

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FLÁVIO CABRAL LIMA DOS SANTOS

Monitoração de Deformações em Cilindros Flexíveis

**São Paulo
2006**

FLÁVIO CABRAL LIMA DOS SANTOS

Monitoração de Deformações em Cilindros Flexíveis

Dissertação do trabalho de formatura apresentado ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo.

Área de concentração: Engenharia Mecânica;
Orientador: Prof. Dr. Júlio Romano Meneghini

São Paulo
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Flávio Cabral Lima dos
Monitoração de Deformações em Cilindros Flexíveis / F.C.L. Santos – São Paulo, 2006.
45 p.

Dissertação (Trabalho de Formatura) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Vibrações Induzida por Vórtices 2. Riser 3. Modos Naturais 4. Cilindro I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica. II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Em primeiro lugar a Deus, por ter proporcionado todas as condições necessárias que me fizeram chegar onde estou, me dando muita saúde e força para superar todas as dificuldades encontradas até aqui.

Aos meus pais, Ismar e Leonilda, não apenas pelo suporte dado a mim por todos esses anos de vida acadêmica, mas por acreditar no meu potencial. Temos a certeza que todo esse apoio e incentivo não foram em vão, e a superação de mais essa etapa é só o início da minha retribuição por todos os seus esforços.

A cada um dos meus amigos, que em diferentes graus contribuíram para a formação do meu caráter. Àqueles que, junto a mim no cursinho, sonhavam, faziam planos e se esforçavam para conseguir ingressar numa universidade de ponta, sempre com muito companheirismo. E àqueles que me proporcionaram momentos inesquecíveis nos CAs espalhados pela Poli, nas viagens, nas festas, nos churrascos, também nas reuniões de trabalho, nas aulas, nas provas, etc, e nos raros momentos difíceis pelos quais alguns de nós atravessamos.

A todos os professores que passaram pela minha vida, pelas incontáveis oportunidades de aprendizado que me foram oferecidas, tanto ensinamentos acadêmicos quanto pessoais. Aos mestres dessa Escola, por me ensinar não apenas o conteúdo técnico, mas todo aquele conhecimento que será utilizado para o resto de nossas vidas, seja qual for a área a ser seguida.

Ao professor Júlio Romano Meneghini, que me orientou em dois projetos de iniciação científica e neste trabalho final. Aos outros professores integrantes do Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF) da Escola Politécnica da USP, às secretárias Ivone e Zuleide, aos pós-graduandos e aos alunos de iniciação científica, todos

eles pelo apoio, pela amizade e pelo ambiente agradável que existe nas dependências do NDF.

À CNPq, pela concessão das bolsas de iniciação científica, à FAPESP, à FINEP e à Petrobrás, por toda a estrutura proporcionada ao NDF, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho e de todos os outros desenvolvidos nesse local.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e uma possível construção de um sistema de monitoração de cilindros flexíveis. Esse projeto servirá como uma importante ferramenta para futuras investigações experimentais acerca do fenômeno de Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV), de modo a aumentar o entendimento sobre o mecanismo de acoplamento modais em modelos de estruturas offshore. Também poderá servir de base para futuros projetos de monitoração remota de deformações em risers, a fim de se evitarem vazamentos ao longo dos tubos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS ROMBUDOS.....	13
2.2 FORMAÇÃO E DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES	15
2.3 INTERAÇÕES HIDROELÁSTICAS EM VIV	16
2.4 ACOPLAMENTO MODAL	19
2.5 CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE.....	21
3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS.....	24
3.1 EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	24
3.2 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA.....	25
3.3 SISTEMA DE DETECÇÃO DE CIRCUNFERÊNCIAS.....	29
4. MÉTODOS E ANÁLISES	35
4.1 DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE EMISSÃO DE VÓRTICES ...	35
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO	36
5. CONCLUSÕES	40
6. BIBLIOGRAFIA.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plataforma tipo “ <i>Tension Leg</i> ”	12
Figura 2. Ilustração de uma configuração típica de lançamento em catenária	21
Figura 3. Canal de Água Circulante do NDF	22
Figura 4. Rede de Bragg e os espectros de transmissão e reflexão	26
Figura 5. Mudança da posição espectral	27
Figura 6. Circuito Óptico usando uma fonte ASE eu detector OSA.	29
Figura 7. Curva parametrizada e Transformada de Hough	30
Figura 8. Circunferência de raio r e centro $(x_c; y_c)$	31
Figura 9. Exemplo de uma imagem	33
Figura 10. Esquema de captura de imagem para um modelo cilíndrico..	34
Figura 11. Detalhe da seção transversal da barra interna do modelo.	36
Figura 12. Esquema físico dos modos naturais de vibração	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da frequência de desprendimento de vórtices	36
Tabela 2. Composição da mistura na saída do pré-reator	38

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria petrolífera no Brasil tem crescido de uma forma como nunca vista antes. Na busca pela autosuficiência, a Petrobrás partiu para a exploração de petróleo em águas profundas, promovendo um grande desenvolvimento de tecnologia tanto na indústria offshore quanto na naval. Neste contexto, diversos centros de pesquisas foram formados, dentre eles o Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF), da Escola Politécnica da USP.

Para a exploração de reservas em águas profundas são usadas plataformas que possuem estruturas cilíndricas responsáveis pelo transporte do petróleo desde o leito oceânico até a superfície, uma distância próxima de 2 000 metros. Essas estruturas, conhecidas como *risers*, ficam expostas às correntes marítimas, apresentando os mais variados comportamentos dinâmicos. Devido a grande razão entre o comprimento do duto e seu diâmetro (da ordem de 40 centímetros), esses tubos comportam-se como linhas flexíveis, oscilando de muitas formas diferentes.

Essa complexidade de movimentos exige uma linha de pesquisa aprofundada para se compreender a natureza desse comportamento, de modo a permitir que um conjunto de *risers* não tenha sua vida útil abreviada por avarias provocadas por choques entre tubos vizinhos ou por fadiga estrutural.

A importância de estudos como esse é melhor visualizado quando se tem uma noção dos valores envolvidos em um sistema de produção. Um *riser* instalado, com cerca de 2000 metros, pode alcançar o valor de 4 milhões de dólares (cerca de 2 mil dólares o metro linear). Uma plataforma pode ter cerca de 15 ou 20 dutos, o que significa um custo de 60 a 80 milhões de dólares somente em um conjunto de *riser*.

Basicamente, os fenômenos que provocam as excitações nos *risers* são resultados da interação hidroelástica entre o fluido e a estrutura, sendo conhecidos por Vibrações Induzidas pelo Escoamento (VIE). Esse fenômeno

configura-se como exemplo de problema da mecânica clássica sem um entendimento definitivo, apesar da intensa investigação desenvolvida desde o início do século XX. Sendo assim, esse assunto ainda reserva inúmeros aspectos sem uma consistente e decisiva compreensão. Associada a esta condição, uma realidade na qual o fenômeno mostra-se de interesse prático e crescente em inúmeros segmentos tecnológicos contemporâneos também contribui para mantê-lo sob constante foco das atenções.

As vibrações induzidas pelo escoamento se encontram na maioria dos sistemas nos quais um fluido escoar ao redor de corpos rombudos, tendo importante aplicação em diversas áreas da engenharia. Esse fenômeno pode ser classificado de acordo com sua natureza, sendo o VIV (Vibrações Induzidas por Vórtices) o foco deste texto.

Projetos de linhas *offshore* concentram grande parte das atuais investigações acerca do problema de VIV. Um dos motivos que levam a isso é a natureza não homogênea da condição ambiental excitante (correnteza marítima), que acaba induzindo a coexistência de vários modos naturais de vibrar, principalmente os de maior ordem e menores comprimentos de flexão, agravando ainda mais o quadro de fadiga.



