64OGd_oFYwzPmNp0g&ust=1479055867636024

Separação de escoamento.

Na presença de escoamento ao redor de um corpo sólido, ocorre separação do escoamento conforme ilustrado na Figura 9. Se considerar um escoamento invíscido (não viscoso), como demonstrado na figura 10, os efeitos da viscosidade são aproximadamente nulas, a partícula se choca no ponto A, ponto de estagnação (ponto onde a velocidade do escoamento é nula), deslocando-se ao ponto B com perda de pressão ao passo que a velocidade aumenta. Atingindo o ponto B, o fluido apresenta velocidade máxima, energia cinética suficiente para vencer o gradiente de pressão adverso, e é encaminhado ao ponto C, oposto ao A, também ponto de estagnação, com ganho de pressão, tornando o escoamento em forma simétrica ao redor do cilindro [12], como mostrado na figura 11.

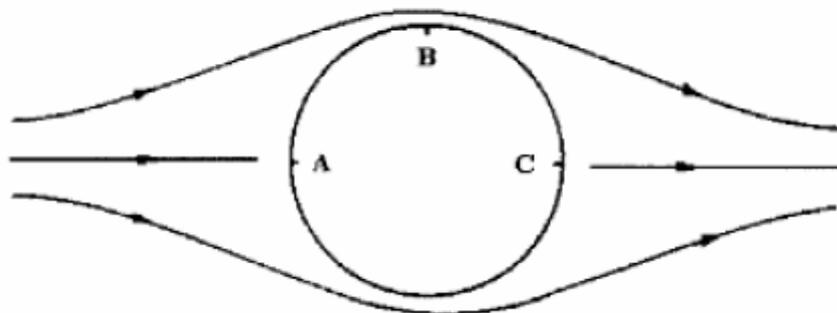


Figura 11 – Separação do escoamento (Fonte:

<https://www.google.com.br/url?sa=i&rc=t=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwjVnrHmnqbQAhWFxpAKHQgGA3wQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Fmagoo%2FABAAghTUAF-0.jpg&bvm=bv.138493631,d.Y2I&psig=AFQjCNGTwx00asT-hm8cB4qBXOPDJBKHg&ust=1479143950763063>

Num fluido viscoso, ocorre o efeito da viscosidade como perdas de energia cinética da camada limite ocasionadas pelos efeitos de fricção, resultando uma redução na velocidade, por não conseguir superar o gradiente adverso devido a energia mais baixa, até que ocorra um movimento oposto ao da direção do escoamento, em um determinado ponto dentro da camada limite, causando assim a separação do escoamento. No ponto onde ocorre a separação do escoamento, a tensão cisalhante e as velocidades normais e tangenciais são nulas [12]. Este evento é demonstrado na figura 12, onde começa no ponto de separação e acompanha a esteira na região delimitada pela linha de separação, nesta região a teoria da camada limite não pode ser empregada.



Figura 12 - Influência da viscosidade num perfil de velocidade na camada limite (fonte: <http://fenomenosdairmacelma.blogspot.com.br/2011/09/separacao-da-camada-limite-e-entrada-em.html>)

No estudo de um escoamento em torno de um obstáculo, a variação do número de *Reynolds* se dá através da variação da velocidade do escoamento [12]. Com o número de *Reynolds* variando com a velocidade, ditando assim o regime de escoamento que o fluido irá apresentar. Logo, a camada limite será influenciada pelo número de *Reynolds*, onde o desprendimento de vórtices, causado pelo efeito da separação do escoamento, ocorrerá na camada limite.

A figura 13 ilustra a faixa do número de *Reynolds* para cada regime de escoamento em torno de um cilindro.

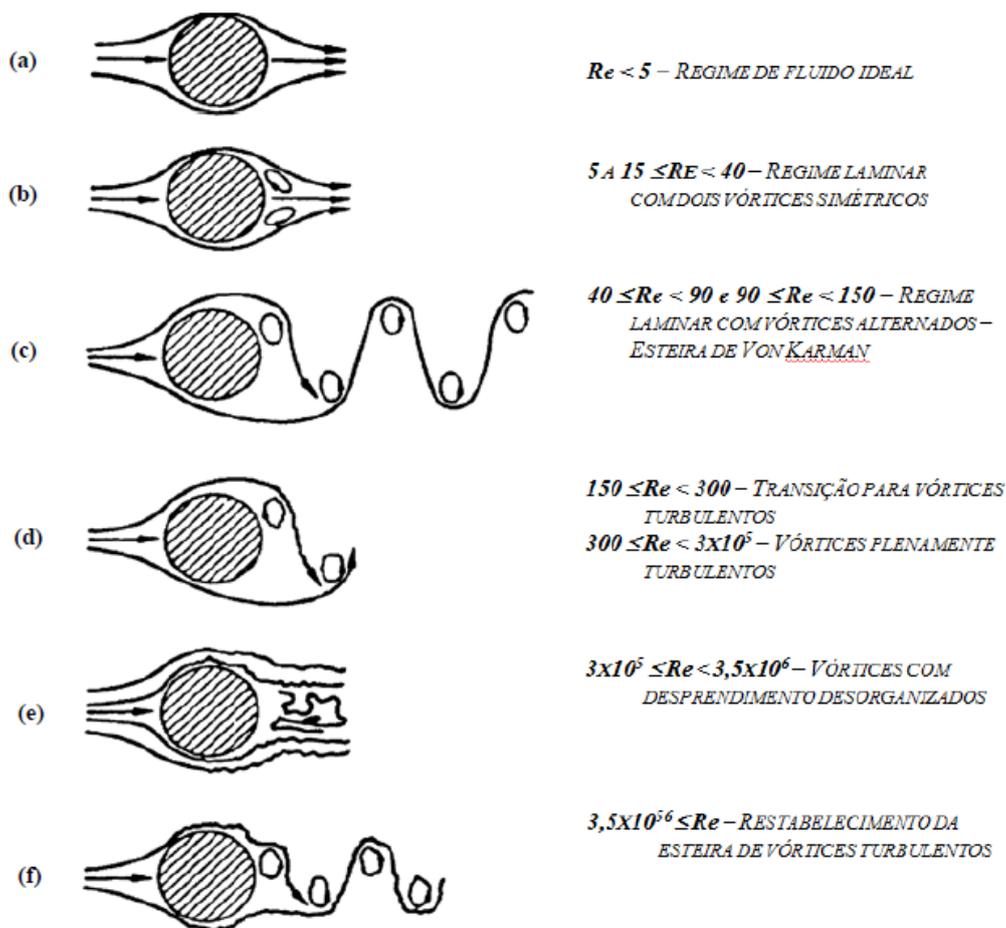


Figura 13 - Comportamento do escoamento para diferentes variação do número de Reynolds [12]

Quando o número de *Reynolds* é menor que 5, as forças viscosas são superiores as forças de inércia, logo o escoamento é laminar, mantendo o escoamento em torno do cilindro simétrico. Para valores do número de *Reynolds* no item (b), da figura 13, em regime laminar surge um par de vórtices simétricos formados na esteira do cilindro. Em (c) ocorre o desprendimento de vórtice tornando o cilindro instável com movimentos oscilatórios devido ao surgimento de força transversal alternada. Com Número de *Reynolds* próximo à 150, uma dupla fila de vórtices é formada alternadamente, este fenômeno é conhecido como vórtices de *Van Karman*. No item (d), apesar do escoamento na camada limite permanecer em regime laminar, ocorre a transição para vórtices turbulentos. Faixa de $300 \leq Re < 3 \times 10^5$, a esteira dispõe de menor largura que o diâmetro do cilindro, apresentando períodos de desprendimento estabelecido. Esta faixa, de $150 \leq Re < 3 \times 10^5$, é denominada de região subcrítica. Item (e), Faixa transitória a qual o escoamento na camada limite torna-se de laminar para turbulento, comportamento desorganizado com formação de

vórtices aleatórios. Item (f) verifica-se o restabelecimento da esteira de vórtices, apresentando uma forma mais ordenada [12].

Número de *Strouhal*.

Em 1878, o físico tcheco *Vincenc Strouhal* estudou a vibração de um fio, livre para oscilar, submetido a uma corrente de ar e concluiu que a frequência do som emitido f_s resultante do movimento dele varia com a velocidade V do escoamento do fluido e com o diâmetro D do fio. *Strouhal* também observou que quando a frequência do som confere com uma das frequências naturais do fio, o som era intensificado.

Porém, apenas em 1896 que *Lord Rayleigh* definiu um número adimensional conhecido como número de *Strouhal* (St) que relaciona a frequência de desprendimento de vórtices, o diâmetro da estrutura e a velocidade do escoamento.

$$St = \frac{f_s \cdot D}{v} \quad (11)$$

O número de *Strouhal* também depende do número de *Reynolds* como é apresentado nas figuras 14 e 15, onde está relação é para corpos cilíndricos.

