

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES EM CILINDROS COM DIFERENTES RUGOSIDADES

**Bruno Ferreira Hubner^a, Felipe G Noel^a, Rodrigo Moretti Kochem^a, Lucas Homem
Grossi Ferreira^a, Ricardo Franciss^{a, b}**

^a *CEC, Centro de Engenharia e Computação, Universidade Católica de Petrópolis, Rua Barão do Amazonas, 124, Centro, 25.685-070, Petrópolis, RJ, Brasil, <http://www.ucp.br>*

^b *CENPES, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, 21.941-915, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, <http://www.petrobras.com.br>*

Palavras chave: Vibrações Induzidas por Vórtices, Vórtices, interação fluido-estrutura, rugosidade.

Resumo. Foi realizado um estudo experimental no canal de correntes da UCP que consistiu na representação gráfica da curva adimensional A/D versus velocidade reduzida de três cilindros com diferentes rugosidades, cilindro de vidro, polietileno (PVC) e polietileno revestido com lixa. E comparação dos resultados da curva A/D entre os variados tipos de superfície de cilindro. O experimento, no tanque, envolveu três etapas: medição das amplitudes de vibração cross e in line no cilindro de PVC; em um cilindro de vidro; e em cilindro rugoso. Para cada tubo utilizado, são apresentados os resultados das três etapas e os respectivos gráficos A/D versus V_r . Como conclusão deste estudo, é importante considerar a rugosidade do material, que influencia a camada limite, para a análise das vibrações induzidas por vórtices.

1 INTRODUÇÃO

Vórtice, também chamado de turbilhão ou redemoinho, pode ser definido como um escoamento, onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular, que se movimenta em torno de um centro de rotação. Quando a equação de Bernoulli é aplicada, verifica-se que a velocidade torna-se inversamente proporcional a pressão, com isso o vórtice surge devido às diferenças de pressão e velocidade. O fluido tende a equilibrar o sistema, migrando da região de maior para menor pressão, o que provoca a mudança na direção original do escoamento^[1].

Quando um fluido passa por uma estrutura tubular, a influência da viscosidade sobre o fluxo é confinada a uma pequena faixa ao longo da superfície, denominada camada limite, na qual a variação da velocidade do fluxo é, desde um valor nulo, próximo à parede do cilindro, até o valor característico do escoamento^[2].

O conceito de camada limite foi introduzido inicialmente por Ludwig Prandtl^[2]. Está diretamente relacionada com a interação entre fluido e a superfície de contato. O atrito que existe entre a estrutura e o fluido determina as condições de resposta que a estrutura estará sujeita, o atrito é diretamente proporcional a rugosidade da superfície. O material rugoso apresenta uma área de superfície maior de contato com o fluido, dessa forma, é esperada uma maior perda da energia cinemática na camada limite e o escoamento irá se comportar como se estivesse em alto Reynolds^[3].

Por exemplo, risers rígidos em catenária (SCR's), utilizados em plataformas de produção, além de possuírem a rugosidade externa do tubo de aço, estão sujeitos à incrustação marinha, o que torna o tubo mais rugoso. Os SCR's passam por fases em que a rugosidade externa sofre variações ao longo do tempo.

Estruturas cilíndricas imersas em água, submetidas a escoamento, estão sujeitas à formação de vórtices ao seu redor. A consequência do desprendimento desses vórtices é o surgimento de forças hidrodinâmicas aplicadas sobre o cilindro provocando as vibrações induzidas por vórtices. Essas forças são geradas pela diferença no campo de pressões atuantes na superfície do cilindro, provocando as vibrações induzidas por vórtices.

O fenômeno de vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices (VIV), do inglês *Vortex-Induced Vibrations*, representa apenas uma das conhecidas modalidades de interação fluido-estrutura que compõem o campo da dinâmica dos fluidos. As VIV correspondem às oscilações de natureza auto-excitada, de maneira que a ordem de grandeza alcançada pela oscilação é aproximadamente um diâmetro em estruturas cilíndricas, e sua constância é capaz de levar a um quadro precoce de comprometimento estrutural por fadiga^[4].

Componentes estruturais, sujeitos às VIV, são submetidos a carregamentos repetitivos ao longo do tempo. Esses carregamentos geram ciclos de tensões de diferentes amplitudes, que, mesmo de pequenas intensidades, podem provocar danos físicos no material. Esse processo que acumula danos seguido de eventual fratura é denominado fadiga^[5].