Figura 1. Plataforma tipo “*Tension Leg*”. Observa-se a estrutura dos componentes cilíndricos, tais como os *risers* que levam a produção do poço petrolífero para a superfície (Nishimoto, 1997).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo pretende apresentar alguns conceitos de mecânica dos fluidos que regem o fenômeno de geração e desprendimentos dos vórtices em corpos rombudos. Como a dinâmica do fluido é alterada pela oscilação do fluido, será dada uma maior ênfase na explicação do fenômeno de VIV em cilindros livres para oscilar.

2.1 Escoamento ao Redor de Corpos Rombudos

A hipótese fundamental da teoria de fluido ideal assume que, numa superfície qualquer no interior do fluido, as ações exercidas nesta superfície consistem somente em ações normais, ou seja, pressão. Em um fluido real, no entanto, além das tensões normais, ocorrem tensões tangenciais. Estas últimas são causadas pela viscosidade. Essa teoria aplicada às linhas de corrente em um fólio fornecia resultados próximos aos experimentais e foi largamente empregada durante os séculos XVIII e XIX. Entretanto, o estudo do problema de escoamento ao redor de um corpo simétrico indicava força de arrasto nula, contrariando fortemente as observações experimentais. Esse resultado ficou conhecido como *Paradoxo de D'Alembert*.

No início do século XX, Prandtl propôs uma solução para essa questão sugerindo que, em uma região estreita próxima à parede do corpo os efeitos da viscosidade fossem significativos. Essa região é conhecida como camada limite. O efeito da viscosidade na camada limite é a condição de aderência, no qual a velocidade do corpo é nula na superfície do corpo.

Com base nessa teoria, o escoamento ao redor de um corpo afilado pode ser dividido em duas regiões distintas: uma é a camada limite, região contígua aos contornos sólidos na qual a ação das forças viscosas é importante, e a outra é aquela na qual a ação da viscosidade é desprezível, prevalecendo o modelo de fluido ideal para o qual é aplicável a teoria do escoamento potencial.

Na presença de um gradiente adverso de pressão, as partículas fluídas tendem a perder energia cinética tanto por esse gradiente quanto pela viscosidade. Quando o sentido da velocidade das partículas fluídas é invertido por ação do gradiente de pressão, ocorre um fenômeno conhecido como separação. À jusante do ponto de separação, o escoamento apresenta baixa pressão, que, combinada com a alta pressão da região de ataque provocada pela estagnação do escoamento nesse ponto, constitui uma importante parcela do arrasto.

Com o descolamento da camada limite, formam-se duas camadas cisalhantes livres que passam a interagir, constituindo assim o principal motivo da geração e desprendimento dos vórtices. Essa interação é fortemente dependente do Número de Reynolds, dado pela Eq.(1).

(1)

onde U é a velocidade do escoamento, D é a dimensão característica do corpo (no caso de um cilindro, seu diâmetro) e ν a viscosidade cinemática do fluido

A dependência da interação das camadas cisalhantes livres com o Número de Reynolds pode ser explicada pelo fato de, com o aumento de Re , a intensidade da turbulência no escoamento também aumenta, o que provoca uma elevação da energia cinética, deslocando para jusante do corpo o ponto de separação da camada limite.

No caso de um corpo rombudo, além destas duas regiões, verifica-se também a existência de uma região de esteira de vórtices bastante pronunciada. Nesta região, que é caracterizada pela existência de pacotes de fluido com vorticidade elevada e de sinais opostos, os vórtices são formados e desprendidos devido à interação das camadas cisalhantes, as quais se formaram devido à separação da camada limite. Essa camada é uma pequena região do fluido próxima à parede na qual os efeitos viscosos são importantes, com a velocidade

do fluido passando de um valor nulo na parede do corpo para o valor do escoamento potencial.

2.2 Formação e desprendimento de vórtices

Um corpo rombudo é definido como sendo aquele que, quando imerso em uma corrente de fluido, gera separação do escoamento e esta ocorre em uma porção considerável de sua superfície.

No caso de um fluido escoando ao redor de um corpo com seção transversal bidimensional, há a formação de duas camadas cisalhantes livres na região imediatamente posterior ao corpo, sendo que estas camadas possuem vorticidade de sinal oposto, constituindo um sistema instável na presença de pequenas perturbações. A interação dessas duas camadas é de natureza não-linear e representam a razão da formação e desprendimento de vórtices atrás do corpo.

No final do século 19, as primeiras investigações científicas sobre o tema, tiveram como objeto de investigação a vibração de um fio submetido a uma corrente de ar, sendo observado que a oscilação ocorria transversalmente ao escoamento. Foi definido, então, um número adimensional que veio a ser conhecido como número de Strouhal (St).

(2)

onde f é a frequência de desprendimento de vórtices (ou frequência de vibração do corpo imerso), L é o comprimento característico do corpo, e U é a velocidade do escoamento.

2.3 Interações hidroelásticas em VIV

O fenômeno de geração e desprendimento de vórtices pode ser alterado de maneira significativa quando o corpo rombudo estiver oscilando ou, equivalentemente, estiver imerso em um escoamento oscilatório. Para um intervalo de amplitude e frequência de oscilação, o movimento do corpo ou o escoamento oscilatório podem controlar os mecanismos de instabilidade que levam ao fenômeno de geração e desprendimento de vórtices.

Existem basicamente duas maneiras distintas de se estudar a influência das oscilações do corpo rombudo sobre o fenômeno de desprendimento de vórtices. A primeira delas procura analisar essa influência através da aplicação de oscilações forçadas em um modelo cilíndrico imerso num fluido, e a segunda procura investigar diretamente os efeitos da oscilação do cilindro montado em base elástica, oscilando em um ou dois graus de liberdade.

O método de oscilações forçadas faz com que os experimentos tenham um número inferior de parâmetros a serem medidos, mas algumas das características observadas em problemas práticos de vibração induzida por vórtices não são reproduzidas. A utilização de um cilindro montado em base elástica nos permite obter evidências diretas das interações não-lineares que ocorrem entre excitação e resposta.

Em oscilações forçadas o efeito do acoplamento pode ocorrer inclusive para faixas de energia negativa, oscilações estas que nunca ocorreriam se o cilindro estivesse montado em base elástica. Neste aspecto, experimentos em base elástica são mais realistas do que aqueles nos quais as oscilações são impostas. No entanto, este método acarreta em um aumento considerável dos parâmetros a serem medidos, complicando de maneira significativa a interpretação dos resultados.

Grande parte das pesquisas para o estudo do fenômeno de VIV foi realizada utilizando um cilindro montado em base elástica livre para oscilar. Com este tipo de aparato, oscilações ocorrem somente para faixas de velocidade reduzida nas quais a energia transferida do fluido para o corpo é positiva e a frequência de desprendimento de vórtices está próxima da frequência natural do sistema ou de um dos seus múltiplos ou submúltiplos.

As Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV, do inglês *Vortex-Induced Vibrations*) são oscilações de natureza auto-excitada e autocontrolada que ocorre em estruturas sob correntes fluidas. Essas vibrações preocupam pela ordem de grandeza das amplitudes alcançadas (no caso de estruturas cilíndricas, próxima de um diâmetro), mas sim pela sua permanência e frequência, capaz de alterar a integridade da estrutura, levando a um precoce quadro de comprometimento por fadiga.

Tais oscilações, que ocorrem em corpos esbeltos, de seção transversal rombuda e imersos em escoamento de fluido, dependem das variações periódicas do campo de pressões nas suas proximidades, originando a emissão alternada de vórtices ao redor do corpo. Sabe-se que essa emissão de vórtices precede as oscilações do corpo, visto que mesmo corpos sem liberdade para oscilar apresentam emissão de esteira de vórtices.

