

UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Cesar Monzu Freire

cesar.freire@poli.usp.br

Julio R. Meneghini

jmeneg@usp.br

Resumo. *O desprendimento de vórtices pode ocorrer quando um cilindro encontra-se imerso em um escoamento. Em função de suas condições estruturais e das características do escoamento, o cilindro pode oscilar. A interação entre a emissão alternada de vórtices e a oscilação do cilindro é denominada Vibração Induzida por Vórtices (VIV). Há extensa literatura sobre VIV, mas muitas dúvidas ainda não foram esclarecidas. A principal técnica de estudo deste fenômeno considera apenas um grau de liberdade, transversal ao escoamento, para a oscilação do cilindro. O presente trabalho apresenta uma abordagem de estudos experimentais, que considera a influência do segundo grau de liberdade, na direção do escoamento. O autor demonstra, antes dos resultados referentes ao fenômeno de VIV com dois graus de liberdade, sua metodologia de pesquisa, que envolve o estudo de cada sensor e método de análise. Os ensaios de VIV são realizados na base elástica de dois graus de liberdade, desenvolvida pelo autor, como sua Iniciação Científica. Esta base possui baixos valores de massa e amortecimento estrutural.*

Palavras Chave: *desprendimento de vórtices, vibração induzida por vórtices, amortecimento estrutural, dinâmica dos fluidos experimental*

1. Introdução

Quando um corpo está imerso em um escoamento, forças hidrodinâmicas agem sobre ele. A maneira como este corpo reage a tais forças é função de características mecânicas do corpo, tais como sua massa, frequências naturais, modos de vibrar e coeficiente de amortecimento. Um dos fenômenos provenientes da interação fluido-estrutura é o fenômeno de Vibração Induzida por Vórtices (VIV). Neste fenômeno os vórtices gerados pela interação do fluido com a estrutura são responsáveis pela flutuação do campo de pressão ao redor da estrutura. Para valores da frequência de desprendimento de vórtices próximos ao valor da frequência natural de vibração da estrutura haverá um acoplamento entre o movimento do corpo e a geração de vórtices.

O fenômeno de VIV é importante em áreas onde a influência do escoamento externo ao redor de estruturas pode influenciar em seu comportamento. Dentre essas áreas se destaca a indústria *offshore* com o problema da extração de petróleo do leito marinho. Tal extração é feita por tubos, denominados *risers*, que ligam o fundo do mar às plataformas flutuantes. O escoamento causado pelas correntes marítimas interage com os *risers* fazendo-os vibrar. É importante conhecer o fenômeno de VIV para evitar a degeneração acelerada, causada pela fadiga, em tais elementos.

Existem diversos estudos a respeito do fenômeno de VIV. Tais estudos envolvem técnicas computacionais e experimentais. A maior parte da literatura relacionada trata do fenômeno considerando apenas um grau de liberdade, transversal ao escoamento. O objetivo do aluno é analisar a influência do segundo grau de liberdade no fenômeno, visto que no problema citado acima, as vibrações podem ocorrer tanto na direção do escoamento, quanto na direção transversal a ele.

A tabela 1 apresenta as principais grandezas relacionadas ao estudo do fenômeno de VIV, sendo elas o coeficiente de massa adimensional, a velocidade reduzida e a amplitude adimensional.

Durante sua Iniciação Científica, realizada no laboratório Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF), o aluno desenvolveu uma base elástica pendular com dois graus de liberdade. Esta base, apresentada na figura 1(b), possui baixos valores de massa e coeficiente de amortecimento estrutural. Ao longo do seu trabalho de conclusão de curso o aluno seguiu com o desenvolvimento da base elástica, adaptando-a para ensaios com cilindros de 32mm e 50mm de diâmetro externo. Demais alterações permitiram o ensaio com diferentes valores de massa estrutural m^* e o emprego de sensores tais como células de carga, acelerômetros, trenas laser e anemômetros.

Além de seguir com o desenvolvimento e aperfeiçoamento da base, o aluno focou no estudo dos equipamentos a serem utilizados nos ensaios. Ensaios de calibração e verificação de modelos foram feitos. O aluno se preocupou em conhecer bem a resposta de cada sensor, para que os dados obtidos nos ensaios fossem confiáveis. O fenômeno de VIV, por ser não linear, é de difícil análise, logo conhecer os limites de medição é fundamental para que não se confunda erros de medição com aspectos fenomenológicos.

Nas próximas seções serão expostas as atividades desenvolvidas pelo aluno, começando com o estudo dos sensores e a análise desses resultados e concluindo com os ensaios de VIV em um e dois graus de liberdade e os resultados obtidos para a visualização do escoamento.

Tabela 1. Símbolos

Diâmetro do cilindro	d (m)	
Comprimento imerso do cilindro	L_m (m)	
Velocidade do escoamento	U_∞ (m/s)	
Massa da estrutura oscilante	m (kg)	
Frequência natural de oscilação em água	f_n (Hz)	
Coefficiente de massa adimensional	m^*	$\frac{m}{\pi L_m d^2 \rho_w}$
Amortecimento estrutural	ζ	$\frac{c}{2\sqrt{k m}}$
Velocidade reduzida	V_r	$\frac{U_\infty}{f_n d}$
Amplitude adimensionalizada	A^*	A/d

2. Metodologia empregada

A metodologia empregada neste trabalho baseia-se nas seguintes etapas. Em primeiro lugar, determina-se um objetivo, definido como o estudo do fenômeno de VIV com dois graus de liberdade. O segundo passo consiste em fazer uma revisão bibliográfica na qual as principais informações sobre o assunto são coletadas. Estuda-se, além de modelos matemáticos e fenomenológicos, quais são as principais maneiras de se trabalhar o tema. A opção do autor foi seguir para uma abordagem experimental, ao invés da computacional, também muito utilizada.

A realização de experimentos demanda uma série de conhecimentos prévios da equipe responsável por cada ensaio. Na visão do autor é primordial que todos os equipamentos e sensores sejam muito bem conhecidos. A validade dos resultados gerados por um equipamento só pode ser assumida caso este já tenha sido testado nas mesmas condições do ensaio.