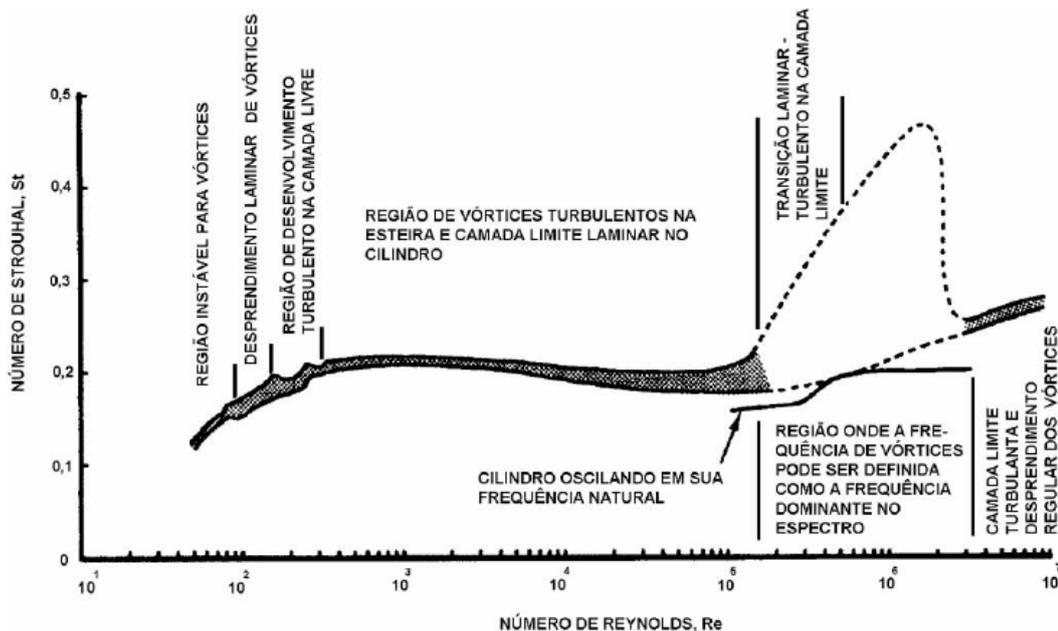


Figura 14 - Número de *Reynolds* em função do Número de *Strouhal*, em um cilindro

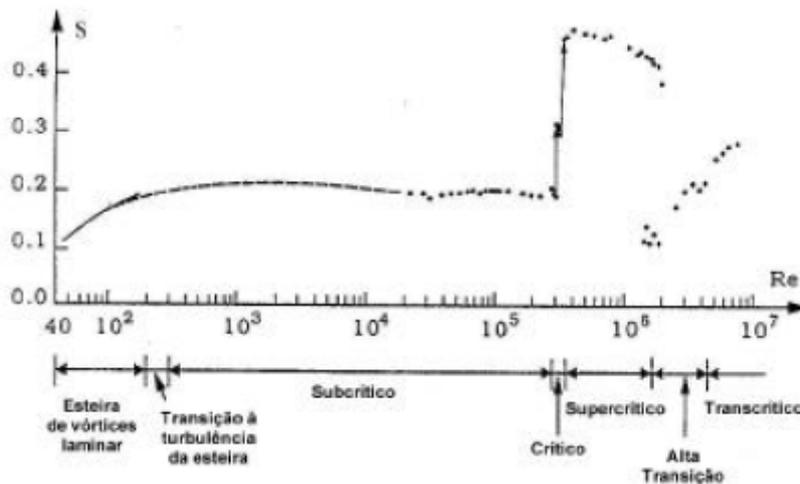


Figura 15 - *Strouhal vs Reynolds* alterando o regime do escoamento para cilindros lisos.

Pode-se observar grande aumento do número de *Strouhal* alcançando valores aproximados de 0,45 na região supercrítica do número de *Reynolds*. “Este resultado faz com que o desprendimento de vórtices ocorra mais à jusante, gerando vórtices mais próximos uns dos outros, ocasionando uma interação mais rápida do que em um regime subcrítico, o que ocasionará um aumento na frequência dos vórtices observada na esteira e conseqüentemente, o número de *Strouhal*” [12].

No gráfico da Figura 14, ocorre a separação para dois tipos de superfícies do cilindro, lisas, alcançando valor próximo de 0,5, e rugosas, onde, para um mesmo número de *Reynolds*, a esteira de vórtices encontra-se organizada com valor constante de número de *Strouhal* próximos a 0,2 e 0,25 [12].

Quando a frequência de desprendimento de vórtice aproxima-se da sua frequência natural, a frequência de vibração do cilindro possuirá a mesma frequência de desprendimento de vórtices, atingindo valor máximo de amplitude de vibrações. Este fenômeno é denominado como *Lock-in* [12]. A Figura 16 demonstra a região onde ocorre o *Lock-in* e a relação da amplitude do cilindro com a razão da frequência de vibração do corpo e a frequência de desprendimento de vórtices (frequência de *shedding*).

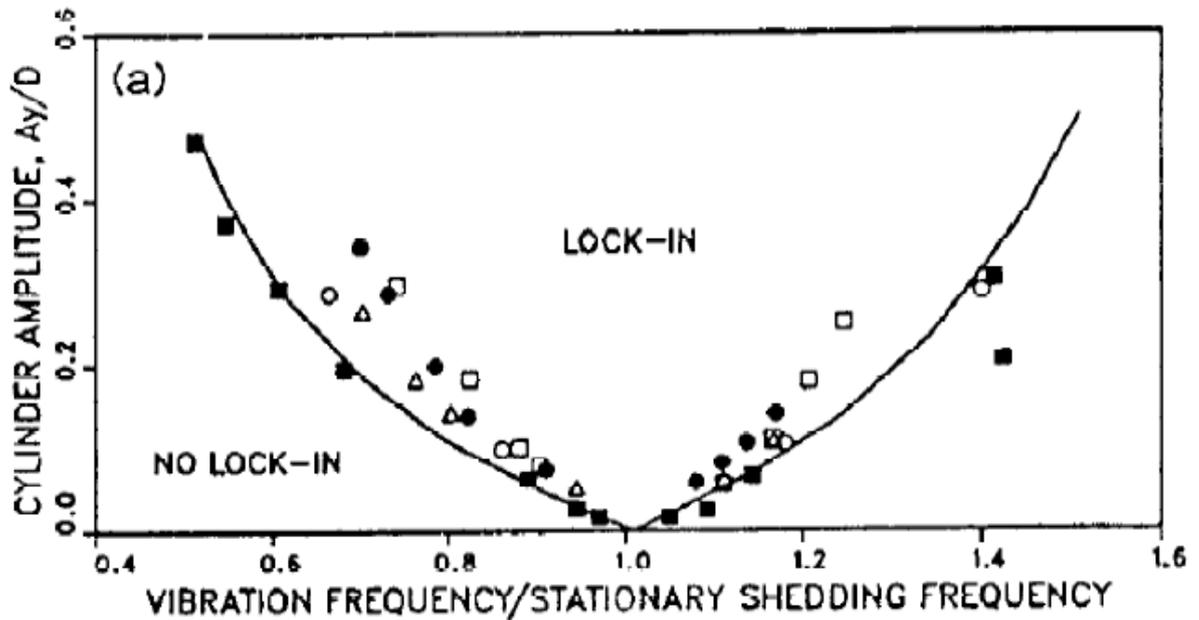


Figura 16 - Amplitude do cilindro em relação a vibração da estrutura em razão com a frequência de *shedding* [12]

Força de sustentação.

À medida que o fluido escoar sobre o corpo, ele gerará tensões superficiais sobre cada elemento da superfície. As tensões superficiais são compostas de tensões tangenciais devido à ação viscosa e de tensões normais devido à pressão local. A força resultante ocasionado pelo movimento relativo entre o corpo sólido e o fluido viscoso que o circunda, é decomposta por duas forças; arrasto, componente da força paralela à direção do movimento, e sustentação, componente da força perpendicular à direção do movimento [11].

A força de arrasto é constituída por dois agentes: fricção, dependente da superfície de contato do escoamento com o corpo, e pressão, a pressão varia em função de cada região da trajetória do escoamento ao redor do cilindro (Figura 10).

A formação de vórtices causa uma força de sustentação, ou *lift*, oscilatória sobre o cilindro, perpendicular ao movimento da corrente [11], e varia com a frequência de desprendimento de vórtices.

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * C_L * \sin(ws * t) \quad (12)$$

A força de sustentação é proveniente da formação de vórtices, e atua transversalmente ao fluxo sobre o corpo, variando com a frequência de desprendimento de vórtices,

provocando um deslocamento transversal no corpo, que equivale à amplitude de vibração da estrutura. Esta vibração criará uma reação do fluido ao deslocamento provocado, esta reação denomina-se de força de arrasto *cross-flow* (transversal) como apresentado na figura 17 [11].

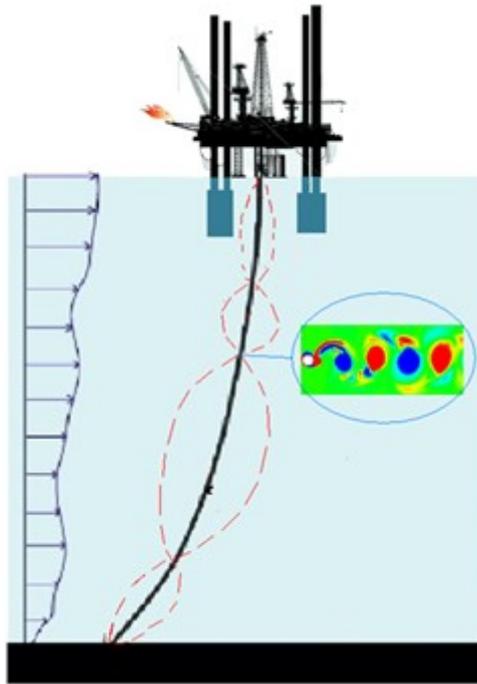


Figura 17 - Vibração do *riser*. (Fonte: <http://www.brunel.ac.uk/research/Institutes/Institute-of-Materials-and-Manufacturing/Structural-Integrity/Research-Area-About-us/Fluid-structure-interaction>)

2.2.3. Frequência natural do *riser*.

Devido as dificuldades de simular a frequência de um *riser* flexível operando em seu estado de operação, diversos experimentos são realizados por cabos, tanto em contato com a água como o ar, a fim de obter uma aproximação real. Logo, a frequência natural de um *riser* flexível suspenso terá uma aproximação pela formula da frequência natural de um cabo flexível.

$$fn = n \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{T}{m*L^2}} \quad (13)$$

Onde n representa o modo de excitação, T a tensão no *riser*, m a massa por unidade de comprimento do *riser* e L o comprimento total. Esta fórmula é uma boa aproximação quando é considerado que a variação de tensão é moderada.