A esteira de vórtices emitidos no escoamento pelo corpo segue um padrão de oscilação, isto é, os vórtices são emitidos em uma frequência constante e bem determinada, que varia com a velocidade do escoamento incidente e com a dimensão característica do corpo (diâmetro, no caso de cilindros). A chamada frequência de emissão de vórtices (f) está relacionada com a razão U/D através de uma constante de proporcionalidade, o número de Strouhal (St), conforme mostra a Eq. (3). Para cilindros circulares infinitos, tem-se que $St = 0,2$.

$$fs = S \frac{U}{D} \quad (3)$$

A modelagem do movimento do cilindro oscilando é dada pela Eq. (4).

(4)

onde m é a massa do cilindro, c é o amortecimento, k é a rigidez do sistema e F é força na direção transversal em relação à corrente.

A resolução da equação fornece a frequência natural de oscilação (f_n) e a frequência amortecida (f_d), dadas pelas Eq. (5) e Eq. (6), respectivamente.

(5)

(6)

O coeficiente de amortecimento crítico ζ é dado pela Eq (7).

(7)

Para cilindros montados em base elástica, as oscilações começam a se tornar apreciáveis quando a frequência de emissão dos vórtices (f_s) se sintoniza com a frequência natural do sistema (f_n). Essa sincronização é conhecida na literatura como *lock-in*.

A Velocidade Reduzida é um parâmetro adimensional o qual é diretamente proporcional com a velocidade do escoamento ao longe (U) e inversamente proporcional ao diâmetro do cilindro (D), conforme mostra a Eq. (8).

(8)

Na sincronização, a frequência de desprendimento de vórtices é capturada pela frequência de oscilação da estrutura. Isso ocorre numa região de velocidade de Vr compreendida entre 4 e 12, sendo que as maiores amplitudes de oscilação acontecem quando a velocidade reduzida é próxima a 5. Essa faixa de Vr representa um importante ponto de estudos.

A amplitude de oscilação do cilindro sujeito ao VIV é dominada por dois fatores, o coeficiente de massa reduzida (m^*), definido como a razão entre a massa oscilante do sistema (m) e a massa de fluido deslocada (m_d), conforme a mostra Eq. (9), e o coeficiente de amortecimento crítico estrutural (ζ). Quanto menor o parâmetro de massa-amortecimento, definido como o produto $m^* \cdot \zeta$, maiores são as amplitudes de oscilação. Assim, para garantir a melhor visualização da interação fluido-estrutura, o parâmetro $m^* \cdot \zeta$ deverá ser o mais baixo possível, a fim de garantir uma melhor simulação da realidade, dado que esse parâmetro em *risers* é extremamente baixo.

(9)

2.4 Acoplamento Modal

Neste texto, enfatiza-se a importância dos ensaios realizados com modelos reduzidos como forma de validação das soluções numéricas obtidas. Muitas das perguntas levantadas serão solucionadas através de simulações realizadas pelo grupo de CFD, mas estas simulações apenas serão possíveis devido aos experimentos realizados no Canal de Água Circulante.

Este trabalho consiste na monitoração da deformação de um modelo flexível, ensaiado em água. A opção por esta configuração se deve a sua maior semelhança com os reais desenvolvimentos tecnológicos, especialmente aqueles referentes à operação *offshore*, na qual corpos muito esbeltos e de considerável flexibilidade são responsáveis pela prospecção e produção de petróleo em grandes

profundidades. É importante destacar a implicação prática deste estudo para aplicações tecnológicas.

Atualmente a operação *offshore* é rica em estruturas cilíndricas bastante esbeltas, responsáveis pela união dos poços localizados no leito do oceano às unidades de produção da superfície do mar. Geralmente, são estruturas lançadas em configuração de catenária, cuja rigidez flexional é essencialmente geométrica devida à tração que varia com a profundidade e, conseqüentemente, com o peso próprio, como mostra a Fig. 2. A curvatura se dá, essencialmente, no plano vertical.

Por outro lado, no plano do escoamento, a própria geometria da catenária impõe condição absolutamente distinta aos modos de vibrar, marcada por menores raios de curvatura junto ao leito do oceano e por uma provável proximidade entre frequências naturais dos modos longitudinais de maior ordem.

Espera-se, portanto, um rico pacote de frequências e seus sub-harmônicos intercalados, passíveis de simultânea excitação pelo fenômeno de VIV, não sendo raras as situações nas quais um modo natural transversal tenha um sub-harmônico exatamente em uma das frequências naturais de um modo longitudinal ao escoamento.

Desta forma, percebe-se que, tão importante quanto estudar o acoplamento modal em um mesmo plano, o acoplamento entre modos contidos em planos ortogonais merece igual atenção, haja vista a sua potencial relação com a possibilidade de oscilações acopladas de grande amplitude perdurarem por faixas maiores de velocidades.

Apesar disto, este trabalho tratará apenas das vibrações ocorridas no sentido transversal ao escoamento, devido às limitações impostas pelas características construtivas do modelo. Assim não será possível observar o acoplamento modal

entre dois planos ortogonais, o que não impede que este projeto sirva de base para futuros trabalhos de aprofundamento no assunto.

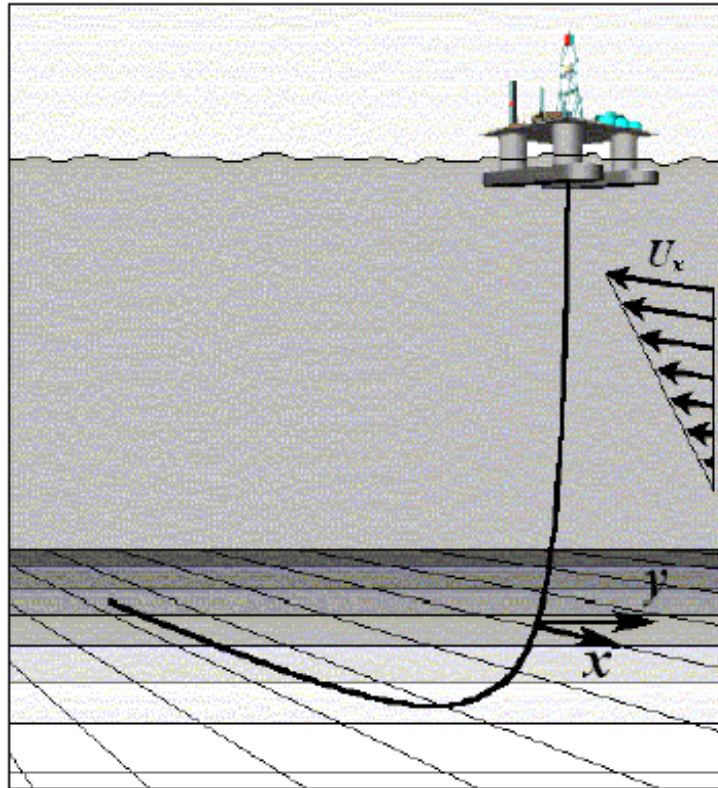


Figura 2. Ilustração de uma configuração típica de lançamento em catenária. Detalhe das Direções Principais de Vibração Induzida pela Emissão de Vórtices: direção do escoamento (x) e direção transversal ao escoamento (y).

2.5 Canal de Água Circulante

Uma importante ferramenta para a realização de estudos experimentais é o Canal de Água Circulante, criado pelo Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF) do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP.