Os equipamentos empregados nos ensaios de VIV serão analisados na próxima seção. Referente a metodologia do trabalho, é importante dizer que o autor objetiva estudar todos os sensores e conhecer todos os métodos que empregará. Antes de realizar experimentos de VIV, diversos ensaios, denominados preliminares, foram realizados estudando o comportamento de cada sensor e testando a validade de alguns modelos. Este pode ser considerado o quarto passo.

Conhecidos os equipamentos, é preciso dominar também a maneira de analisar os dados colhidos. A quinta etapa do trabalho consiste, para cada ensaio realizado, desenvolver uma rotina em Matlab para analisar os dados. Questões referentes a análise de sinais também foram estudadas pelo autor.

Antes de realizar ensaios com dois graus de liberdade o autor realizou ensaios com apenas um grau de liberdade. Este ensaio visava fornecer resultados para servirem de base de comparação com os resultados de dois graus de liberdade, além de aumentarem a sensibilidade do autor com relação ao fenômeno de VIV.

Dando continuidade, ensaios de VIV com dois graus de liberdade foram realizados. Existe pouca referência bibliográfica sobre ensaios de VIV com dois graus de liberdade. As condições experimentais ensaiadas são ligeiramente diferentes das encontradas na literatura, em virtude do modelo de base elástica e do parâmetro m^* escolhido nos ensaios.

3. Modelo matemático da base elástica

Para desenvolver a base elástica, ilustrada na figura 1, o aluno modelou seu comportamento mecânico, visando estimar a influência da massa e posição de cada peça na frequência natural da estrutura. A equação final obtida pelo aluno é apresentada na equação 1. Nesta equação, m_i e L_{Gi} representam, respectivamente a massa de cada peça i e a distância de seu baricentro até a articulação no teto do laboratório. Os termos k e J , por sua vez, representam a constante elástica da base em uma direção e o momento de inércia total da estrutura com relação à articulação no teto.

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\left(\frac{\sum m_i L_{Gi} g + L_{suporte}^2 molas k}{J}\right)} \quad (1)$$

A tabela 2 apresenta as frequências naturais de oscilação da base, obtidas pelo aluno em ensaios de decaimento em ar e as frequências naturais estimadas pelo modelo representado na equação 1. A segunda coluna da tabela, Npb , indica o número de tarugos de chumbo usados em cada ensaio. O objetivo de empregar os tarugos de chumbo é aumentar a massa estrutural, m , da base e, desta forma, permitir que ensaios de VIV com variados valores de m^* sejam realizados.



Figura 1. Base elástica pendular desenvolvida (a) representação esquemática (b) base implementada

Tabela 2. Comparação entre frequências naturais medidas e estimadas

$d(mm)$	N pb	f_n medida (Hz)	f_n estimada (Hz)	erro de estimação (%)
32	10	0,3586	0,3763	4,94
32	8	0,3662	0,3770	2,96
32	6	0,3815	0,3826	0,29
32	4	0,3968	0,3970	0,12
32	2	0,4425	0,4330	2,10
32	0	0,5493	0,5500	0,13

4. Determinação do parâmetro de massa adimensional equivalente, m_{eq}

O parâmetro inercial mais adequado para a base elástica desenvolvida é o momento de inércia, J , pois a estrutura rotaciona e não translada. Apesar disso, apresentar os resultados em função do momento de inércia limita a comparação com resultados presentes na literatura, uma vez que tais trabalhos empregam o parâmetro m^* . Ao longo de seu trabalho o aluno apresentou seus resultados em função de m^* , considerando m como a massa total da base elástica. Ainda que tal parâmetro não seja o mais representativo fisicamente é mais prático e permite comparações dentro do mesmo parâmetro, ou seja, no caso em que $m^* = 4,3$ a estrutura possui, de fato, mais inércia que quando $m^* = 3,2$, desta forma todas as análises feitas em função da massa seguem válidas.

Visando a comparação dos resultados obtidos com a base elástica com demais presentes na literatura o aluno buscou uma analogia entre a sua base e o caso translacional. Tal analogia foi feita empregando-se o modelo matemático desenvolvido pelo aluno, cujos resultados, apresentados na seção anterior, comprovam sua validade. Através de uma análise dimensional, a massa equivalente, m_{eq} , e o momento de inércia, J , podem ser relacionados pela equação 2. Os comprimentos L_1 e L_2 representam comprimentos característicos do problema.

$$m_{eq} = \frac{J}{L_1 L_2} \quad (2)$$

Ao longo do desenvolvimento do modelo obtém-se que $L_1 = L_{G \text{ base}}$, que é a distância do baricentro da base até a articulação no teto do laboratório. Esta distância surge devido à relação $\theta = y/L_{G \text{ base}}$. O comprimento L_2 foi escolhido pelo aluno como também sendo igual à distância do baricentro da base elástica até a articulação, $L_{G \text{ base}}$. Esta escolha baseia-se no seguinte princípio: caso a base estivesse apenas transladando, faz sentido considerar que sua massa encontra-se concentrada no seu baricentro, desta forma a posição deste é um parâmetro importante. Fazendo essas considerações, obtém-se a tabela 3 que relaciona cada configuração experimental com sua massa total, sua massa equivalente e o fator de conversão, definido como m_{eq}/m .

5. Equipamentos analisados

Dentre os equipamentos estudados pelo aluno para desenvolver seu trabalho estão: célula de carga, trena laser, acelerômetro e anemômetro de filme quente, ilustrados nas figuras 2(a), 2(b), 2(c) e 2(d), respectivamente.