3. Fluoreto de polivinilideno (PVDF).

O Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) é um polímero sintético termoplástico, que apresenta em sua microestrutura as fases amorfas e cristalinas alternando-se dentro do material. Além de ser fácil e barato de fabricar, possui grande resistência química e às intempéries, excelente estabilidade térmica, elevada resistência mecânica e a fluência quando comparados a outros polímeros. É o único polímero fluorado que apresenta características piezoelétricas, sendo usado em sensores de pressão.

O PVDF também apresenta propriedade de baixa permeação a gases e líquidos, mesmo em altas temperaturas. Em consequência disso, a resistência a descompressão rápida (efeito *blistering*) é elevada, tornando vantajoso o emprego do PVDF em diversas aplicações na indústria de petróleo, como na elaboração da camada de estanqueidade ou barreira de pressão em risers flexíveis [13].

Pode apresentar quatro fases estruturais distintas alfa (α), beta (β), gama (γ) e delta (δ), que podem ser interconvertidas pela aplicação de energia mecânica, térmica ou elétrica [14]. Dentre as fases estruturais apresentadas, as mais comuns são α , β e γ .

A fase alfa (α) é a fase cristalina mais comum do PVDF e a mais fácil de ser obtida, é apolar e pode ser formada pela cristalização a partir do fundido, seguido de um super resfriamento [14]. Através de estiramentos, os filmes nesta fase podem ser orientados, sendo que qualquer mudança na orientação do dipolo devido ao campo elétrico externo pode servir para conferir novas características ao material. Além de tudo, é a fase a qual se obtêm as outras três fases por diferentes meios de tratamentos, térmicos, mecânicos ou elétricos [13].

A fase beta (β) normalmente é obtida por estiramento mecânico uni ou biaxial da fase α , sabe-se que a transformação é muito influenciada pela temperatura. Porém, também pode ser alcançada por cristalização em meio de solução com DMF ou n-metilpirrolidona em temperaturas abaixo de 70 °C. É uma fase polar e ganha destaque pela grande atividade piro e piezoelétrica, com isso de grande relevância do ponto de vista tecnológico [13,14].

A fase gama (γ) é polar, e também é obtida a partir da fase α por meio da cristalização do polímero fundido sobre alta pressão, podendo também ser muito semelhante a uma mistura

das fases α e β . Na estrutura desta fase as cadeias são orientadas de maneira que os momentos de dipolos se somam [13].

Para a obtenção da fase δ é necessário à aplicação de um intenso campo elétrico na fase α , em que induz a inversão dos dipolos elétricos das cadeias, transformando-o assim em fase δ . A fase δ como a fase α , apresentam mesma conformação das cadeias (*trans-gauche*), diferindo no modo de empacotamento (fase com momento dipolar não nulo). A fase δ é polar e sua célula unitária possui estrutura ortorrômbica [14].

3.1. A piezoelectricidade no PVDF- β .

O efeito da piezoelectricidade foi descoberto em 1880, pelos irmãos *Pierre e Jacques Curie* na França, em cristais de quartzo. Motivou condições de pesquisa e desenvolvimento de diversas aplicações como o sonar, utilizado durante a Segunda Guerra Mundial na detecção de submarinos. No entanto, o efeito da piezoelectricidade em polímeros só foi descoberta em 1969 por *Heiji Kawai*, que observou que o fluoreto de polivinilideno – PVDF sobre o efeito de tração e polarizado em grandes campos elétricos (~ 300 kV/cm), apresenta valores de coeficientes piezoelétricos superiores aos do quartzo, no entanto inferiores aos das cerâmicas [13].

O efeito piezoelétrico é a capacidade de um material gerar tensão elétrica por resposta à uma tensão mecânica capaz de deforma-lo, este evento é chamada de efeito piezoelétrico direto e, com isso, permite funcionar como um sensor piezoelétrico. A amplitude e a frequência do sinal são diretamente proporcionais à deformação mecânica do material piezoelétrico [13]. O efeito piezoelétrico é um processo reversível, ou seja, pode ser submetido ao efeito inverso da piezoelectricidade que ocorre pela aplicação de um campo elétrico que gera tensão mecânica no material, este fenômeno permite a aplicação como um atuador. A figura 18 demonstra o efeito direto e inverso do material.

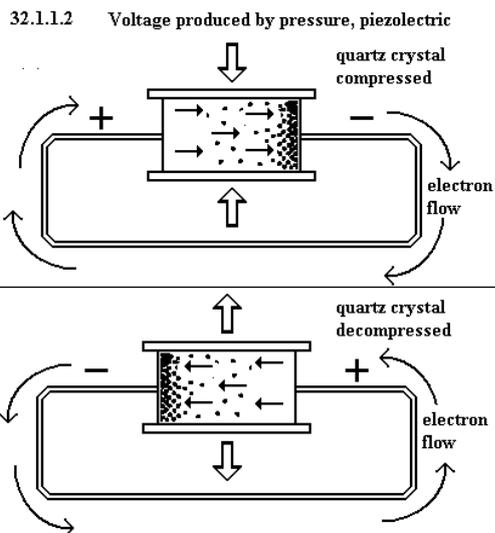


Figura 18 - Efeito piezoelétrico sobre tração e compressão. (Fonte: http://www.uq.edu.au/_School_Science_Lessons/32.1.1.2.GIF)

O material piezoelétrico sobre tensão mecânica produz carga elétrica que pode ser mensurado nos eletrodos colocados nas faces do mesmo conforme a figura 19.

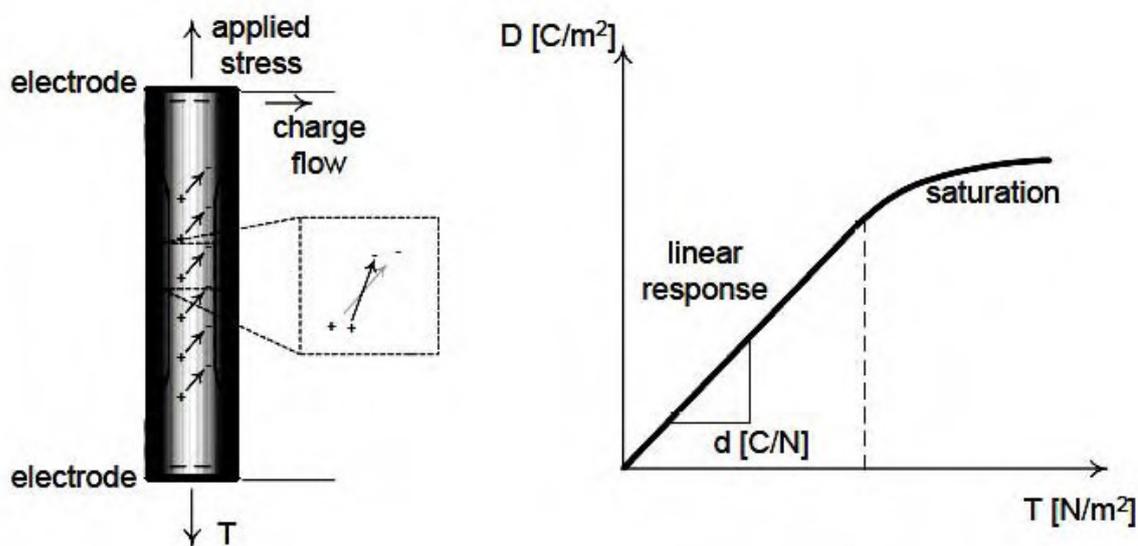


Figura 19 - Deslocamento elétrico em função da tensão [13]

A curva do deslocamento elétrico D [C/m^2] em função da tensão mecânica T [N/m^2], para um campo elétrico $E=0$, contém uma região elástica linear e uma região de saturação. A constante de proporcionalidade é o coeficiente d [C/N].

Agora, um material piezoelétrico sobre um campo elétrico E [V/m], com tensão mecânica $T=0$, o material sofrerá uma deformação S [m/m] conforme demonstrado na figura 20.