O canal consiste num circuito horizontal fechado por onde a água circula a velocidade uniforme de até 1 m/s, podendo, entre outras aplicações, simular as

condições ambientais em alto mar, de modo a investigar, experimentalmente, vibrações induzidas por geração e desprendimento de vórtices em *risers* e oleodutos.

A secção de testes, cujas dimensões são de $700 \times 900 \times 7500 \text{ mm}$, é aberta, não possuindo cobertura na face superior da secção. Nessa região está localizada uma mesa de deslocamentos (*traverse system*), na qual são posicionados os modelos e a instrumentação utilizada. A confecção desta secção com paredes transparentes permite a visualização do escoamento e medições com PIV por todas as direções.



Figura 3. Canal de Água Circulante do NDF.

A escolha da água como fluido de trabalho permite uma melhor análise dos fenômenos que possuem forte influência da inércia adicional causada pela massa de fluido deslocada. Este é o caso do fenômeno das vibrações induzidas por vórtices.

Os dados obtidos experimentalmente serão utilizados para uma validação precisa dos códigos computacionais desenvolvidos pela seção de CFD. Além

disto, os resultados poderão também ser utilizados diretamente pela seção de Modelos Analíticos e Estabilidade Hidrodinâmica do projeto temático.

3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Para a obtenção dos resultados provenientes da realização dos experimentos citados anteriormente, os cilindros deverão ser instrumentados com dispositivos capazes de medir as deformações mecânicas advindas de carregamentos a flexão. Neste texto serão apresentados três técnicas de monitoração de deformação, sendo um utilizando extensômetros de resistência elétrica, um empregando sensores a fibra óptica, e outro usando a Transformada de Hough na detecção de circunferências.

3.1 Extensômetros de Resistência Elétrica

Os extensômetros elétricos sofreram grandes evoluções ao longo das últimas décadas e são baseados na mudança de impedância proporcional à tensão aplicada. A medição da mudança de resistência elétrica é o método mais utilizado comercialmente, devido a sua precisão, a sua facilidade de aplicação em diferentes superfícies e a fácil associação a outros equipamentos eletrônicos.

Composto por filamentos condutores, os extensômetros de resistência elétrica (ERE) acompanham a superfície da estrutura na qual estão fixados. Esses sensores são baseados no princípio que a resistência elétrica de um condutor depende do seu formato. Para um condutor de seção reta uniforme, ela é dada pela equação:

(10)

onde R é a resistência (dada em Ω), L é comprimento do condutor (em m), A é a área de seção reta (em m^2) e ρ é a resistividade (em $\Omega.m$), que depende do material do condutor.

Se um condutor é deformado elasticamente, resultando num aumento de comprimento e numa diminuição de área de seção reta, podemos verificar através

da equação acima que os dois efeitos contribuem para um aumento da resistência do condutor, enquanto que a resistividade permanece constante.

A grande vantagem da utilização de extensômetros no estudo dos modos naturais é o seu baixo custo, o que faz dessa técnica a mais empregada em diversos sistemas nos quais se deseja medir deformações. Sua principal desvantagem é a dificuldade de manuseio quando se tem vários extensômetros instalados num mesmo modelo, devido ao par de fios necessários por sensor.

3.2 Sensores em Fibra Óptica

A fibra óptica é um fio de material dielétrico que consegue prender radiação óptica em uma extremidade e guiá-la até a outra. Esta energia é mantida no núcleo por reflexão na superfície da fronteira, onde a casca e o núcleo se encontram. Além das fibras, outros componentes são necessários para completar o sistema, como os complementos passivos (conectores e acopladores) e os complementos ativos (lasers, LEDs e detectores).

O sensor mais comum utilizando fibras ópticas é baseado em redes de Bragg (FBG – *fiber Bragg gratings*), uma tecnologia desenvolvida originalmente para multiplexar sinais em comunicações ópticas. Os sensores FBG funcionam como pequenos espelhos altamente seletivos, distribuídos ao longo da fibra, refletindo apenas os comprimentos de onda que satisfaçam a condição de Bragg. Essas reflexões se devem às mudanças periódicas do índice de refração do núcleo da fibra.

Para um específico comprimento de onda, uma reflexão considerável pode resultar da adição coerente de pequenas reflexões de espelhos fracamente refletoras, espaçados de um múltiplo de meio comprimento de onda ($m = 2L$). Os outros comprimentos de onda passarão pela FBG sem prejuízo do sinal, como mostra a Fig. 4. O período espacial de modulação Λ e o comprimento total da rede

determinam quais comprimentos de onda terão maior, menor ou nenhuma reflexão.

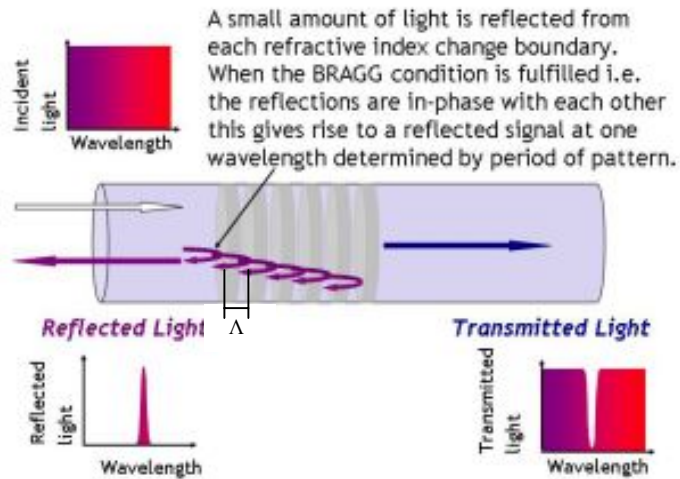


Figura 4. Rede de Bragg e os espectros de transmissão e reflexão.

O espectro de reflexão de sensor FBG tem sempre seu valor máximo quando determinado comprimento de onda respeita a condição de Bragg para incidência normal

$$(11)$$

onde λ_m é o comprimento de luz refletido de ordem m , n é o índice de refração da fibra e Λ é o período espacial da fibra. Para a maioria das aplicações utiliza-se $m = 1$.

Pela equação, percebe-se que qualquer mudança de Λ ou n levará a uma mudança correspondente de λ_m . Ou seja, qualquer deformação mecânica ou mudança do índice de refração devido à temperatura, acarretará em uma mudança na posição espectral da reflexão de uma rede de Bragg, como exemplificado na Fig. 5.

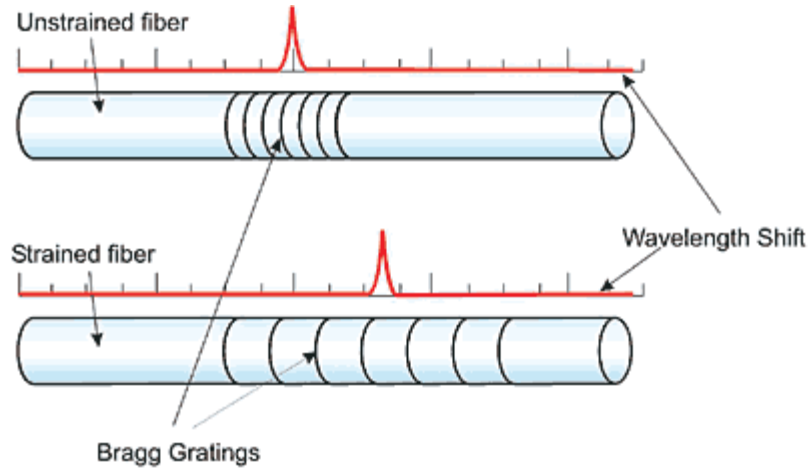


Figura 5. Mudança da posição espectral devido à temperatura ou deformação mecânica.

Esta mudança é regida pela seguinte equação

(12)

onde l é o comprimento de rede e T , a temperatura.