O objetivo de empregar células de carga e acelerômetros era medir as forças hidrodinâmicas que atuam no cilindro. Aplicando o teorema do movimento do baricentro ao cilindro e, por simplicidade, considerando apenas um grau de

Tabela 3. Massa equivalente e fatores de conversão

$d(mm)$	N pb	$m(kg)$	$m_{eq}(kg)$	fator de conversão (m_{eq}/m)
32	10	4,696	5,353	0,97
32	8	4,120	4,862	1,03
32	6	3,538	4,281	1,09
32	4	2,967	3,632	1,17
32	2	2,380	2,808	1,26
32	0	1,796	1,724	1,30
50	4	3,736	4,521	1,23
50	2	3,158	3,695	1,19
50	0	2,300	2,346	1,13

liberdade, tem-se que:

$$m_{eq}\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_x \quad (3)$$

A equação anterior, elegante a qualquer profissional das exatas, não é tão trivial quanto parece. Na verdade, m_{eq} não é a massa da estrutura oscilante. Os valores de c e k não são conhecidos. Pode-se sim, medir a constante elástica de cada mola e então estimar uma constante elástica equivalente, mas a composição das quatro molas que formam o conjunto restaurador é, na verdade, não linear. A massa da estrutura não é o parâmetro exato a se considerar, tendo em vista que a base elástica rotaciona e não translada.

O objetivo da célula de carga é medir a força kx . O objetivo do acelerômetro é medir a aceleração \ddot{x} . É preciso ainda determinar um valor equivalente para a massa m_{eq} .

Estudar o comportamento do acelerômetro foi uma atividade muito produtiva. A princípio o aluno realizou uma calibração estática, montando o sensor em um plano inclinável e medindo a componente normal ao acelerômetro da aceleração da gravidade. Em seguida o aluno realizou um ensaio que visava comparar o sinal da aceleração medida pelo acelerômetro com o sinal derivado da posição, obtido pela trena laser. Tal ensaio consistia em montar o acelerômetro no alvo da direção y da base e então provocar sua oscilação. Três variações deste ensaio foram realizadas. Na primeira o aluno impôs o movimento à base, na segunda um ensaio de decaimento com molas foi realizado e na terceira um ensaio de decaimento sem molas.

Os primeiros resultados obtidos pelo aluno revelaram uma dificuldade: o sinal da posição não poderia ser simplesmente derivado, pois apresentava ruído. A solução foi desenvolver uma rotina que filtrasse o sinal e calculasse sua derivada em seguida. Os novos resultados obtidos pelo aluno, empregando a rotina desenvolvida mostraram que o acelerômetro não era um bom sensor para medir a aceleração da base. Apesar de o acelerômetro ser do tipo “estático”, isso apenas significa que ele pode ser empregado em ensaios com baixas frequências. A questão é que, segundo o catálogo do fabricante, baixas frequências são da ordem de $10Hz$ e não $2Hz$ ou ainda $0,4Hz$. O sensor apresenta um ganho de amplitude menor que a unidade para frequências muito baixas e isso se confirmou comparando-se o valor do RMS do sinal da aceleração medida com o RMS da aceleração estimada. Para o ensaio forçado, com $f \simeq 2Hz$ o erro no RMS foi de 11%, para o ensaio de decaimento com molas $f \simeq 1Hz$ o erro no RMS foi de 30% e para o ensaio de decaimento sem molas, $f \simeq 0,4Hz$ o erro no RMS foi de 83%. A melhor maneira de se medir a aceleração da base é a derivação numérica do sinal da posição empregando filtragem de sinal.

Dentre os equipamentos utilizados pelo aluno pode-se citar ainda o anemômetro de filme quente. Tal sensor é empregado para medir a velocidade instantânea do escoamento em determinado ponto. O objetivo do emprego deste sensor é medir a frequência de desprendimento de vórtices, f_v , durante um ensaio de VIV.

Antes de utilizar o anemômetro nos ensaios de VIV o aluno estudou qual seria a melhor maneira de posicioná-lo. Este primeiro ensaio serviu também como um primeiro contato do aluno com o sensor. A figura 3(a) apresenta os locais onde a sonda foi posicionada e a figura 3 ilustra o número de Strouhal, St , definido pela equação 4, em função do número de Reynolds, Re . A linha preta, usada como referência para a comparação dos resultados, foi obtida pela expressão 5, fornecida em Norberg (2003).

$$St = \frac{f_v d}{U_\infty} \quad (4)$$

$$St = 0,1853 + 0,0261 \exp(-0,9x^{2,3}) \quad x = \log\left(\frac{Re}{1600}\right) \quad (5)$$

6. Procedimentos numéricos empregados

Quatro procedimentos numéricos principais tiveram que ser empregados pelo aluno ao longo de seu trabalho, sendo estes a determinação de frequências dominantes de um sinal, cálculo do fator de amortecimento, filtragem de sinais e

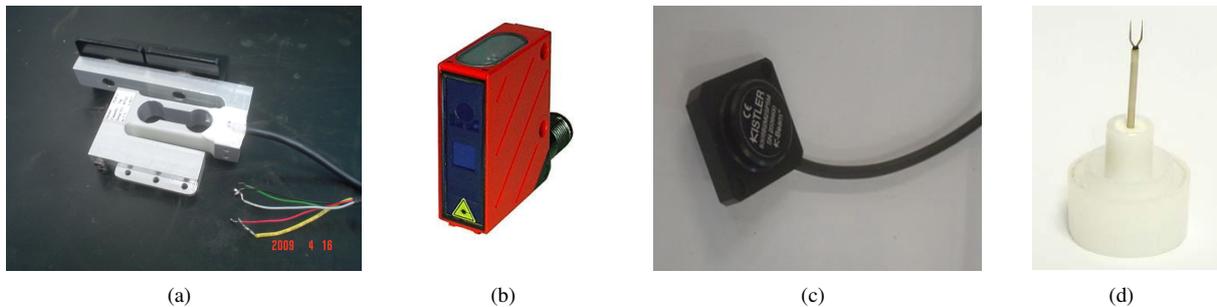
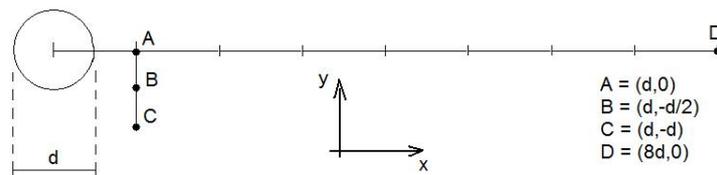
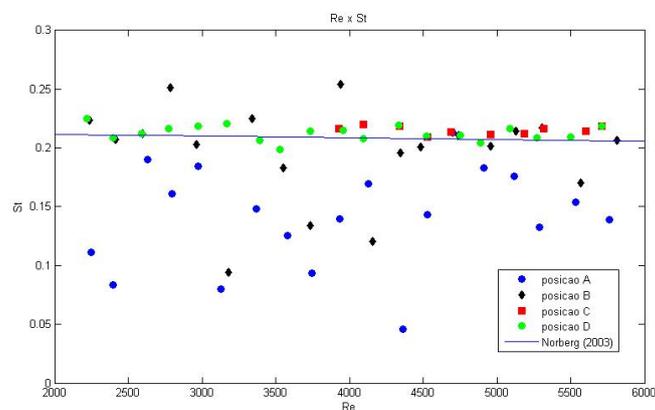