Existem dois tipos de respostas que os cilindros podem apresentar devido ao desprendimento de vórtices, na direção da corrente (*in-line*), ou na direção perpendicular à direção da corrente (*cross flow*). A frequência da primeira resposta é duas vezes a da segunda resposta, mas, a amplitude na direção perpendicular ao fluxo é na ordem de 5 a 10 vezes a resposta na direção do fluxo^[6].

Analisar o fenômeno das vibrações induzidas por vórtices pode ajudar no desenvolvimento de estratégias que visem a atenuação dessas vibrações em *risers* e dutos submarinos, e, dessa forma, evitar danos associados à fadiga estrutural, o que poderia diminuir a produção de óleo e gás, ocasionar um desastre ecológico com danos irreversíveis, além dos prejuízos financeiros.

A presente pesquisa tem como objetivos, representar graficamente a curva

adimensional A/D versus velocidade reduzida de três cilindros com grau de rugosidade diferenciado, cilindro de vidro, polietileno (PVC) e polietileno revestido com lixa. E comparar os resultados da curva A/D entre os variados tipos de superfície de cilindro.

2 MÉTODO

O trabalho experimental foi realizado no canal de correntes do laboratório de hidráulica na Universidade Católica de Petrópolis (UCP). Este canal possui quatro metros de comprimento, quinze centímetros de largura e quarenta centímetros de profundidade. O aparato de teste contém: um cilindro rígido, com 303,4g de massa, 0,025m de diâmetro, 1,10m de comprimento, rotulado na extremidade superior, como um pêndulo (figura 1), submerso 0,225m. O canal é fixo, o que sofreu variação, para a realização das medidas, foi a corrente de água. Os cilindros utilizados tiveram a extremidade, que ficava em contato com a água, tamponada, para que a entrada de água no cilindro não constituísse um viés para o estudo.



Figura 1: canal de correntes e suporte para o cilindro

Os ensaios foram divididos em três etapas. Primeiro foi realizado o experimento utilizando um cilindro rugoso, para isso, um tubo de 0,020m de diâmetro (PVC) foi revestido com uma lixa de papel à prova d'água, nº 80, até atingir o diâmetro de 0,025m, com o objetivo de tornar os três tubos o mais semelhante possível. Depois o tubo rugoso foi pesado, e apresentou 303,4g.

Para o segundo ensaio, utilizou-se um tubo de PVC com 0,025m de diâmetro e 301,3g de massa. Acrescentou-se areia, pelo orifício superior do tubo, para alcançar uma massa total de 303,4g.

A técnica empregada para igualar as massas dos cilindros, acrescentar areia, gera uma massa concentrada, e pela equação da frequência de pendulo este fato é relevante, porém a diferença das frequências nos três tubos foi pequena. A equação da frequência natural de um pêndulo, F_n , feito com correntes e massa na extremidade é dada por:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L} \cdot \frac{M + \frac{M_c}{2}}{M + \frac{M_c}{3}}} \quad (1)$$

Neste estudo, M_C é o peso linear do cilindro e M é a massa do tubo submerso, incluindo a massa interna e a massa adicionada.

O terceiro experimento foi realizado com um tubo de vidro, com 296,3g de massa, 0,025m de diâmetro. Também foi necessário preencher o tubo com areia, para que todos ficassem com 303,4g de massa.

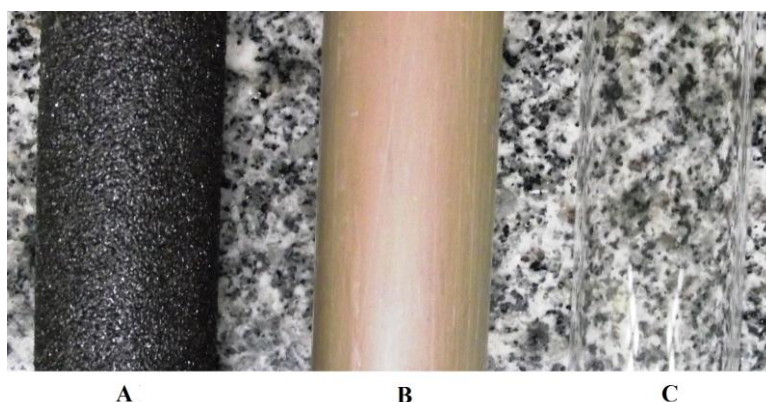


Figura 2: tubo rugoso (A), tudo de PVC (B) e o tubo de vidro (C)