Nesta equação, o primeiro termo do lado direito representa o efeito da deformação sobre a rede e também pode ser expresso como

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m \cdot (1 - p) \cdot \varepsilon \quad (13)$$

onde ε é a deformação e p é a constante foto-elástica da fibra, que vale aproximadamente 0,22.

O segundo termo da equação representa o efeito da temperatura sobre a rede e também pode ser escrito como

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m \cdot (\alpha + \zeta) \cdot \Delta T \quad (14)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica da fibra (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6}$ para sílica e ζ representa o coeficiente termo-óptico e vale aproximadamente $8,6 \times 10^{-6}$ para a fibra de sílica dopada com germânio).

O princípio básico usado em sistemas de sensores FBG é a monitoração do deslocamento do comprimento de onda do sinal que retorna da rede de Bragg e relacionar estas mudanças com os parâmetros que se desejam medir (deslocamento, no caso deste projeto). Não estando estes parâmetros relacionados com a potência de luz detectada, impede-se que eventuais perdas na transmissão ao longo da fibra gerem erros de medida. Estes sensores podem ser introduzidos em estruturas (ditas inteligentes) de diversos materiais durante a fabricação, permitindo um monitoramento constante e remoto de suas alterações.

A natureza da resposta das redes de Bragg faz com que estes sensores tenham uma capacidade de auto-referência. Como as informações dos sensores estão diretamente ligadas ao comprimento de onda, que é um parâmetro absoluto, a saída não depende diretamente dos níveis de intensidade de luz, perdas nos conectores e acopladores ou potência da fonte. Esta natureza facilita também a multiplexação, fazendo com que cada sensor fique associado a uma faixa disponível do espectro (WDM) ou a um intervalo de tempo diferente para a transmissão de um grupo de dados (TDM). Isto possibilita sensores densamente multiplexados (também chamados de quase distribuídos) de deformação, associando cada faixa do espectro ou cada intervalo de tempo a uma localização espacial. Com as redes atuais é possível multiplexar cerca de 200 sistemas ao longo de uma única fibra, posicionados conforme a necessidade de precisão.

Além da fibra, são necessários para a realização das medidas uma fonte luminosa e um detector de banda larga. Uma configuração simples e eficaz combina uma fonte de luz branca do tipo ASE (*amplified-spontaneous emission*) com um analisador de espectro óptico (OSA), dispostos conforme a Fig. 6.

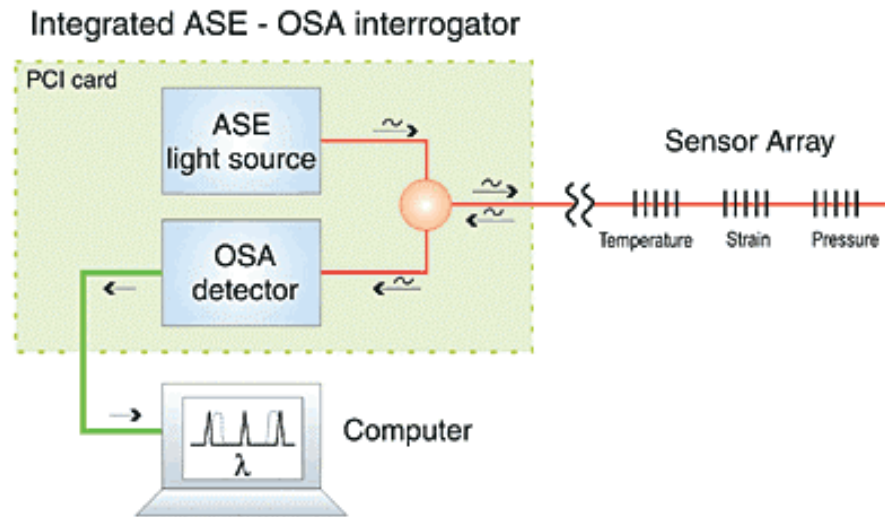


Figura 6. Circuito Óptico usando uma fonte ASE e detector OSA.

A luz emitida pela fonte viaja até a rede de Bragg e apenas uma pequena faixa do espectro retorna, através da fibra, para o detector OSA, que converte a luz recebida em sinais elétricos. Esses sinais são tratados através de um software adequado, que calcula as deformações através das variações do comprimento de onda do pico de cada espectro, e utilizando a constante foto-elástica da fibra podem-se relacionar estas variações com as deformações longitudinais conforme a Eq. (13).

3.3 Sistema de Detecção de Circunferências

Esta seção tem como objetivo apresentar a técnica de localização de objetos circulares em uma imagem através da Transformada de Hough. Esse método foi desenvolvido por Paul Hough nos anos 60 e patenteada pela IBM. Técnicas baseadas nessa transformada tem sido aplicadas na solução de problemas envolvendo a detecção e o reconhecimento de formas geométricas em imagens digitais, tendo ampla abrangência em diversas áreas, desde astronomia até na medicina.

A Transformada de Hough (HT) é um método utilizado para detectar figuras fáceis de se parametrizar, como linhas, círculos e elipses, em imagens computacionais. Seu princípio básico consiste em obter, através das transformações do gradiente e da limiarização, os pontos de uma imagem, após um pré-processamento da imagem. A idéia é aplicar na imagem uma transformação tal que todos os pontos pertencentes a uma mesma curva sejam mapeados num único ponto de um novo espaço de parametrização da curva procurada, conforme mostra a Fig. 7.

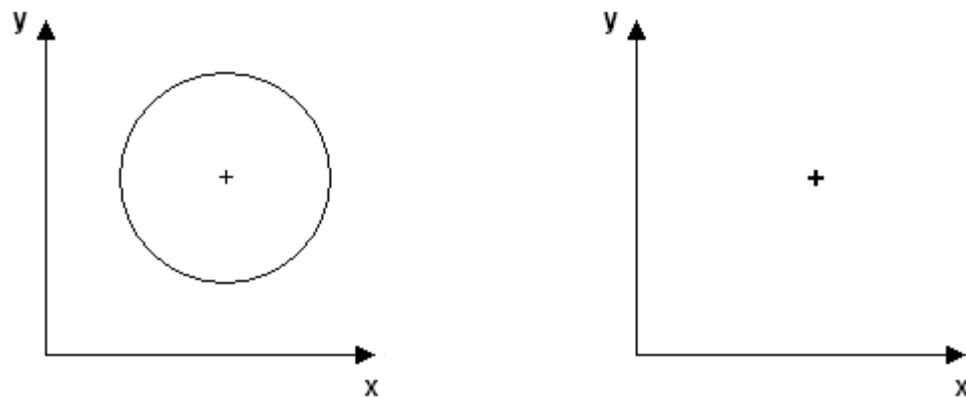


Figura 7. Uma curva parametrizada no espaço x-y sofre a Transformada de Hough e passa a ser mapeada em um único ponto.

Sua vantagem se dá no fato de que ela pode ser aplicada ao tratamento de qualquer tipo de curva, apresentando muita eficiência em imagens com muito ruídos. No entanto, se uma curva é mais complexa, isto é, com um maior número de parâmetros, o esforço computacional exigido é bem maior.

O problema da detecção de circunferências com raio fixo consiste em determinar quais os pontos de uma imagem pertencem a uma mesma circunferência de raio r . Ou seja, tem-se um conjunto de coordenadas $(x; y)$ e pretende-se encontrar valores possíveis para os parâmetros $(x_c; y_c)$, correspondentes aos pontos centrais de circunferências. Para isso, constrói-se um

espaço de Hough, que para o caso específico, pode ser visto como uma matriz com a mesma dimensão da imagem digital, em que as colunas e linhas representam, respectivamente, os possíveis valores de x_c e y_c . Cada célula dessa matriz recebe, inicialmente, o valor zero, e para cada ponto $(x; y)$ da imagem, incrementa-se no espaço de Hough, todas as células $(x_c; y_c)$ representando centros de circunferências, de raio r , que passam por $(x; y)$. Ao final, as células contendo os valores mais altos indicarão os centros “mais prováveis” de circunferências.