Figura 2. Sensores utilizados pelo aluno (a) célula de carga (b) trena laser (c) acelerômetro (d) anemômetro



(a)



(b)

Figura 3. (a) Posições da sonda (b) compilação dos resultados obtidos com o anemômetro

derivação numérica.

O objetivo da determinação de frequências naturais justifica-se nos ensaios de decaimento, pois conhecer a frequência natural de oscilação da base em água, f_n , é fundamental para determinar o valor de V_r . O procedimento empregado para determinar f_n é aplicar a transformada discreta de Fourier e então buscar os pontos nos quais o espectro de amplitudes é máximo.

Determinar o fator de amortecimento é importante para poder validar a base, cujo amortecimento estrutural deve ser baixo, e para poder se calcular o parâmetro $m^* \zeta$. Numericamente o valor de ζ é obtido determinando-se a melhor curva exponencial, do tipo $Env = A \times \exp(\alpha t)$ que envolve o sinal posição. Conhecida a exponencial, tem-se que $\zeta = -\alpha / (2\pi f_n)$. A figura 4(a) ilustra a curva envoltória de um sinal obtido em um ensaio de decaimento em ar.

A filtragem de sinais se revelou um procedimento importante, pois todos os sinais obtidos experimentalmente estão sujeitos a ruídos. O aluno empregou um filtro retangular. Tal filtro consiste em zerar o espectro de amplitudes para frequências que se deseja eliminar. A figura 4(b) ilustra o detalhe de um sinal que foi filtrado. Nota-se que o ruído, pequenas oscilações com alta frequência, foi eliminado.

A derivação numérica é realizada empregando-se a equação 6.

$$\frac{d^2x}{dt^2} \Big|_t = \frac{x(t + \Delta t) - 2x(t) + x(t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (6)$$

7. Ensaio de VIV com um grau de liberdade

Visando obter resultados dignos de comparação para os resultados com dois graus de liberdade, o autor realizou ensaios de VIV com um grau de liberdade na base elástica pendular desenvolvida. A importância desses ensaios justifica-se na

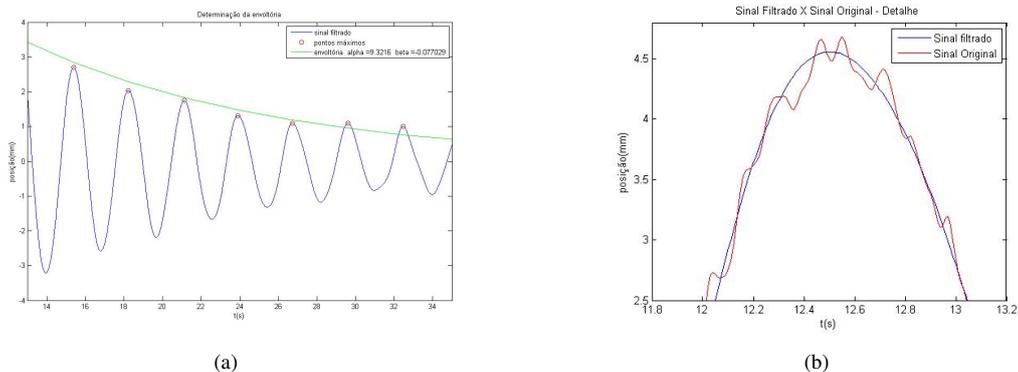


Figura 4. (a) Determinação da curva envoltória para determinação de ζ (b) Comparação de um sinal original e filtrado

necessidade de possuir resultados realizados segundo a mesma montagem experimental, com a mesma massa e fator de amortecimento. Não se pode, simplesmente, comparar os resultados obtidos pelo aluno com demais resultados publicados na literatura sem antes conhecer qual é a real influência que a base, na qual os ensaios são realizados, tem. De forma a evitar comparações cuja validade ainda não se conhece, o aluno optou por obter os seus próprios resultados para VIV com um grau de liberdade na base elástica por ele projetada.

A metodologia empregada para limitar um dos dois graus de liberdade da base elástica foi utilizar cabos de aço. Dois cabos foram presos a base. A extremidade de um dos cabos foi presa a jusante da base e a extremidade do outro cabo foi presa a montante desta. O princípio geométrico para esta limitação encontra-se na figura 5(a). Nota-se que a região laranja é a única intersecção entre as duas circunferências. Na verdade a intersecção entre elas deveria ser apenas um ponto, mas considerando-se a deformação do cabo existirá uma pequena região, aproximadamente linear e transversal ao escoamento no qual o cilindro poderá oscilar. A figura 5 ilustra um detalhe da montagem dos cabos.