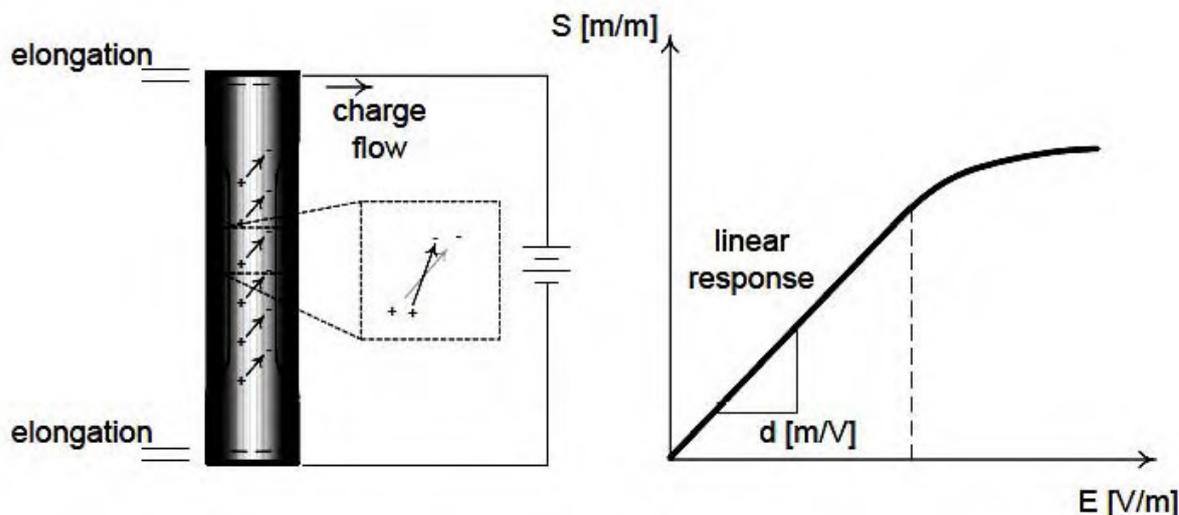


Figura 20 - Deformação do material em função do campo Elétrico [13]

A curva da deformação do material em função do campo elétrico, também contém o coeficiente piezoelétrico do material d [m/V] na região linear [13,15].

Em termos gerais, a ausência de um centro de simetria em sua célula unitária, de maneira que o momento dipolo total não se anule quando um campo elétrico externo é aplicado, é um requisito fundamental para que um material possa apresentar o fenômeno da piezoelectricidade [13].

“Na prática, todos os materiais piezoelétricos são anisotrópicos. Isto significa que as suas respostas elétricas e mecânicas diferem dependendo do eixo de aplicação do campo elétrico ou tensão mecânica” [13].

Os materiais piezoelétricos pertencem à classe dos materiais ferroelétricos. A estrutura molecular desses materiais apresenta dipolo elétrico. Materiais ferroelétricos são definidos como aqueles que apresentarem polarização elétrica espontânea em determinada faixa de temperatura que não deforme ou retire as propriedades ferroelétricas do material, e consecutivamente pode ser reorientada pela aplicação de um campo elétrico, resultando na apresentação de propriedades piezoelétricas. A piezoelectricidade do PVDF está relacionada à intensidade do campo elétrico aplicado, ao tempo de aplicação, à temperatura e ao conteúdo das diferentes fases na amostra [13,15].

Os efeitos piezoelétrico direto e inverso podem ser representados a partir de modelos equacionais que relacionam a deformação e deslocamento elétrico com a tensão e o campo elétrico.

$$D = d + E * \varepsilon^\sigma \quad (14)$$

$$S = \sigma * S^E + d * E \quad (15)$$

Onde são representados como “D” o deslocamento elétrico, “S” é a deformação, “d” o coeficiente de deformação, “E” o campo elétrico, “ε” é a permissividade dielétrica, “s” a compliança elástica e “σ” a tensão ou compressão mecânica. A equação (14) demonstra o efeito piezoelétrico direto, já a equação (15) demonstra o efeito inverso. As duas equações estão no formato de notação matricial compacta. Outro fator importante nas equações é o parâmetro S^E que representa a elasticidade do material a um campo elétrico constante e ε^σ corresponde à permissividade a uma tensão mecânica constante e a um efeito piezoelétrico constante [13]. Calcula-se a diferença de potencial nas faces do material piezoelétrico quando o deslocamento elétrico “D” é nulo, não ocorrendo movimento de cargas. Dessa forma, utilizando a equação (14) torna-se.

$$0 = dT + \varepsilon E$$

Dividindo por $\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$.

$$0 = d\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)T + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon}\right)E$$

$$E = -\frac{d}{\varepsilon}T = \frac{V}{t}$$

$$V = -\frac{d}{K\varepsilon_0 A}Ft \quad (16)$$

Sendo $k = \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

Onde “k” é a constante dielétrica do material, “F” a força aplicada, A é a área onde esta aplicada a força e t a espessura do material. A equação 16 representa a equação de tensão elétrica em circuito aberto [15], e é diretamente proporcional com a espessura do material, ou seja, quanto mais material, maior é a tensão elétrica gerada.

4. Procedimento Experimental.

O procedimento experimental ocorreu no laboratório de sensores a fibra ótica (LSFO) na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), foi realizada com os seguintes instrumentos: Uma amostra de um PVDF, *Shaker Vibration Exciter Type 4808*, analisador dinâmico de sinal *Bruel & Kjaer* tipo 2719, amplificador de sinal *Agilent*, dois acelerômetros, dois eletrodos, uma placa digitalizadora da *National – NI USB-6229* e a utilização do software *Labview*.

Seguindo a teoria da piezoelectricidade, um material submetido a perturbações mecânicas periódicas, produzirá tensões elétricas nele. Os ensaios foram realizados de forma a identificar níveis de tensões elétricas geradas pela perturbação mecânica. Foram realizados uma série de varreduras na frequência de excitação, provocada pelo *shaker* sobre a amostra de PVDF. Em cada varredura em frequência, foram testados diferentes acelerações sobre o corpo de prova. A amostra do PVDF foi instalada no *shaker* com uma de suas extremidades fixada por uma chapa e duas hastes metálicas, dois eletrodos foram colocados a 9 cm da extremidade fixa e a 13,5 cm na amostra, como mostrado na foto da figura 21. Um acelerômetro foi fixado na placa fixação e o outro na extremidade livre do PVDF. Esta configuração possibilitou a realização de ensaios repetitivos de vibração.



Figura 21 – Configuração do teste de excitação do PVDF no shaker.

Primeiramente, através do *LabView*, nós configuramos a frequência de aquisição, o número de amostras, o número de medições, a aceleração e a frequência de busca determinados pela condição de trabalho desejado. Para que as frequências possam ser reproduzidas com o menor erro experimental possível, o experimento foi seguido pelo teorema de Nyquist que se refere que a frequência de amostragem, deve ser, no mínimo, maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado. A metade da frequência de aquisição é chamada de frequência de Nyquist e corresponde ao limite máximo de frequência de sinal que pode ser reproduzido [16]. Ou seja, a frequência de aquisição deve ser maior que o dobro da maior frequência de busca escolhida.

Foi amostrado 10.000 dados de tensão elétrica, com frequências de excitação variando de 100 Hz até 6.000 Hz. Para frequências de 100 Hz até 500 Hz (com passo de 50 Hz), a frequência de aquisição foi configurada para 10.000 Hz. Já para as frequências de 1.000 Hz a 6.000 Hz (com passo de 500 Hz), foi ajustado para 20.000 Hz.

O procedimento seguiu com a configuração da frequência de excitação a ser mediada no analisador dinâmico de sinal, mostrado na figura 22.



Figura 22 – Analisador dinâmico de sinal.

Logo depois, a variação da aceleração é obtida ao girar o potenciômetro do amplificador de sinal (figura 23), variando de 1 G à 10 G para cada frequência de excitação selecionada. Para cada aceleração G foram recolhidas 50 medições de tensão elétrica gerada pela vibração do *shaker*.

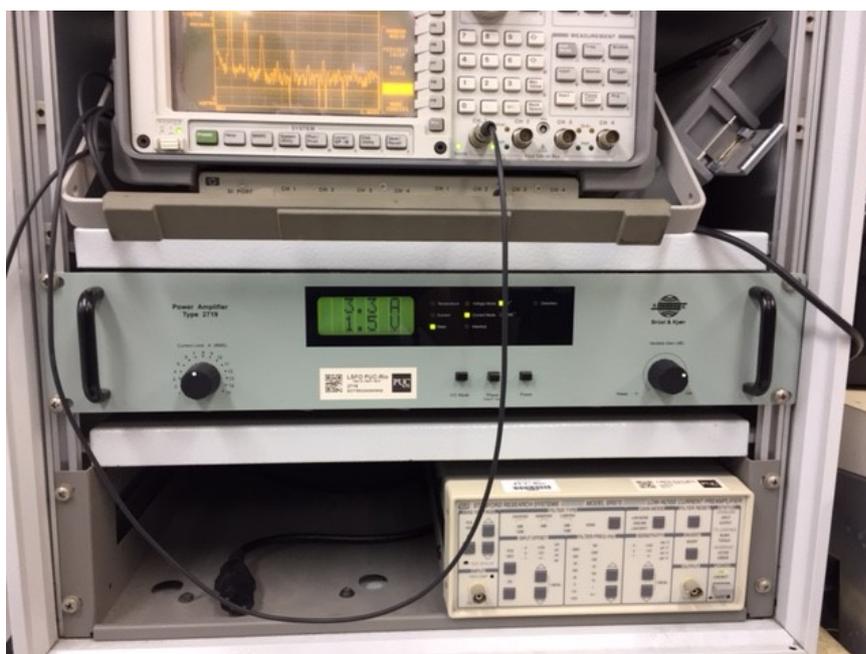


Figura 23 - Amplificador de Sinal

Conforme a aceleração era aumentada, mais o *shaker* estimulava a oscilação da amostra, a qual era medida pelos acelerômetros, e estas vibrações no PVDF apresentava maior geração de amplitudes de tensões elétricas onde eram medidas pelos eletrodos posicionados nele.