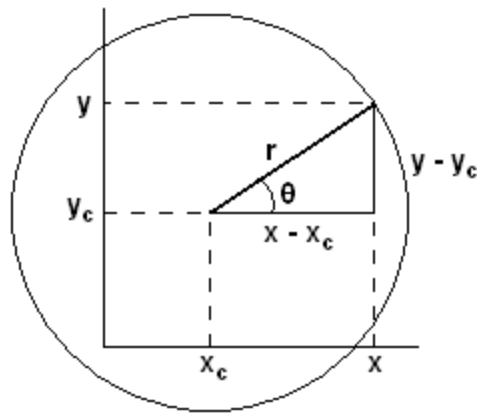


Figura 8. Circunferência de raio r e centro $(x_c; y_c)$.

Para calcular todos os valores de $(x_c; y_c)$ para um determinado ponto $(x; y)$, geralmente não se utiliza a Eq. (14), pois sua parametrização em função de x_c e y_c não produz, diretamente, implementações eficientes.

$$r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \quad (14)$$

A fórmula mais utilizada é baseada em uma representação em coordenadas polares. É fácil perceber, através da Fig. 7, e utilizando conceitos elementares de trigonometria, que as duas equações seguintes são válidas:

$$x_c = x - r * \cos(\theta) \quad (15)$$

$$y_c = y - r * \sin(\theta) \quad (16)$$

Algoritmo 1. Criação do espaço de Hough.

entrada: Matriz I , $n \times m$, representando a imagem binarizada.

saída: Matriz H , com o mesmo tamanho da imagem, representando o espaço de Hough.

```
1: para  $x = 0$  até  $n$  faça
2:     para  $y = 0$  até  $m$  faça
3:         se  $I(x; y) = 255$  então
4:             para  $\theta = 0$  até  $2 * \pi$  faça
5:                  $x_c = x - r * \cos(\theta)$ 
6:                  $y_c = y - r * \sin(\theta)$ 
7:                  $H(x_c; y_c) = H(x_c; y_c) + 1$ 
8:             fim para
9:         fim se
10:    fim para
11: fim para
```

O algoritmo 1 mostra como um espaço de Hough, H , pode ser criado a partir de uma imagem digital, I . Depois que o espaço é criado, a detecção de circunferências passa a ser um problema simples de se encontrar pontos de máximo no espaço de Hough. É importante notar que o conceito de transformada de Hough aplica-se somente quando é possível se distinguir, na imagem original, os pontos pertencentes ao contorno, ou borda, dos objetos. O algoritmo 1 assume então que imagem é previamente processada através de um filtro de detecção de borda e de um filtro de binarização (que “marca” os pixels pertencentes a uma borda com o valor 255, e todos os outros com o valor 0).

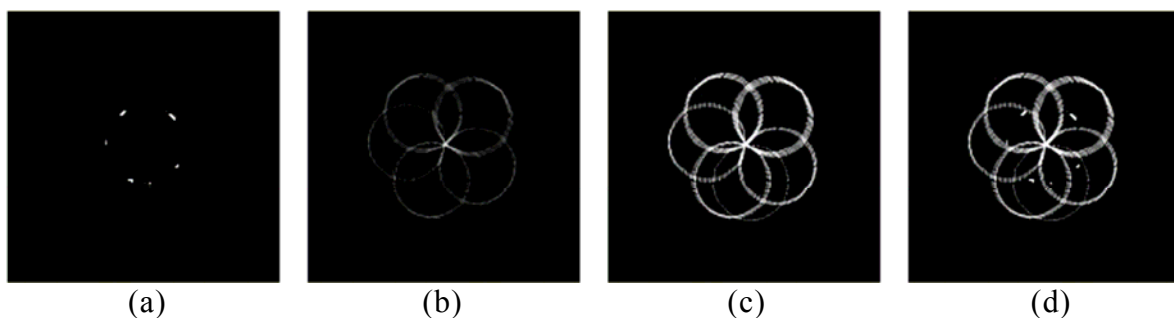


Figura 9. (a) Exemplo de uma imagem, (b) seu respectivo espaço de Hough, (c) o mesmo espaço de Hough com ajuste de contraste para facilitar a visualização e (d) uma imagem composta pela adição da imagem original com o espaço de Hough (Pistori et al, 2005).

Na Figura 9 (b) é apresentado o espaço de Hough através de uma imagem em tons de cinza, em que o brilho é diretamente proporcional ao valor acumulado em cada célula da matriz. Esse espaço de Hough corresponde à imagem contendo uma circunferência altamente corrompida, mostrada na Figura 9 (a). O espaço de Hough é apresentado também através da Figura 9 (c), em que o contraste foi realçado para facilitar a visualização das células do espaço de Hough com valores diferentes de zero. O espaço de Hough foi construído para um valor de raio igual ao raio da circunferência da imagem original. Nota-se que o valor máximo (mais claro) desse espaço coincide com o centro da circunferência presente na imagem. As outras circunferências no espaço de Hough correspondem aos centros das possíveis circunferências passando por cada um dos pontos da imagem original. Esse efeito destaca-se mais na imagem que combina o espaço de Hough com a imagem original.

A Fig. 9 ilustra também a influência da discretização na aplicação da transformada de Hough. Como os pontos da imagem representam apenas uma aproximação discreta de uma circunferência real, e o próprio espaço de Hough armazena apenas aproximações discretas para os possíveis centros $(x_c; y_c)$, não é possível obter resultados exatos utilizando esta técnica diretamente. O método, no

entanto, é bastante robusto em relação a diversos tipos de ruído, comuns no processamento digital de imagens. A Fig. 10 mostra um esquema de como a imagem pode ser captada no caso de circunferências pintadas na superfície de um modelo cilíndrico.

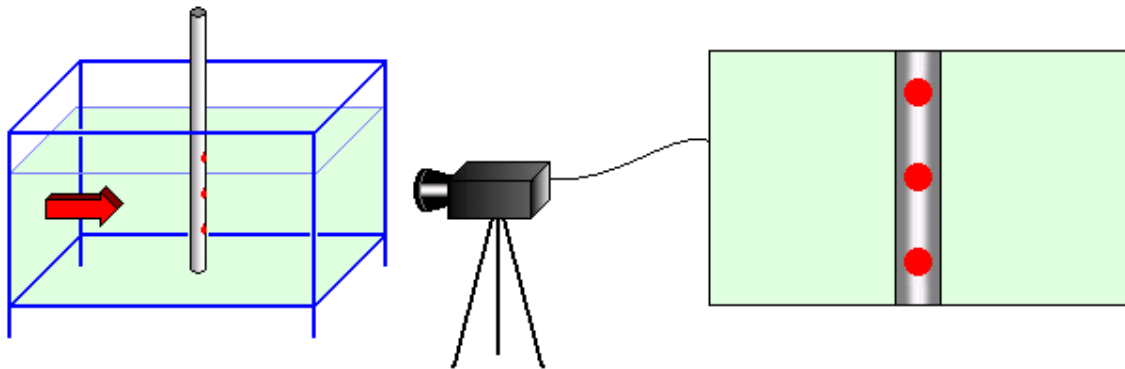


Figura 10. Esquema de captura de imagem para um modelo cilíndrico.