Para identificar a faixa de velocidade ideal do fluxo, para a realização dos experimentos, foi necessário determinar a frequência natural do sistema, do primeiro modo, através do teste de decaimento. Devido ao cilindro rígido e a baixa profundidade do canal, só foi possível considerar a frequência (F_1) no primeiro modo. Após realizar o teste de decaimento, concluiu-se que não era preciso acrescentar molas ao sistema, pois F_{rugoso} correspondeu a 0,30 Hz, F_{PVC} a 0,29 Hz e F_{vidro} a 0,29 Hz, logo, as respostas dos cilindros estavam na frequência esperada de resposta.

A faixa de velocidade foi calculada através da fórmula: $V_r = U/D.F_n$, onde V_r representa a velocidade reduzida, U : velocidade do fluxo, D : diâmetro do cilindro e F_n : frequência natural do cilindro correspondente. O intervalo da velocidade reduzida foi de 2 até 14, com estes valores foi possível determinar a faixa de velocidade ideal, de 0,0100 m/s até 0,100 m/s. A medida da corrente do fluxo foi verificada por meio de um tubo de Pitot.

Obtiveram-se as amplitudes de vibração (*in-line* e *cross*) do cilindro, através da utilização de um paquímetro, posicionado próximo à superfície da água, apoiado na borda do canal. Para que o mesmo ficasse perpendicular ao canal, utilizou-se um papel milimetrado preso em cima da borda. No momento em que o tubo atingia o máximo do seu deslocamento, o instrumento era travado e procedida a leitura da amplitude de vibração do cilindro. As medições dos deslocamentos *in-line* e *cross* foram verificadas cinco vezes para calcular a média, esse procedimento foi realizado 195 vezes com diferentes velocidades para cada cilindro.

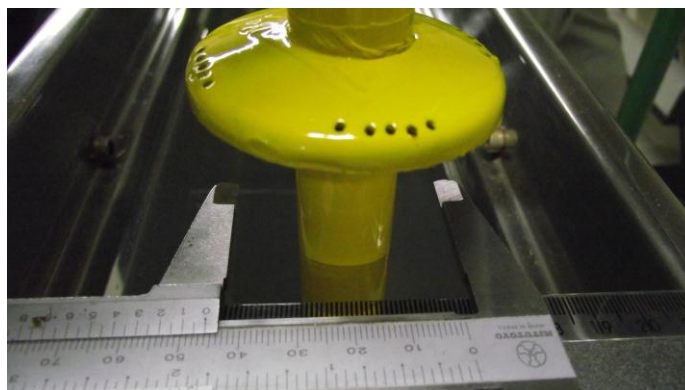


Figura 3: Leitura das amplitudes máximas

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o experimento 1, com cilindro rugoso, verificou-se que a amplitude máxima na direção *in-line* ocorreu para um intervalo de velocidade reduzida de 5 a 6, enquanto a amplitude máxima na direção *cross* apresentou um intervalo de 6 a 7, como representado no gráfico 1 e na tabela 1.