5. Resultados.

O objetivo inicial do presente trabalho era o de comparar a frequência natural do riser em um determinado número de modos de excitação, com as frequências de desprendimento de vórtices provocadas pela corrente marítima. Com isso, podemos determinar quando ocorre frequência de ressonância na estrutura submarina, e comparar estes resultados com os obtidos nos ensaios realizados no laboratório com a amostra de PVDF. Outro aspecto analisado durante os ensaios experimentais foi o de entender a relação eletromecânica, que o material

PVDF apresenta quando submetido a carregamentos semelhantes aos impostos em risers em situações normais. Dessa forma, pode-se determinar que tais circunstâncias, podem ou não, desenvolver tensões elétricas elevando os riscos de ignição do petróleo durante a sua extração.

Todos os cálculos desenvolvidos neste trabalho foram feitos através do software MatLab 2011. Para realizarmos os cálculos necessários devemos considerar as propriedades geométricas e mecânicas do riser a ser estudado a qual encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 - Características geométricas do Riser.

Comprimento total do <i>riser</i>	$L = 500 \text{ m}$
Diâmetro externo	$D_e = 0,22 \text{ m}$
Diâmetro interno	$D_i = 0,17 \text{ m}$
Profundidade da lamina d'água	$H = 400 \text{ m}$
Peso do <i>riser</i> submerso por unidade de comprimento	$p = 550 \text{ N/m}$
Massa por unidade de comprimento do <i>riser</i>	$m = 55 \text{ kg/m}$

As propriedades dos fluidos e as dimensões supostas da lamina d'água relevantes ao trabalho estão presente na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades dos fluidos e dimensões verticais e horizontais da lamina d'água.

Massa específica da água do mar	$\rho_{\text{água}} = 1025 \text{ kg/m}^3$
Viscosidade dinâmica da água	$\mu_{\text{água}} = 1,39 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$
Massa específica do petróleo bruto	$\rho_{\text{petróleo}} = 850 \text{ kg/m}^3$
Profundida da lamina d'água	$y = 400 \text{ m}$
Comprimento no eixo x do <i>riser</i>	$x = 80 \text{ m}$

Para o calculo da frequência natural do *riser*, é preciso obter os carregamentos estáticos atuando no nele. Neste trabalho iremos considerar apenas o peso efetivo do riser e a tensão sofrida apenas pelo peso efetivo como forças estáticas. Para o calculo do peso efetivo, foi realizada o equilíbrio de forças do peso da estrutura, peso do fluido e força de empuxo, considerado que os carregamentos são constantes ao longo do riser. Utilizando as equações (1), (7) e (8) na equação de equilíbrio de forças, obteve-se o peso real do *riser*.

Para determinar a tensão do trecho suspenso, é necessário o cálculo do cabo na forma catenária a qual foi realizada pelo procedimento na secção 2.2.1 a partir das equações (3) e (6).

O gráfico da figura 24 é a forma ilustrativa aproximada da configuração catenária do riser indicado no trabalho.

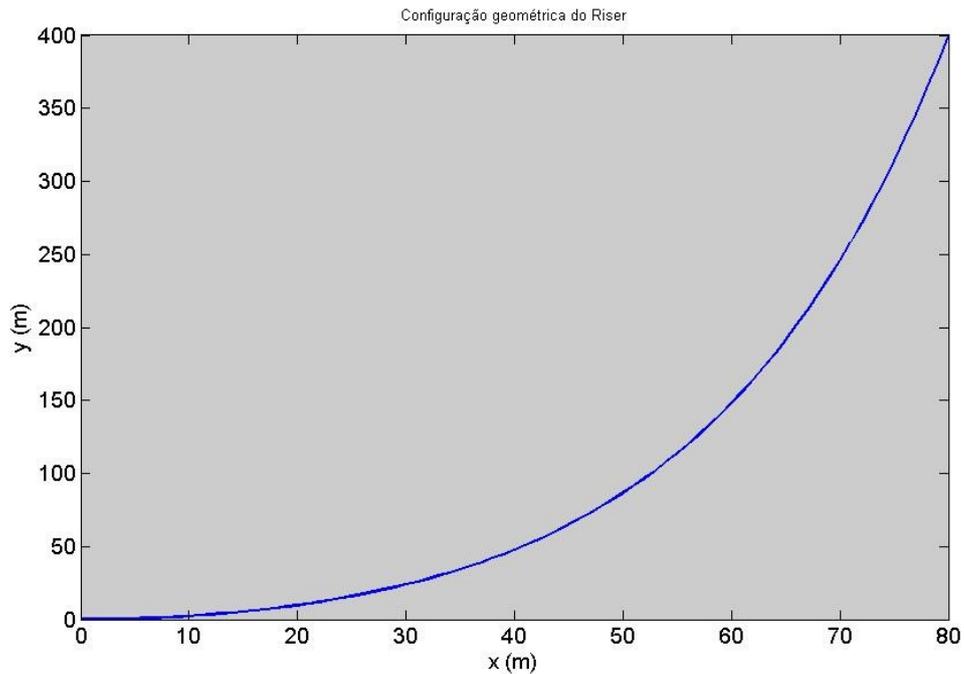


Figura 24 - Configuração catenária do Riser.

Sabendo a geometria, a tensão de tração e a massa por unidade de comprimento, a frequência natural do *riser* pode ser calculada pela equação (13). Para isto, variamos os modos de excitação. Os resultados encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Frequência natural em função do número de modo.

Modo (n)	Frequência natural (Hz)
1	0,052
2	0,104
3	0,156
4	0,208
5	0,260
10	0,520
20	1,041
30	1,562
45	2,343
100	5,206

Com as frequências naturais adquiridas, devemos obter as frequências de desprendimento de vórtices, e para isso dependemos da velocidade, do número de Strouhal e da velocidade de escoamento do fluido. Neste trabalho estaremos considerando a velocidade do fluido constante ao longo do riser. Para a velocidade da corrente marinha, foram simuladas típicas correntes oceânicas a qual poderá ocorrer na operação do riser. Além disso, como o escoamento do fluido deverá estar perpendicular ao eixo vertical do riser, sendo que este possui uma configuração a qual seu eixo varia em relação ao eixo horizontal. A velocidade terá seu ângulo oposto ao eixo da estrutura variando, estão representadas na tabela 4.

$$V = V_x \cos \theta \quad (16)$$

Tabela 4 - Velocidade do escoamento em função do ângulo.

V (m/s)	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
0,5	0,5	0,4830	0,4330	0,3536	0,25
1,0	1,00	0,9659	0,8660	0,7071	0,50
1,5	1,50	1,4489	1,2990	1,0607	0,75
2,7	2,70	2,6080	2,3383	1,9092	1,35

Já para o número de *Strouhal*, é preciso calcular o número de Reynolds para cada velocidade e θ simulada. Sabendo que o número de Reynolds varia linearmente com a velocidade, e que da menor velocidade para a maior estão em uma faixa de Reynolds de 10^4 a 10^5 . O número de *Reynolds* em função da velocidade está representada na figura 25. Pelo gráfico do número de *Strouhal* em função do número de Reynolds da figura 14 na seção 2.2.2, o escoamento apresenta vórtices turbulentos na esteira e camada limite laminar, presente na região subcrítica. Logo, nesta região o número de Strouhal não varia muito, podendo ser aproximado para todos os casos em 0,2.

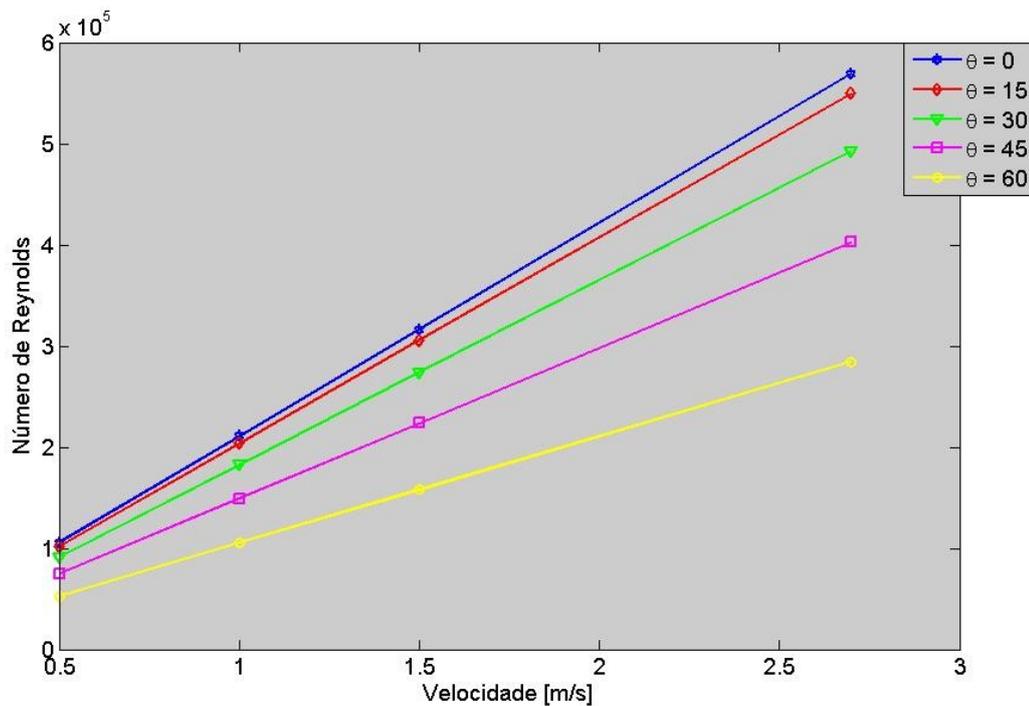


Figura 25 - Número de *Reynolds* em função da velocidade e do ângulo.