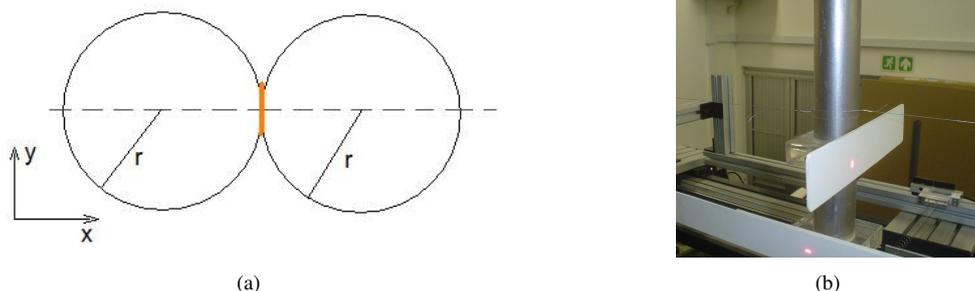


Figura 5. (a) Princípio geométrico para limitação de um grau de liberdade (b) detalhe da montagem empregada para limitar o movimento da base elástica pendular a um grau de liberdade

A figura 6(a) ilustra os resultados obtidos pelo aluno e compara-os com os resultados apresentados em Williamson e Govardhan (2004). Nota-se que existe boa concordância entre os resultados obtidos pelo aluno. Não há variação significativa de comportamento para os diversos valores de m^* ensaiados, percebe-se apenas ligeiro aumento na amplitude do movimento com a queda do valor de m^* . Outra observação importante é que, para VIV com um grau e para os valores de m^* ensaiados, a histerese do fenômeno não se manifestou, ou seja, o fenômeno apresentou o mesmo comportamento independente do sentido de V_r ao longo dos ensaios.

A aparente discrepância entre os resultados do aluno e de Williamson e Govardhan (2004) não compromete os dados do aluno. É importante citar que os resultados obtidos por esses pesquisadores são oriundos de uma base elástica com outro princípio de funcionamento, desta forma deve-se tomar cuidado ao sobrepor as curvas para se analisar os resultados. Ignorando momentaneamente a diferença de amplitude, nota-se boa concordância do comportamento do fenômeno ao longo de V_r , pois o fenômeno inicia-se, tem um pico e depois desaparece nas mesmas regiões.

8. Ensaio de VIV com dois graus de liberdade

Visando estudar a influência do parâmetro m^* , o aluno conduziu ensaios de VIV com dois graus de liberdade com sete valores diferentes de m^* . A figura 6(b) apresenta a compilação dos resultados para $m^* \geq 4,3$.

Da figura pode-se perceber que existe boa concordância entre os dados, ou seja, nenhuma grande variação de comportamento ocorre com a variação de massa. Nota-se porém que, com a diminuição de m^* , o V_r de queda do *lower branch* cresce, o que pode ser notado com o avanço da curva $A/d \times V_r$ para a direita. Percebe-se também que para estes valores de

m^* não houve oscilação na direção x , alinhada com o escoamento. A figura 6(c) apresenta a comparação entre o resultado obtido para o ensaio de VIV com um e dois graus de liberdade para $m^* = 4, 3$.

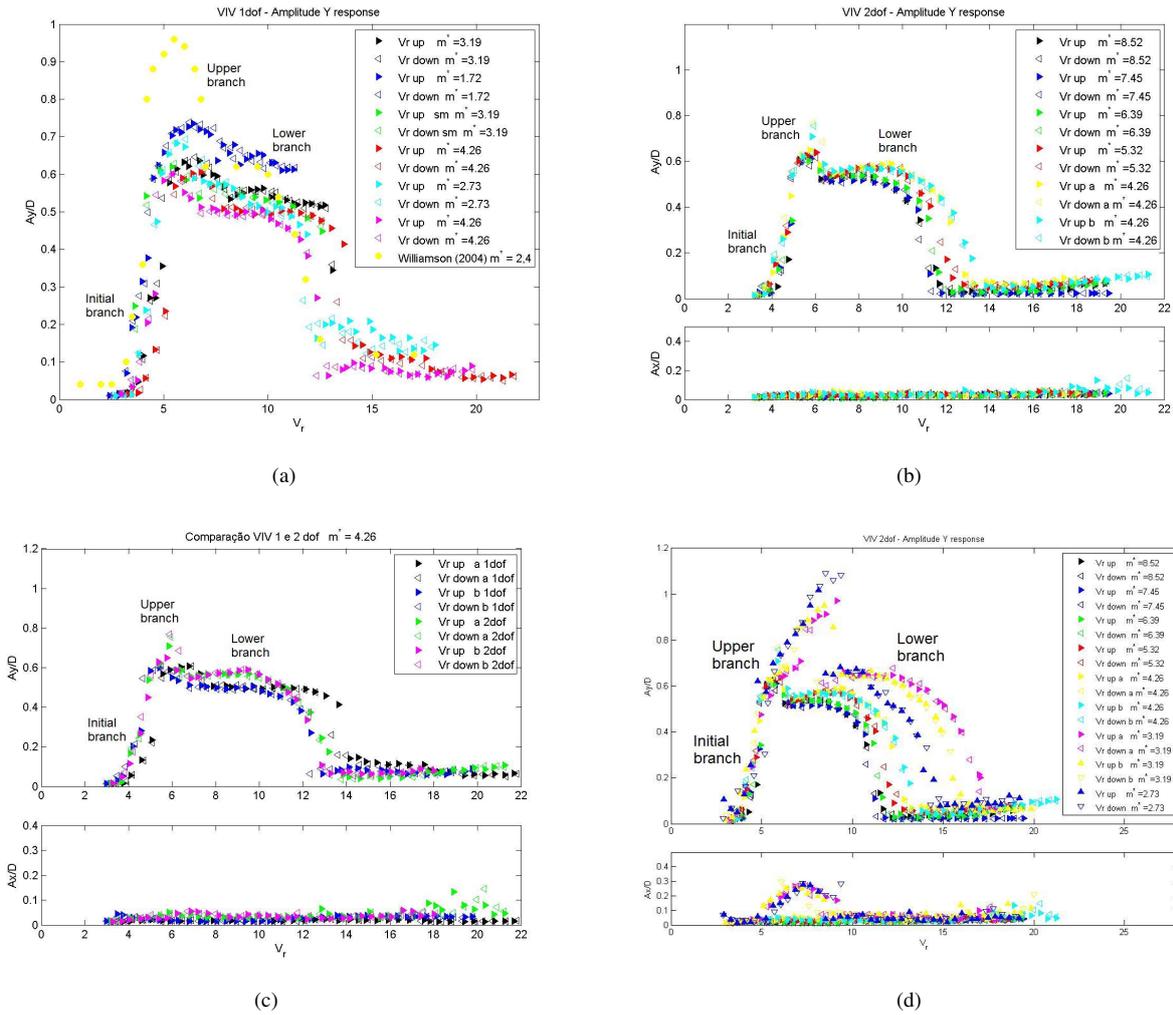


Figura 6. Compilação de resultados: (a) VIV com um grau de liberdade e resultado de Williamson e Govardhan (2004) (b) VIV com dois graus de liberdade para $m^* \geq 4, 3$ (c) comparação de VIV com um e dois graus de liberdade para $m^* = 4, 3$ (d) VIV com dois graus de liberdade