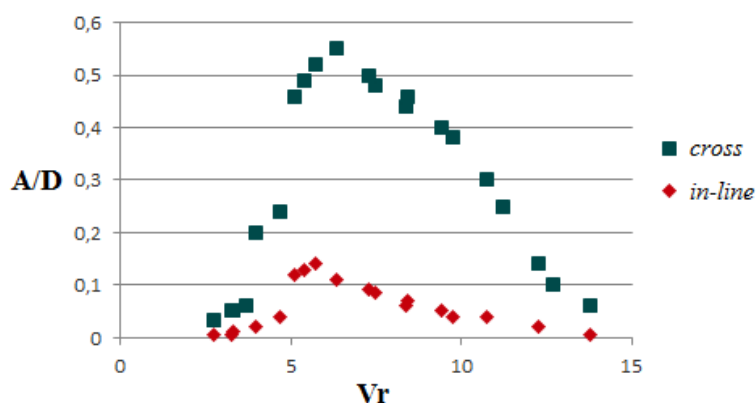


Gráfico 1: A/D versus Vr do cilindro rugoso

O gráfico 1 apresentou um setor com Vr entre 5 a 5,2 em que não foi possível medir a amplitude de vibração devido a mesma sofrer um grande aumento em um curto espaço de Vr. As amplitudes máximas *in-line* e *cross* ocorreram para velocidades reduzidas distintas. Os pontos de maior amplitude estão na faixa de A/D entre 0,4 a 0,6. Após atingir um Vr acima de 10, a curva tende a estabilizar para um A/D igual a 0,05. A curva da amplitude *in-line* tende a estabilizar após atingir Vr acima de 9.

Direção	Amplitude máxima (cm)	A/D máxima	U (m/s)	Vr
<i>In-line</i>	0,32	0,13	0,040	5,36
<i>Cross</i>	1,38	0,55	0,047	6,33

Tabela 1: Relação da amplitude máxima e sua respectiva velocidade para cilindro rugoso

Para o experimento 2, com cilindro de PVC, verificou-se que a amplitude máxima na direção *in-line* ocorreu para um intervalo de velocidade reduzida de 5 a 6, enquanto a amplitude máxima na direção *cross* apresentou um intervalo de 6 a 7, como demonstrado no gráfico 2 e na tabela 2.

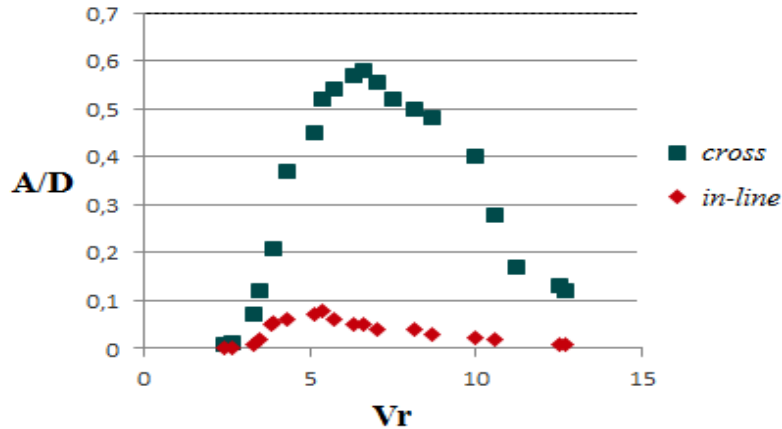


Gráfico 2: A/D versus Vr do cilindro de PVC

O gráfico 2 apresentou as amplitudes máximas *in-line* e *cross* para velocidades reduzidas distintas. Diferente do gráfico 1, foi possível medir as amplitudes em toda a extensão da curva. Os pontos de amplitude máxima representam em sua maioria um A/D na faixa de 0,5 a 0,6. Após atingir um Vr acima de 10, a curva tende a estabilizar para um A/D igual a 0,1. A curva da amplitude *in-line* tende a estabilizar para velocidade reduzida acima de 7.

Direção	Amplitude máxima (cm)	A/D máxima	U (m/s)	Vr
<i>In-line</i>	0,2	0,08	0,040	5,36
<i>Cross</i>	1,47	0,59	0,049	6,60

Tabela 2: Relação da amplitude máxima e sua respectiva velocidade para cilindro de PVC

Para o experimento 3, com cilindro de vidro, verificou-se que a amplitude máxima na direção *in-line* ocorreu para um intervalo de velocidade reduzida de 4,5 a 5,5, enquanto a amplitude máxima na direção *cross* apresentou um intervalo de 6 a 7, como exemplificado no gráfico 3 e na tabela 3.