A extensão da técnica descrita acima, para outras figuras geométricas, é relativamente simples, e envolve a determinação de equações paramétricas para representar a figura que se deseja detectar. A quantidade de parâmetros determina a dimensão do espaço de Hough. Para aplicar a técnica na detecção de circunferências com raio arbitrário, por exemplo, seria necessária uma matriz de três dimensões $(x_c; y_c; r)$.

4. MÉTODOS E ANÁLISES

Aqui serão apresentados os parâmetros necessários para o dimensionamento do modelo cilíndrico a ser utilizado.

4.1 Determinação da Freqüência de Emissão de Vórtices

Já foi mencionado no início deste trabalho o fenômeno conhecido por *lock-in*. Isso ocorre quando a freqüência de emissão de vórtices, f_s , aumenta até que se sincronize com uma das freqüências naturais do corpo, f_n , permanecendo nesta condição por uma larga faixa de velocidade.

A freqüência de emissão está relacionada com a razão U/D através de uma constante de proporcionalidade, o número de Strouhal (St), conforme mostra a Eq. (17). Para cilindros circulares infinitos, tem-se que $St = 0,2$.

$$f_s = S \frac{U}{D} \quad (17)$$

De maneira a avaliar as diversas configurações, foi montada a Tab. (1) para diferentes velocidades U , limitadas pelo canal, e os possíveis diâmetros D do modelo. Apesar da capacidade do canal de atingir 1,0 m/s, foi limitada a velocidade de operação a fim de se evitar problemas de cavitação da bomba.

Tabela 1. Valores da frequência de desprendimento de vórtices, em Hz, para diferentes valores de velocidade do escoamento e diâmetro do cilindro.

	Diâmetro do cilindro (mm)					
U (m/s)	10	15	20	25	30	35
0,1	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67	0,57
0,2	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14
0,3	6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71
0,4	8,00	5,33	4,00	3,20	2,67	2,29
0,5	10,00	6,67	5,00	4,00	3,33	2,86
0,6	12,00	8,00	6,00	4,80	4,00	3,43
0,7	14,00	9,33	7,00	5,60	4,67	4,00

4.2 Caracterização do Modelo

Com o objetivo de se conseguir maiores frequência de emissão, fica definido o diâmetro do cilindro como sendo $D = 10$ mm. Seu comprimento será $L = 1,0$ m, respeitando a dimensões do canal.

Para a construção do modelo, algumas considerações devem ser feitas, sendo elas a viabilidade construtiva e a necessidade de se ter uma geometria uniforme e bem conhecida ao longo de todo o seu comprimento.

Será necessário criar uma estrutura que possua uma assimetria de modo que as frequências naturais no plano longitudinal ao escoamento (direção de maior rigidez flexional) interfiram muito pouco nas frequências no plano transversal.

O arranjo estrutural do modelo é composto de uma barra metálica, com seção de $6,0 \times 0,25$ mm, envolto por cobertura cilíndrica moldada em elastômero. Na barra interna será colada a fibra óptica pré-tensionada, conforme mostra a Fig. 11.

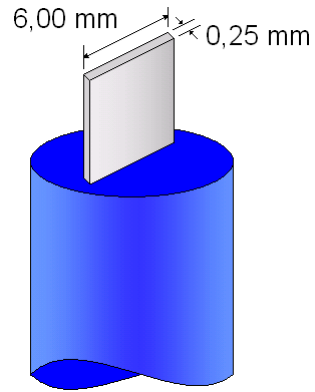


Figura 11. Detalhe da seção transversal da barra interna do modelo.

Da teoria de mecânica dos sólidos, pode-se determinar as frequências naturais de uma viga engastada em balanço, como mostra a Eq. 7.

(18)

onde EI é a rigidez flexional, m é a massa por unidade de comprimento e L é o comprimento. A Fig. 12 representa fisicamente os modos naturais de uma barra em balanço.

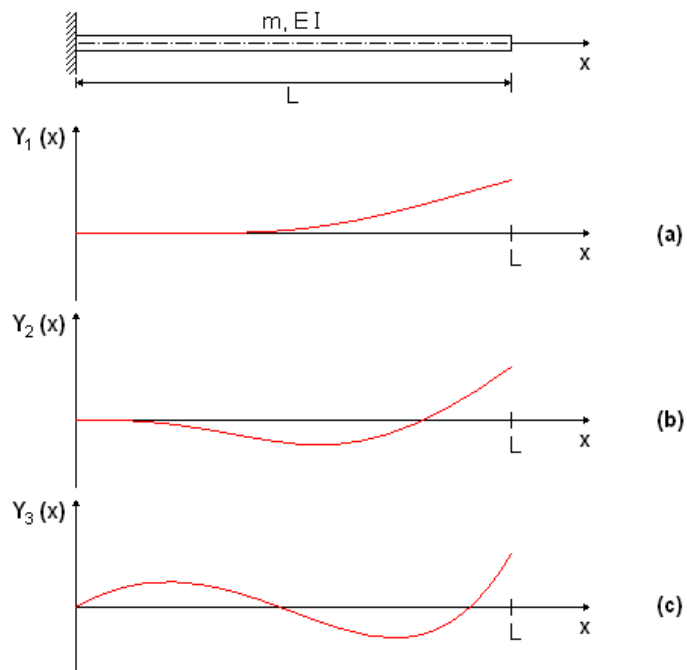


Figura 12. Esquema físico dos modos naturais de vibração para uma barra engastada em balanço.

Para a confecção da barra interna foi escolhido o aço SAE 1080, com módulo de elasticidade $E = 205 \text{ GPa}$ e massa específica $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$. As frequências naturais obtidas são apresentadas pela Tab (2). A rigidez flexional proporcionada pelo elastômero é muito pequena se comparada com a estrutura metálica interna.

Tabela 2. Valores do coeficiente modal para cada modo natural e os resultados para as frequências naturais (em Hz) utilizando aço SAE 1080.

	α_n	Frequência (Hz)
1º Modo	1,875	2,02
2º Modo	4,694	12,68
3º Modo	7,855	35,51

Observando a Tab. (1), tem-se que a maior frequência de emissão é de 14,0 Hz, para um diâmetro $D = 10$ mm e velocidade do escoamento $U = 0,7$ m/s. Comparando esse valor com a Tab. (2), observa-se que o maior modo natural que se consegue atingir é o segundo, $f_n = 12,68$ Hz. Dessa maneira, serão necessários no mínimo 3 sensores distribuídos pelo modelo, de maneira a se obter experimentalmente o modo natural no qual o modelo vai vibrar.

5. CONCLUSÕES

O conhecimento adquirido ao longo deste projeto foi bastante interessante, sendo estudado conceitos de sensores a fibra óptica e da Transformada de Hough, temas que não é visto ao longo do curso de engenharia mecânica. A aplicação dessas técnicas a um assunto que mescla dinâmica dos fluidos com mecânica dos sólidos representou um andamento satisfatório.

O propósito deste estudo foi o aplicar algumas técnicas para monitorar deformações em um cilindro flexível. A idéia era munir o canal de água circulante do NDF – EPUSP com equipamentos e metodologias úteis para investigar experimentalmente os acoplamentos de modos naturais de vibração em modelos cilíndricos. Os conhecimentos teóricos aqui adquiridos serão aproveitados, na prática, por outros trabalhos num futuro próximo, devido ao interesse do NDF em implantar um sistema eficiente e de bom custo-benefício para estudar os modos de vibração.

As técnicas aqui apresentadas são adequadas para ensaios de deformações em modelos simulados no Canal de Água Circulante do NDF, tendo cada uma delas suas vantagens e desvantagens. Para ensaios em laboratório, o emprego de extensômetros elétricos apresenta um ótimo custo-benefício, mas não fornece resultados muito precisos em casos cujo modelo atinge modos naturais de grande ordem, além de interferir nas propriedades estruturais do modelo.