Ensaio com valores menores de m^* apresentam comportamento distinto ao apresentado para $m^* \geq 4, 3$. Para $m^* = 3, 2$ o efeito do segundo grau de liberdade se faz presente. A figura 6(d) ilustra a compilação geral dos resultados obtidos pelo aluno. Pode-se notar que existe uma grande variação de comportamento do fenômeno, pois o cilindro passa a oscilar também na direção alinhada com o escoamento, existe um novo salto de amplitude na direção transversal ao escoamento, o domínio do fenômeno se expande e passa a atingir valores mais altos de V_r . A histerese, não observada no caso de um grau de liberdade, aparece para o caso de VIV com dois graus e $m^* \leq 3, 2$.

Devido à oscilação na direção x , alinhada com o escoamento, o cilindro passa a oscilar segundo novos modos de vibrar. A figura 7 apresenta duas imagens que representam a trajetória descrita pelo cilindro para $V_r \approx 7, 5$ e dois valores de m^* . Nota-se que a trajetória apresentada na imagem 7(b) é bem definida, ou seja, as frequências de oscilação são bem definidas em cada direção ao longo do ensaio.

9. Visualização do escoamento

O objetivo de empregar técnicas de visualização do escoamento é estudar a formação e o desprendimento de vórtices ao redor do cilindro e como o movimento do cilindro afeta esse mecanismo. Duas técnicas foram testadas, sendo estas a visualização com tinta fluorescente (LIF) e a visualização com PIV. A técnica LIF fornece resultados qualitativos e não demanda processamento numérico. A técnica PIV, por sua vez, demanda processamento numérico dos sinais medidos e fornece resultados quantitativos.

Antes de empregar as referidas técnicas de visualização, o aluno teve um primeiro contato com ambas realizando a visualização em cilindro fixo. Dois valores de Re foram ensaiados, sendo estes $Re = 540$ e $Re = 1600$. A figura 8 ilustra os resultados obtidos com as duas metodologias para $Re = 540$. Na figura 8(a) observa-se o caminho percorrido pela

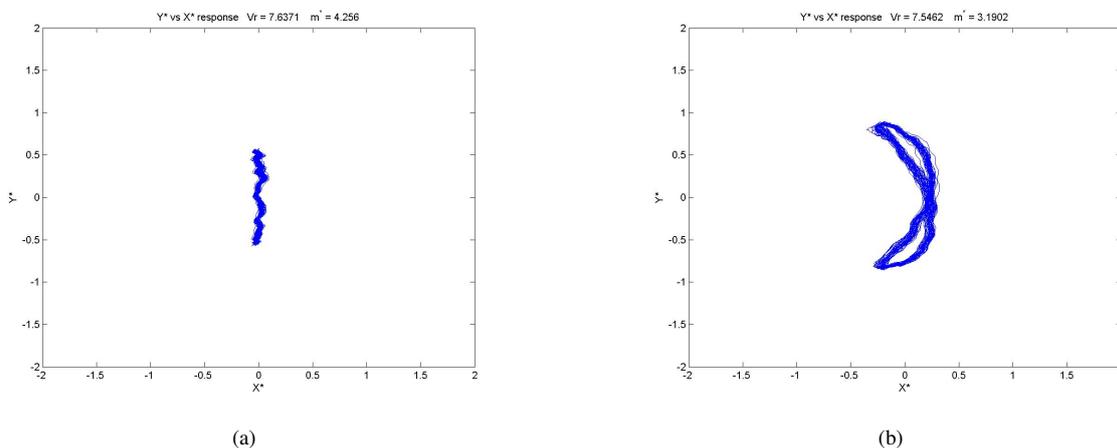


Figura 7. Trajetórias do cilindro para $V_r \approx 7,5$ (a) $m^* = 4,3$ (b) $m^* = 3,2$

tinta fluorescente e na imagem 8(b) observa-se o campo de vorticidade do escoamento.

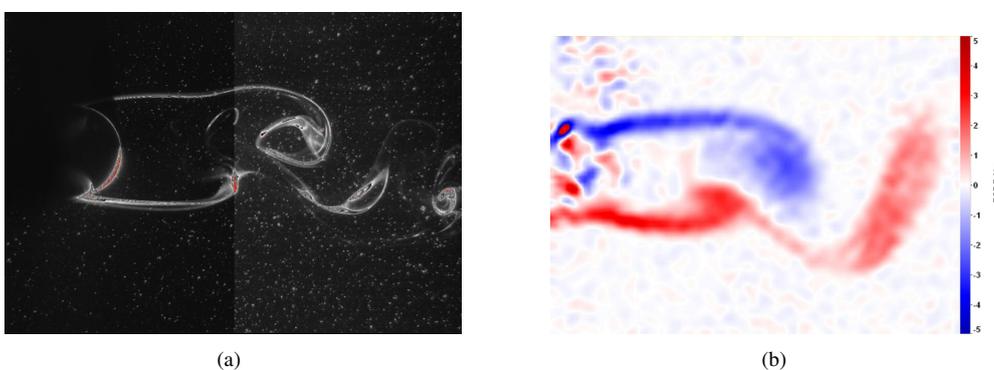


Figura 8. Resultados obtidos para visualização do escoamento com cilindro fixo, $Re = 540$ (a) LIF (b) PIV

A técnica LIF se mostrou inapropriada para visualizar o escoamento no caso de cilindros oscilantes. Para que a técnica forneça resultados claros, é preciso que o jato de tinta seja injetado de maneira muito cuidadosa. É preciso regular a vazão de tinta e a posição do injetor para que a tinta contorne o cilindro e não se dissipe. Tal ajuste é delicado para cilindros fixos, para cilindros móveis é impraticável. Uma possível solução é injetar a tinta por dentro do cilindro, mas não pertence ao escopo do trabalho focar no desenvolvimento da técnica LIF.