Com todas as variáveis dependentes assumidas, o cálculo das frequências do desprendimento de vórtice podem ser alcançadas pela equação (11). Dessa forma o gráfico da figura 26 ilustra a frequência de desprendimento de vórtice em função da velocidade e do ângulo θ oposto ao eixo vertical da estrutura.

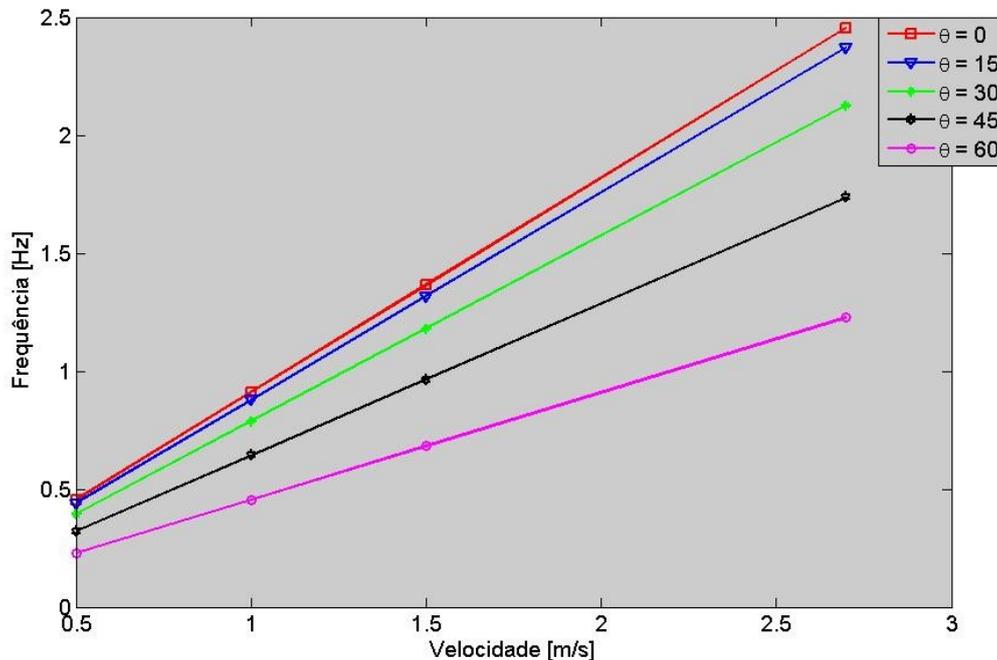


Figura 26 - Frequência de desprendimento de vórtice em função da velocidade e do ângulo

Como era de ser esperada, a frequência de desprendimento de vórtice aumenta linearmente com a velocidade. O ângulo 0 possui maior variação devido a incidência perpendicular direta com o eixo da estrutura, não ocorrendo componentes vetoriais.

A frequência de ressonância da estrutura é alcançada quando a frequência de desprendimento de vórtice aproxima-se da frequência natural do riser. Comparando as frequências naturais do riser, na tabela 3, com as frequências do desprendimento de vórtice, podemos observar que em cenário extremo, no caso para velocidades com $\theta = 0$, o modo de 45 está próximo a frequência de desprendimento de vórtices com valor aproximado de 2,4 Hz. Logo, estes modos serão conhecidos como modos de excitação, onde a estrutura oscilará nesta frequência. Podemos observar também que a partir do modo de 4, a qual corresponde frequência natural de 0,208 Hz, ocorrerá frequência de excitação por desprendimento de vórtice.

Para obter o coeficiente de arrasto no cálculo da força de *lift*. Optou-se aproximar o valor para 1 devido ao Reynolds estar numa faixa que o coeficiente de arrasto não varia muito. O gráfico da figura 27 para cilindro liso é demonstrado.

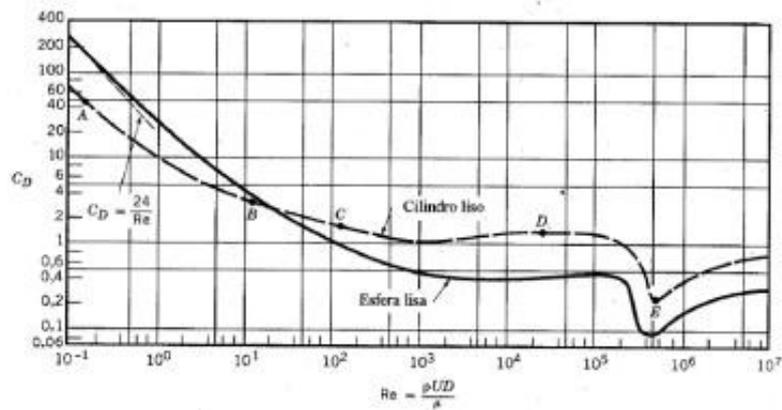


Figura 27 - Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds.

Para simular a força de *lift*, serão consideradas apenas o caso das velocidades perpendiculares ao eixo do riser, ou seja, $\theta = 0^\circ$. As forças de *lift* em função do tempo são demonstradas no gráfico da figura 28.

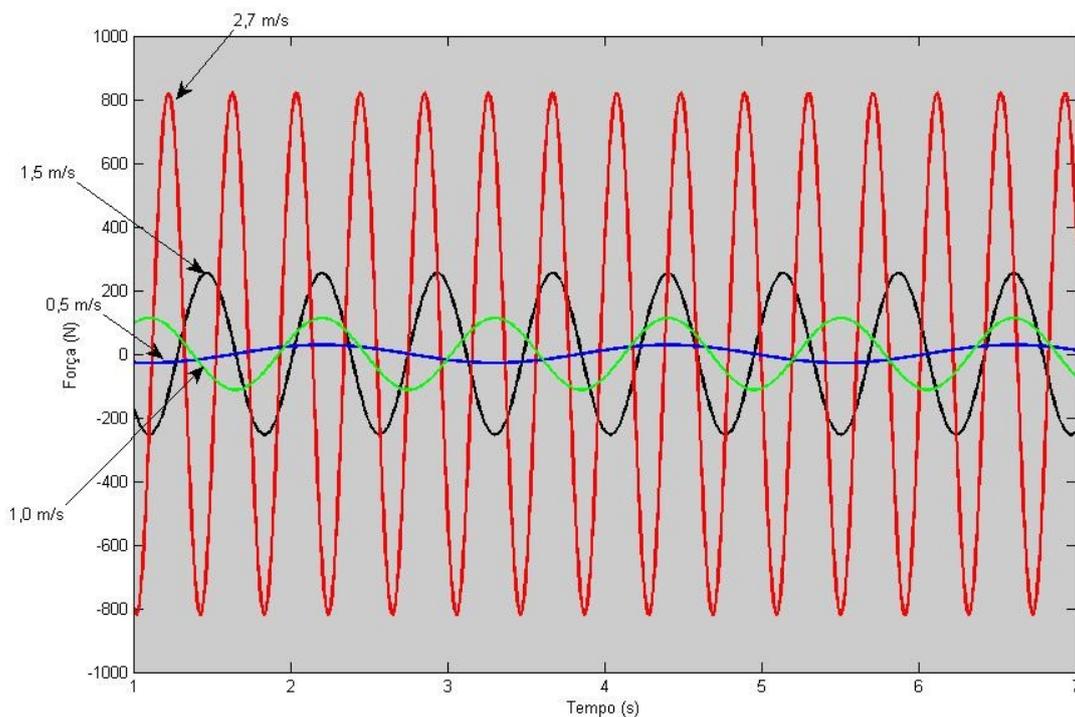


Figura 28- Força de *Lift* em função da velocidade e do tempo

Nota-se que a força de *lift* possui um comportamento harmônico e suas amplitudes estão mais relacionadas com a velocidade. No caso da velocidade em 2,7 m/s, o carregamento oscila em 800 N, isso contribui para a fadiga na estrutura, devido a isto que os efeitos da força de *lift* são estudados de precaução a fadiga. Quanto maior a frequência de desprendimento de vórtice, maior é a frequência de excitação da força de *lift*. A oscilação é verificada pela variação da pressão exercida pelo fluido no *riser*, esta variação é causada pelo desprendimento da camada limite que forma a esteira de vórtices.

Primeiramente na etapa dos ensaios, para obter a localização das frequências naturais do sistema, foi utilizado um ruído branco para identificar a localização dessas frequências quando entram em ressonância. A figura 29 mostra essa varredura.