Os sensores FBG podem ser aplicados tanto em modelos de 1 m de comprimento como em *risers* com 2 000 m, pois as informações não são perdidas ao longo da fibra. O custo de todo aparato para a utilização dessa técnica ainda é muito caro para ser instalado no Canal de Água Circulante, podendo ser feita uma parceria com empresas de petróleo, como a Petrobrás, para que um *riser* possa ser instrumentado. Os valores experimentais obtidos com essa estrutura poderiam ser tratados e analisados pelo grupo experimental do NDF, servindo para validar os

resultados conseguidos pelas equipes de CFD, estabilidade hidrodinâmica e realidade virtual, presentes no NDF.

O sistema de detecção de circunferências ainda precisa ser adaptado e aprimorado para ser aplicado de maneira satisfatória para detecção de pequenas deformações em modelos cilíndricos. Essa técnica ainda não foi usada para essa finalidade, sendo necessário desenvolver uma metodologia de preparação do experimento, bem como do processamento dos dados obtidos.

6. BIBLIOGRAFIA

Anagnostopoulos, P., Bearman, P.W., *Response Characteristics of a Vortex-Excited Cylinder at Low Reynolds Number*; J.Fluids And Structures, Vol 6, Pp39-50, 1992.

Auada, R.B., Meneghini, J.R. *Unstructured Mesh Generation: Quality Enhancement Through Smoothing*; Sixth Latin American Congress Of Heat And Mass Transfer/Latcym-96.

Cozens, P. *Numerical Modelling of the Roll Damping of Ships Due to Vortex Shedding*; Phd Thesis, Imperial College, 1987.

Fujarra, A.L.C. *Estudos Experimentais e Analíticos das Vibrações Induzidas pela Emissão de Vórtices em Cilindros Flexíveis e Rígidos*; Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, 2002.

Graham, J.M.R. *Computation of Viscous Separated Flow Using a Particle Method*; Numerical Methods in Fluid Mechanics, Vol 3, 1988.

Graham, J.M.R., Djahansouzi, B. See Bbaa2 , 1993.

Jim, W., Zhou, Y., Chan, P.K.C., Xu, H.G. *A Fibre-Optic Grating Sensor for the Study of Flow-Induced Vibrations*; Sensors and Actuators 79 (2000): 36-45.

Khalak, A., Williamson, C. H. K.; *Motions, Forces and Mode Transition in Vortex-Induced Vibrations at Low Mass-Damping*; Journal of Fluids and Structures 13 (1999): 813-851

Meneghini, J.R. *Projetos de Pesquisa no Tópico Geração e Desprendimento de Vórtices no escoamento ao Redor de Cilindros*; Livre Docência; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo; 2002.

Meneghini, J.R., Bearman, P.W. *Numerical Simulation of Control of Bluff Body Flow Using a Discrete Vortex Method Incorporating Viscous Diffusion*; Proc Iutam Sym On Bluff Body Wakes, Dynamics And Instabilities, Gottingen, 1992.

Meneghini, J.R., Bearman, P.W. *Numerical Simulation of High Amplitude Oscillatory Flow About a Circular Cylinder Using a Discrete Vortex Method*; Aiaa Paper 93-3288, 1993.

Meneghini, J.R., Bearman, P.W. *Numerical Simulation of High Amplitude Oscillatory Flow About a Circular Cylinder*; Journal of Fluids and Structures, Academic Press, Vol.9, Pp. 435-455, 1995.

Meneghini, J.R., Bearman, P.W. *An Investigation of the Effect on Vortex Shedding of a Sudden Transverse Disturbance Applied to a Circular Cylinder*; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 69-71, Pp. 229-238, 1997.

Meneghini, J.R., Siqueira, C.L.R., Bearman, P.W. *Numerical Simulation of the Effect of Wave Form and Sudden Transverse Displacement on Vortex Shedding from a Circular Cylinder*; American Institute of Aeronautics and Astronautics Aiaa Paper 97-2006, Pp. 1-12, 1997.

Pesce, C.P., Fuarra, A.L.C. *Vortex-Induced Vibrations and Jumping Phenomenon: an Experimental Investigation With a Clamped Flexible Cylinder in Water*; Int. J. of Offshore and Polar Engineering: March, 2000.

Pistori, H., Pistori, J., Costa, E.R., *Hough-Circles: Um Módulo de Detecção de Circunferências para o ImageJ*; Universidade Católica Dom Bosco; Campo Grande; 2005.

Proceedings of a Workshop on Marine Riser Mechanics, Ann Arbor, Michigan, Sept 1992, Ed M.M.Bernitsas.

Proceedings of the 1st Int Sym on Computational Wind Engineering, Tokyo, August, 1992, Ed S.Murakami.

Saltara, F., Meneghini, J.R., Bearman, P.W. *Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder*; Computational Methods and Experimental Measurements Viii, Ed. P. Anagnostopoulos Et Al., Computational Mechanics Publications, Uk, Pp. 409-418, 1997.

Saltara, F., Meneghini, J.R., Siqueira, C.L.R. *The Simulation of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder*; em co-autoria com C. L. R. Siqueira, E F. Saltara, publicado nos Proceedings of the Eight (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference-Isope-98, Volume III, Pp.356-363, Montreal, Canada, May 24-29, 1998a.

Saltara, F., Meneghini, J.R., Siqueira, C.L.R. *The Simulation of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder with Turbulence Modelling*; Em co-autoria com F. Saltara E C. Siqueira, publicado nos Proceedings of Fedsm 98, 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, June 21-25, 1998, Washington, D.C., 1998b.

Siqueira, C.L.R., Meneghini, J.R., Saltara, F. *Numerical Simulation of a Fixed and an Oscillating Circular Cylinder in Oscillatory Flow*; Em co-autoria com C. L. R. Siqueira, E F. Saltara, publicado nos Proceedings of the Eight (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference-Isope-98 , Volume III, Pp.364-371, Montreal, Canada, May 24-29, 1998a.

Siqueira, C.L.R., Meneghini, J.R., Saltara, F. *An Investigation of Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Water*; Em co-autoria com A. Fujarra, C. P. Pesce, E P. Parra, publicado nos Proceedings of Fedsm 98, 1998

ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, June 21-25, Washington, D.C., 1998b.

Stansby, P.K., Slaouti, A. *Idealised Investigation of Dynamic Response of Single and Multiple Cylinders in Oscillatory Flow Using the Vortex Method*; Final Report to the Bofcos, Programme, 1993 (to be published).

Summer, D., Price, S.J., Païdoussis, M.P. *Investigation of Side-By-Side Circular Cylinders in Steady-Flow by Particule Image Velocimetry*; 1998 Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibration, ASME Summer Meeting, Washington, DC, 1998.

Du, W., Tao, X.M., Tam, H.Y., Choy, C.L. *Fundamentals and Applications of Optical Fiber Bragg Grating Sensors to Textile Structural Composites*; Composite Structures 42 (1998) 217-229.

Yeung, R. W., Sphaier, S.H., Vaidhyanathan, M. *Unsteady Flow about Bluff Cylinders*; International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 3, No.2, June 1993.

Zhou, Y., So, R.M.C., Jim, W., Xu, H.G., Chan, P.K.C. *Dynamic Strain Measurements of a Circular Cylinder in a Cross Flow Using a Fibre Bragg Grating Sensor*; Experiments in Fluids 27 (1999) 359-367.

Zdravkovich, M.M., *The Effects of Interference Between Circular Cylinders in Cross Flow*; Journal of Fluids and Structures, V. 1,