Resultados para cilindro oscilando com dois graus de liberdade foram obtidos apenas com a técnica PIV. A figura 10 apresenta a medição do campo de vorticidade média para quatro valores de V_r . A figura 9 ilustra os valores de V_r selecionados para a visualização. Os campos de vorticidade ilustrados na figura 10 foram obtidos calculando-se a média de fase de diversos campos de velocidade instantâneos e então calculando-se o campo de vorticidade deste campo médio de fase. Nas imagens o escoamento é vertical, de cima para baixo. A figura 10 não apresenta os resultados para $V_r = 3$, pois para este valor da velocidade reduzida o fenômeno de VIV ainda não havia se manifestado. A esteira obtida para $V_r = 3$ é análoga à esteira apresentada na figura 8(b), na qual o modo de desprendimento de vórtices “2S” pode ser reconhecido.

A figura 10 ilustra os campos médios de vorticidade para $V_r = 6$, $V_r = 9$, $V_r = 12$ e $V_r = 18$. Nota-se que em cada uma a esteira apresenta um comportamento distinto. A imagem 10(a) ilustra o campo de vorticidade médio para $V_r = 6$. Nota-se a presença de duas regiões de vorticidade concentradas, caracterizando o modo “2S” de desprendimento de vórtices. Na imagem 10(b) nota-se uma região de vorticidade concentrada com, ao que parece, três centros. A imagem 10(c), por sua vez, ilustra duas regiões concentradas de vorticidade opostas, indicando o modo de desprendimento de vórtices “2P”. Por fim, a imagem 10(d) não apresenta nenhuma região de vorticidade concentrada. As camadas cisalhantes não parecem se enrolar e nenhum padrão de desprendimento de vórtices é observado.

10. Conclusão

O trabalho desenvolvido pelo aluno, focando o estudo do fenômeno de VIV com dois graus de liberdade, envolveu muito mais do que apenas ensaios de VIV, desta forma diversas conclusões intermediárias podem ser feitas. Com relação ao projeto e desenvolvimento da base elástica, o aluno conclui que a base implementada atende aos requisitos de projeto, baixos valores de m e ζ , e pode ser empregada em estudos de VIV com um e dois graus de liberdade. O modelo