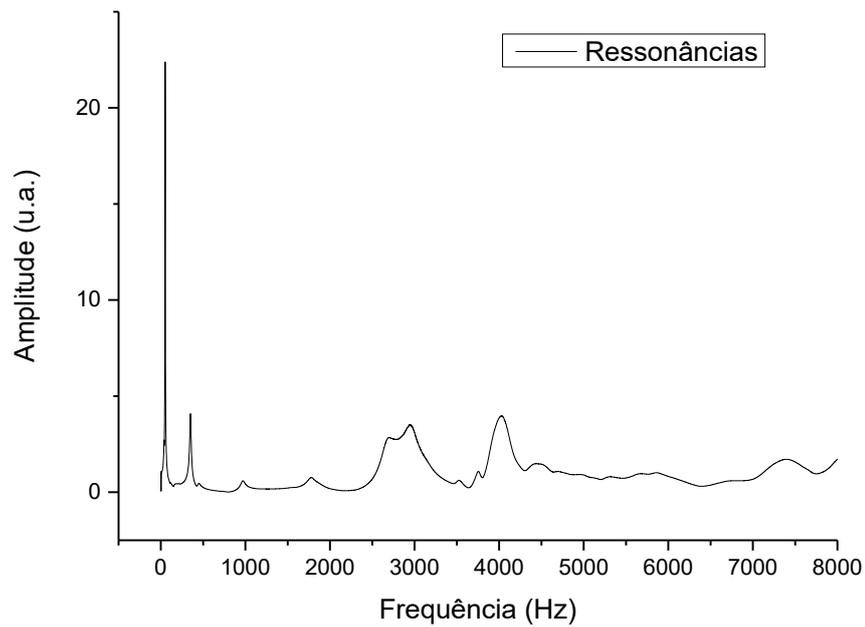


Figura 29 - Varredura do ruído branco.

Os resultados dos ensaios realizados no laboratório, como mencionado no capítulo 4, estão representados nos gráficos das figuras a seguir.

A primeira parte do ensaio foi efetuada com frequências de 100 Hz até 500 Hz variando a aceleração de 1 G a 10 G para cada frequência. Este ensaio é representado na figura 30.

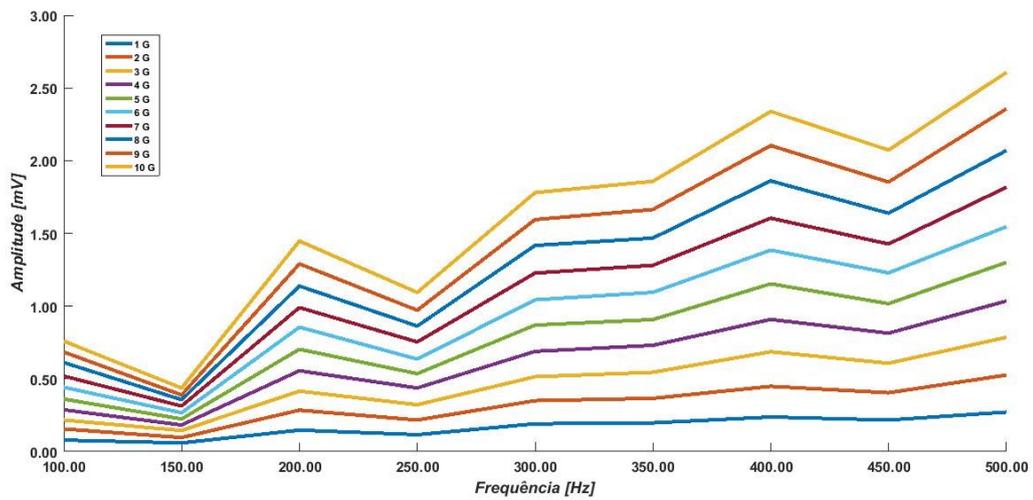


Figura 30 - Ensaio de Freqüências de 100 Hz a 500 Hz

Houve uma queda na freqüência de 100 Hz até 150 Hz, porém, como era previsto a tensão elétrica basicamente aumenta com o aumento da freqüência de excitação, com algumas oscilações, e com a aceleração. Este comportamento confirma o que a literatura diz a respeito do PVDF, quando sofre excitação mecânica o material gera tensão elétrica. Podemos observar uns picos nas freqüências de 200 Hz e 400 Hz, isso ocorre devido a freqüência natural da instalação, provocando uma ressonância com a freqüência de excitação do *shaker*.

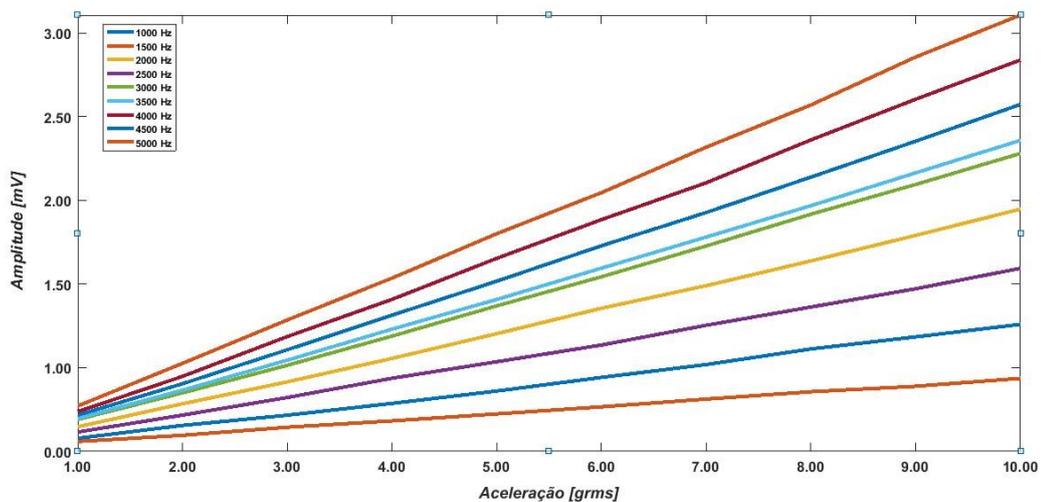


Figura 31 - Tensão em função da aceleração nas freqüências de 100 Hz até 500 Hz.

A figura 31 representa o crescimento linear da curva de tensão elétrica em função da aceleração para cada frequência imposta no material. Em maiores frequências o ângulo de inclinação aumenta, variando de forma mais rápida a tensão gerada. Na frequência de 150 Hz ocorre um comportamento que é reflexo do gráfico da figura 29, o decaimento da curva de tensão.

A segunda parte dos ensaios foram realizadas com frequências de 1.000 Hz a 6.000 Hz com as mesmas variações de aceleração da primeira parte. Não foram feitos testes com frequências mais altas, pois, pelo datasheet do shaker, este entraria em ressonância.

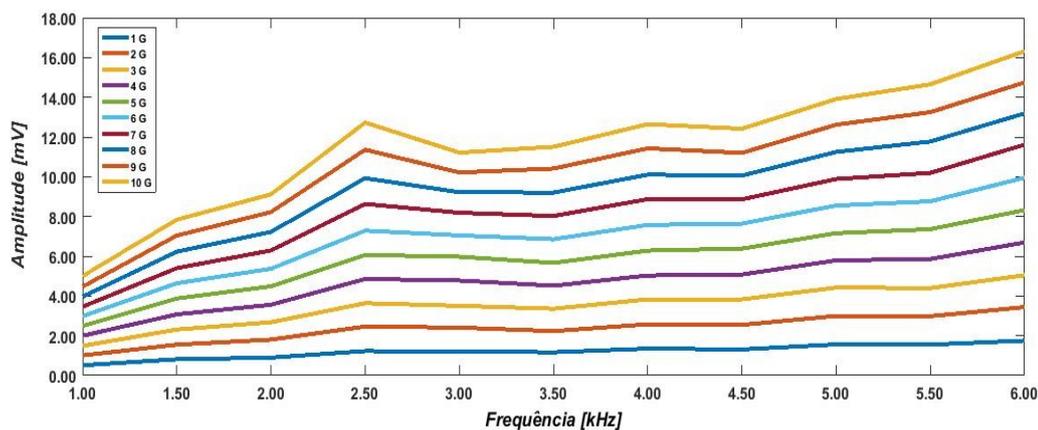


Figura 32 - Tensão em função da frequência de excitação para diferentes acelerações

Podemos observar pela figura 32, que em faixas de frequências maiores, os picos concentram-se nas frequências de 2.500 Hz e uma menor em 4.000 Hz. Essas regiões descrevem a ocorrência da frequência natural da instalação, como na mesma forma da primeira parte, a vibração do *shaker* encontra-se com a frequência natural da estrutura ocasionando a ressonância do sistema.

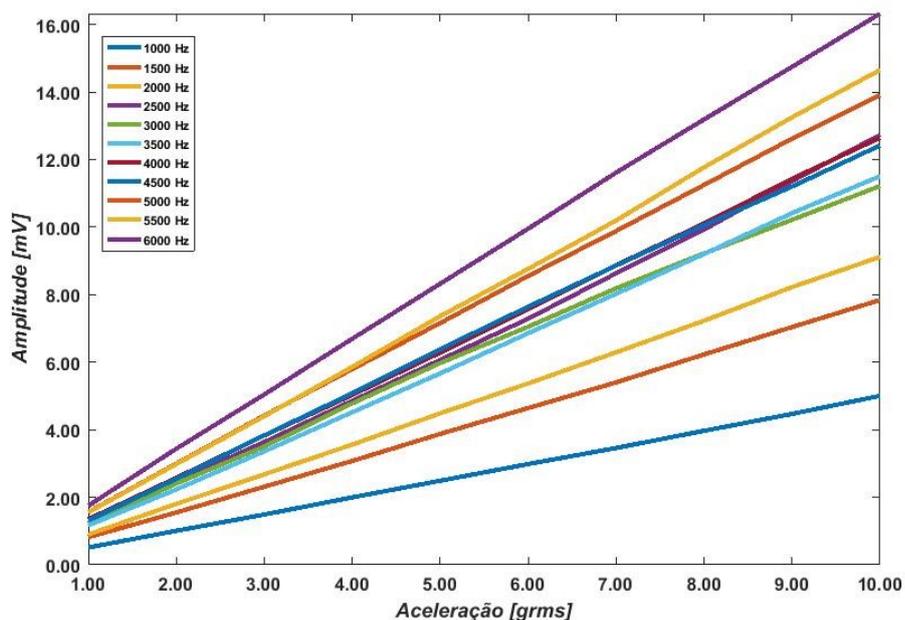


Figura 33 - Tensão em função da aceleração em frequências de 1.000 Hz até 6.000 Hz

Como ocorrido na primeira parte, o gráfico da figura 33 mostra que a tensão elétrica aumenta conforme a aceleração é aumentada. Porém, as inclinações das retas são ainda maiores comparadas com a primeira parte dos ensaios. Quando aumentamos a frequência, a variação da tensão elétrica gerada é maior no decorrer do aumento da aceleração.