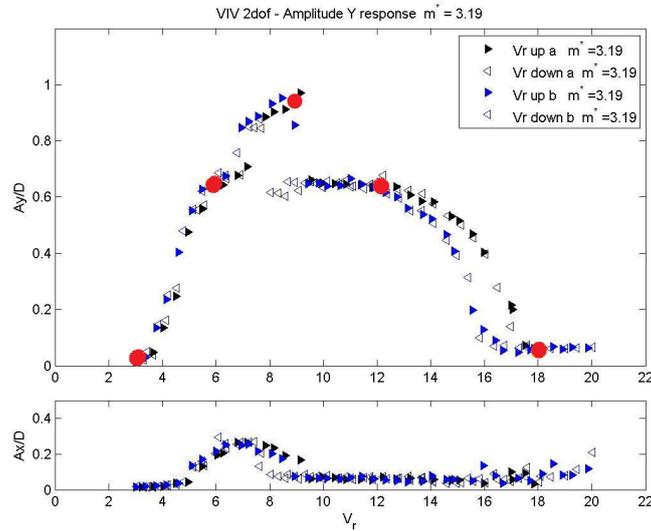


Figura 9. Seleção de V_r para visualização com PIV

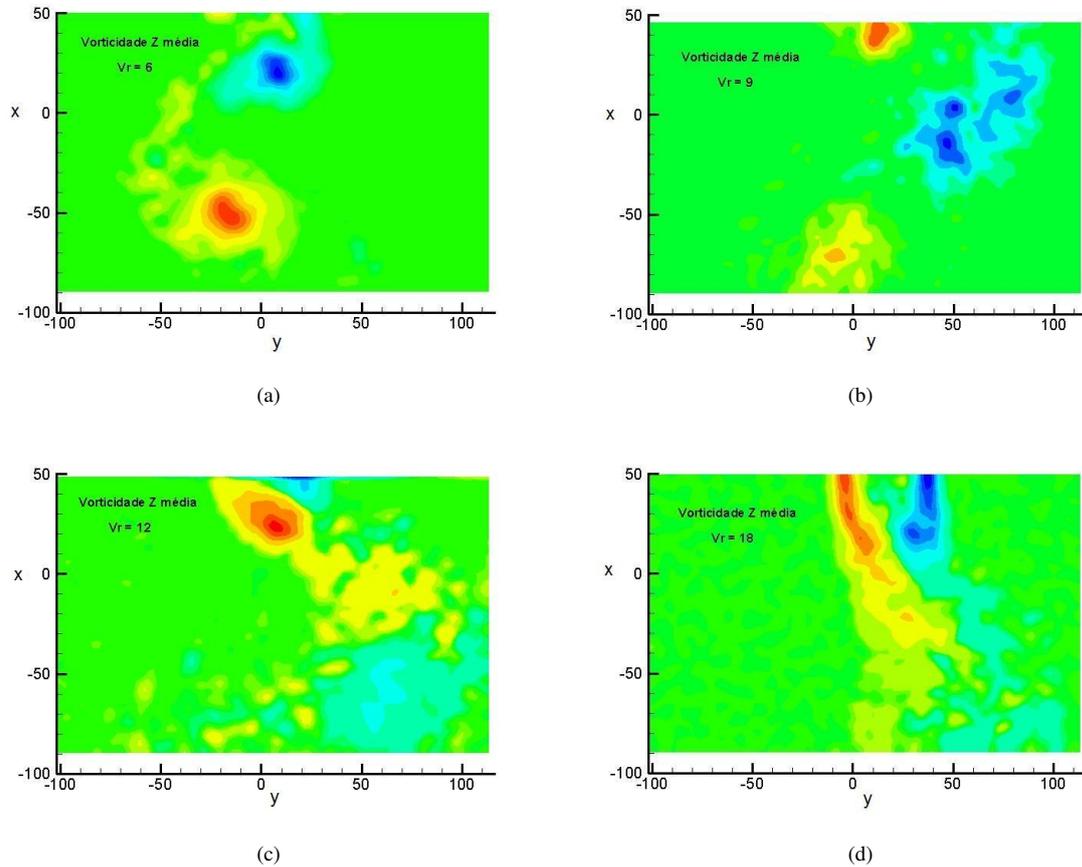


Figura 10. Resultados obtidos para visualização de um ensaio de VIV com dois graus de liberdade com $m^* = 3,2$ (a) $V_r = 6$ (b) $V_r = 9$ (c) $V_r = 12$ (d) $V_r = 18$

matemático desenvolvido pelo aluno para estimar a frequência natural de oscilação da base apresentou resultados muito próximos aos obtidos experimentalmente, verificando sua validade. Ainda tratando da base elástica, o aluno desenvolveu uma analogia de sua massa, m , com uma massa equivalente, m_{eq} , translacional.

Com relação aos ensaios preliminares, nos quais o aluno calibrou quatro tipos diferentes de sensores, podem ser feitas as seguintes conclusões. A trena laser é, de fato, um sensor adequado para a medição dos deslocamentos da base, pois não interfere em seu comportamento e apresenta resultados precisos. A célula de carga, selecionada pelo aluno, foi calibrada e um modelo dinâmico com apenas um grau de liberdade foi validado. O objetivo da célula de carga é medir a força nas molas, kx . O acelerômetro, usado para medir a aceleração da base, não apresentou bons resultados quando submetido

a oscilações de baixa frequência. A melhor maneira para determinar a aceleração da base é empregando a derivação numérica do sinal filtrado da posição. O último sensor estudado pelo aluno foi o anemômetro de filme quente, com o qual mediu a frequência de desprendimento de vórtices para o escoamento ao redor de um cilindro fixo. O aluno estudou a importância do posicionamento da sonda nos resultados e verificou que a sonda não pode estar próxima ao cilindro, pois a esteira de vórtices ainda não está formada nessa região.

Nos ensaios de VIV realizados o aluno estudou o fenômeno com um e dois graus de liberdade. O aluno verificou que existe uma transição no comportamento do fenômeno de VIV com dois graus de liberdade em função do parâmetro de massa m^* . Para elevados valores de m^* , $m^* > 4,3$ o fenômeno de VIV com dois graus de liberdade apresenta o comportamento típico do fenômeno com apenas um grau. Para massas menores, $m^* \leq 3,2$, o segundo grau passa a influenciar no fenômeno. Verifica-se um novo salto de amplitude, depois do *upper branch*, na direção transversal ao escoamento, y . Este novo salto ocorre para o mesmo valor de V_r onde A_x/d é máximo.

Com relação aos resultados obtidos com as técnicas de visualização do escoamento, o aluno conclui que a técnica de visualização por tinta fluorescente, LIF, não é prática para ser empregada em ensaios de VIV, devido a dificuldade de se injetar a tinta. Nos ensaios com cilindro fixo, o controle da vazão de tinta e o posicionamento do bico injetor precisam ser feitos com cuidado. Tal procedimento não pode ser repetido quando o cilindro está livre para se mover. O aluno está estudando maneiras de facilitar o procedimento, tal como injetar a tinta por dentro do cilindro.

A técnica de visualização com PIV não apresenta a limitação causada pelo movimento do cilindro. O aluno obteve a esteira para cinco valores de V_r e verificou que esta apresenta diferentes padrões ao longo do ensaio de VIV. O formato da esteira está relacionado com as variações do campo de pressão ao redor do cilindro, o que afeta o seu movimento. Modos de desprendimento como o "2S" e o "2P" foram reconhecidos.

11. Agradecimentos

O autor agradece o apoio financeiro da FAPESP, Petrobras e FINEP, que forneceram recursos para a fabricação da base elástica de dois graus de liberdade. O autor gostaria de agradecer também o constante suporte técnico fornecido por Ivan Korkischko e Guilherme Franzini e o auxílio na fabricação das peças da base elástica fornecido por Douglas Silva.

12. Referências

Norberg, C., 2003, "Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements", *Journal of Fluids and Structures* 17, 57-96.
Williamson, C. H. K., Govardhan, R., 2004, "Vortex-induced vibrations", *Ann. Rev. Fluid Mech.* 36, 413-455.

13. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

AN EXPERIMENTAL STUDY ABOUT VORTEX INDUCED VIBRATIONS WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

Cesar Monzu Freire

NDF, Department of Mechanical Engineering, POLI, University of São Paulo, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brazil
cesar.freire@poli.usp.br

Julio R. Meneghini

NDF, Department of Mechanical Engineering, POLI, University of São Paulo, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brazil
jmeneg@usp.br

Abstract. *Vortex shedding can occur when a cylinder is immersed in a fluid current. Due to its structural conditions and fluid current characteristics, the cylinder can oscillate. The interaction between the alternate vortex shedding and the cylinder oscillation is denominated Vortex-Induced Vibrations (VIV). There is extensive literature about VIV, but a large number of questions remains unsolved. The main approach to VIV studies considers only one degree of freedom, transverse to the flow, for the cylinder oscillation. The present work brings an experimental study that considers the second degree of freedom, in line with the flow. The author shows, before presenting the VIV results, his methodology of work in which each sensor and model is tested. The VIV experiments were made using the elastic base with two degrees of freedom, developed by the author as his Scientific Initiation. The base has low mass and structural damping values.*

Keywords: *vortex shedding, vortex-induced vibrations, structural damping, experimental fluid dynamics*