6. Conclusão.

A parte experimental comprovou que o PVDF quando submetido a uma perturbação mecânica gera tensão elétrica. Quanto maior a frequência de excitação mais tensão é gerada, e a aceleração da oscilação aplicada na amostra, tem como resposta um comportamento linear crescente na produção de tensão elétrica. Estes resultados confirmam que a aplicação do PVDF pode ser favorável em certos processos de engenharia, como é predito na literatura. Porém, as curvas não se comportaram como ocorreu com o ruído branco. Em baixas frequências os resultados foram mais discrepantes, erro que pode ter sido ocasionado por algum distúrbio na hora de captação dos dados.

As baixas frequências excitação ocasionadas pelo efeito do desprendimento de vórtice na estrutura estão relacionadas com as baixas velocidades marinhas e a geometria do riser. As velocidades das correntes marinhas simuladas no trabalho representam situações em casos amenos a extremos. Já o comprimento da estrutura e seu peso, tornam os valores das frequências naturais mais baixas mesmo aumentando o número de modos.

Como as frequências de excitação observadas nos *risers* são baixas em relação às frequências possíveis de serem realizadas nos testes de laboratório, as mesmas não puderam ser reproduzidas. Entretanto foi observada a geração de tensão elétrica nas amostras evidenciando a necessidade de entender melhor esse fenômeno para garantir a segurança durante a extração de petróleo. Aperfeiçoamento da instalação do sistema de ensaio, deve ser aprimorado para captar com maior precisão os dados obtidos nos testes.

Para o aperfeiçoamento de futuros trabalhos, é conveniente a representação de outros fenômenos que possam contribuir para maiores oscilações na estrutura como o escoamento do fluido interno, a movimentação da plataforma flutuante, a representação diferenciada dos carregamentos no TDP e no topo da estrutura e para simulações mais realistas, considerar a variação das correntes marinhas.

Deve-se considerar que os ensaios experimentais foram feitos para uma amostra do material PVDF, sendo que, numa camada do riser, constituída de uma maior quantidade de material PVDF, pode influenciar em uma geração maior de tensão elétrica, como é apresentada na seção 3.1 pela equação 16. Seria proveitoso ensaios de medições, com maiores distancias, de tensão elétrica do material, verificando se ocorrerá maiores gerações de tensão.

7. Bibliografia.

- [1] <http://brasilecola.uol.com.br/brasil/historia-do-petroleo-no-brasil.htm>. (Acessado em 07/12/2016)
- [2] <http://mundo-petroleo.blogspot.com.br/2008/08/historia-da-perfuracao-de-pocos-de.html>. (Acessado em 07/12/2016)
- [3] <http://fatosedados.blogspetrobras.com.br/2013/08/17/descoberta-do-campo-de-carmopolis-completa-50-anos/> (Acessado em 07/12/2016)
- [4] Alexandre Patrick de Leão; Carolina Caldas Sardinha; Monique Amaral; Ana Paula Santana; Análise dos sistemas de risers utilizados na produção de óleo em sistemas submarinos; Engenharia de petróleo.
- [5] Giovanni Alfredo Rey Nariño; Otimização de Risers em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos; Dissertação de Mestrado, Pontifícia universidade católica do Rio de Janeiro.
- [6] FERNANDO YUDI SAKAMOTO; MODELAGEM DINÂMICA DA ZONA DE CONTATO ENTRE RISER E FUNDO DO MAR SOB AÇÃO DE DESLOCAMENTO E TRAÇÃO IMPOSTOS; ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
- [7] Eduardo Ribeiro Malta. Projeto de um riser flexível para águas ultraprofundas. 2010 Projeto de Graduação de Engenharia Mecânica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [8] Rafael Loureiro Tanaka. Otimização da configuração de risers rígidos. 2009 Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [9] Juan Carlos Romero Albino. Materiais com Gradação Funcional no Comportamento Dinâmico de Linhas Flexíveis. 2011 Tese (Doutorado em Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [10] FRANK P. INCROPERA; DAVID P. DEWITT; THEODORE L. BERGMAN; ADRIENNE S. LAVINE; FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA.

[11] ROBERT W. FOX; PHILIP J. PRITCHARD; ALAN T. MCDONALD; INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS FLUIDOS – SÉTIMA EDIÇÃO.

[12] CAROLINA TEXEIRA DE ALMEIDA; ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES EM UM RISER DE PERFURAÇÃO – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

[13] Khrissy A. R. Medeiros. Obtenção e caracterização de PVDF- β para aplicação em tubos sensores de vazão de água. 2015 Tese (Pós-Graduação em Engenharia Química e de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[14] Fabrício Gardingo Abreu. Análise de Polifluoreto de Vinilideno (PVDF) Sob Carregamento Cíclico. 2012 Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[15] Ricardo Luiz Barros de Freitas. Fabricação, Caracterização e Aplicação do Compósito PZT/PVD. 2012 Trabalho apresentado (Doutorado em Elétrica) – Faculdade de Engenharia UNESP.

[16] http://www.getulio.eng.br/meusalunos/sad/Teorema_da_Amostragem.pdf

[17] J. L. Meriam, L. G. Kraige; Mecânica para engenharia estática – Sexta edição.

Anexo

Comandos do Matlab utilizados no projeto.

```
clc;
clear all;
syms To T Aa fa Ap fp theta freqc n y1 fs Re;

x= 80;
y= 400;
L= 500;
g= 10;
De=0.22;
Di=0.17;
v= 1.07*10^(-3); % [N*s/m²] - viscosidade
dinâmica

Aa= pi*(De^2)/4;
rhoa= 1025;
fa= rhoa*Aa; % massa por unidade de comprimento do empuxo [kg/m]%
Ap= pi*(Di^2)/4;
rhop= 850;
fp=rhop*Ap; % massa por unidade de comprimento do petróleo [kg/m]%
fr= 55; % massa por unidade de comprimento do riser [kg/m]%
u= fr+fp-fa; % massa por unidade de comprimento do efetivo do riser
[kg/m]%

To=solve(((u*y)/To)-cosh((u*x/To))+1,To);
T=solve(((To+y*u)*g)-T,T);

x1= 0:x;
y1 = (To/u)*(cosh((u*x1)/To)-1);

figure(10);
plot(x1,y1)
title('Configuração geométrica do Riser')
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');
hold on

n= [1 2 3 4 5 10 20 30 40 50 100];

freqc=n*0.5*sqrt(T/(fr*L^2)); % frequência natural da corda

%-----%

U = 1.*[0.5 1.0 1.5 2.7];
theta= (pi./180).*[0 15 30 45 60]

Re = rhoa*De*U/v;
% Com o Reynolds calculado podemos encontrar o St e o Cl
St= 0.2;
Cl= 1;
for j=1:1:5
```

```

for i=1:1:4;

    Uc(i,j) = [U(i)*cos(theta(j))]
    Re(i,j) = rhoa*De*Uc(i,j)/v
    fs(i,j)= (Uc(i,j).*St)/De

end

end

figure(2);
plot(U,Re(:,1),'b');
hold on;
figure(2)
plot(U,Re(:,2),'r');
hold on;
figure(2)
plot(U,Re(:,3),'g');
hold on;
figure(2)
plot(U,Re(:,4),'m');
hold on;
figure(2)
plot(U,Re(:,5),'y');
hold on;
xlabel('Velocidade [m/s]')
ylabel('Número de Reynolds')
legend('\theta = 0' , '\theta = 15' , '\theta = 30' , '\theta = 45' , '\theta =
60')

figure(3)
plot(U,fs(:,1),'r')
hold on
plot(U,fs(:,2),'b')
hold on
plot(U,fs(:,3),'g')
hold on
plot(U,fs(:,4),'k')
hold on
plot(U,fs(:,5),'m')
hold on
xlabel('Velocidade [m/s]')
ylabel('Frequência [Hz]')
legend('\theta = 0' , '\theta = 15' , '\theta = 30' , '\theta = 45' , '\theta =
60')

t = 0;
tc = 0;
for t = 1 :0.01:7
    tc = tc + 1;
    T(tc) = t;
    for j=1:1:10

        for i=1:1:5

```

```

    %fviv(1,1)
    fviv(tc) = ((1/2).*(Uc(2,1).^2)) .*
    (rhoa*De.*Cl.*cos(2.*pi.*fs(2,1).*t));

    caxis([-0.03 0.03])
    xlim([0 10])
    hold on
    end
    end
    figure(1);
    plot(T,fviv,'g','linewidth',2)
    xlabel('Tempo (s)');
    ylabel('Força (N)');
    %plot(Uc(:,1),fviv)
    hold on
    f = getframe;
end
movie(f)

```