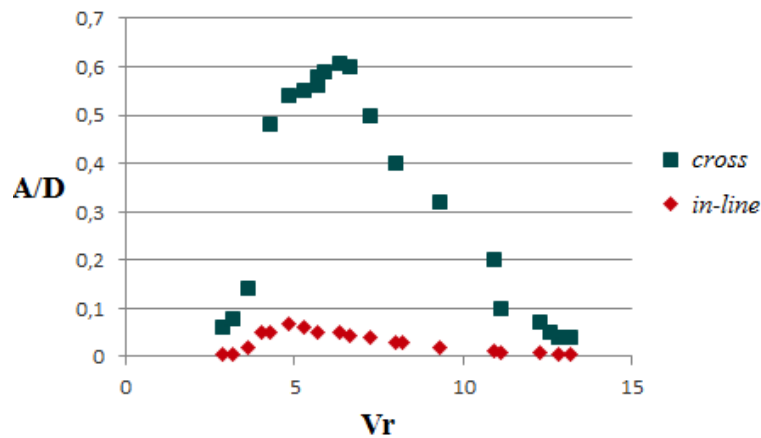


Gráfico 3: A/D versus Vr de cilindro de vidro

O gráfico 3 apresentou as amplitudes máximas *in-line* e *cross* para velocidades reduzidas diferentes. Semelhante ao gráfico 1, não foi possível medir as amplitudes por toda a extensão da curva, devido ao aumento da amplitude em uma pequena variação de velocidade. Os pontos de amplitude máxima representam, em sua maioria, um A/D na faixa de 0,5 a 0,6, concentrados em um pequeno intervalo de velocidade reduzida. Após atingir um Vr acima de 10, a curva tendeu a estabilizar para um A/D igual a 0,04. A curva da amplitude *in-line* tende a estabilizar para velocidade reduzidas acima de 7.

Direção	Amplitude máxima (cm)	A/D máxima	U (m/s)	Vr
<i>In-line</i>	0,2	0,08	0,037	4,86
<i>Cross</i>	1,52	0,61	0,051	6,45

Tabela 3: Relação da amplitude máxima e sua respectiva velocidade para cilindro de vidro

Tsahalis em 1984, conclui que a frequência de desprendimento de vórtices se aproxima da frequência natural do sistema a partir de Vr maiores que 5 e permanece próxima até Vr menor que 8, aproximadamente. Enquanto a vibração *in-line*, observada para cilindros com dois graus de liberdade, ocorre em velocidades reduzidas maiores que 4,5 e menores que 8^[3].

Tubo	A/D máxima <i>cross</i>	Vr <i>cross</i>	A/D máxima <i>in-line</i>	Vr <i>in-line</i>
Rugoso	0,55	6,33	0,13	5,36
PVC	0,59	6,60	0,08	5,36
Vidro	0,61	6,45	0,08	4,86

Tabela 4: Relação da amplitude máxima e sua respectiva velocidade para cada tipo de rugosidade

A tabela 4 apresenta os valores da A/D e suas respectivas velocidades, para *in-line* quanto *cross*. A amplitude *in-line* para o cilindro rugoso é 186% maior que a amplitude *in-line* do cilindro de PVC e de vidro, que foram iguais. A amplitude *cross* para o cilindro de vidro é 4% maior que a do cilindro de PVC e 10% maior que a amplitude *cross* do cilindro rugoso. As amplitudes máximas e suas velocidades reduzidas são diferentes para cada tipo de rugosidade do tubo. Esse achado é explicado pela diferença de interação fluido-estrutura, que sofre variação de acordo com o material do cilindro.

Observou-se maior inclinação do cilindro de acordo com o aumento de A/D. Apesar do coeficiente de arrasto do tubo de vidro ser pequeno, suas vibrações dinâmicas foram acentuadas. Já o tubo rugoso apresentou um coeficiente de arrasto alto, mas suas vibrações dinâmicas foram menores em relação ao tubo de vidro.

Alguns autores desenvolveram equações empíricas onde é possível calcular o valor de A/D, segundo Blevins^[2], não é possível obter valores de A/D maiores que 1,5. Ele propôs a seguinte expressão para a amplitude máxima *cross*:

$$\frac{A_y}{D} = \frac{0,07\gamma}{(1,9 + K_s)S^2} \sqrt{0,3 + \frac{0,72}{(1,9 + K_s)S}} \quad (2)$$

Onde K_s é o fator de estabilidade, S é o número de Strouhal e γ é o fator de modo adimensional.

Griffin e Ramberg^[2] desenvolveram uma expressão a partir de ajustes de ensaios. A expressão para a amplitude máxima é dada por:

$$\frac{A_y}{D} = \frac{1,29\gamma}{[1 + 0,43(2\pi S^2 K_s)]^{3,35}} \quad (3)$$

Sarpkaya^[2], por sua vez, desenvolveu sua fórmula a partir de métodos analíticos. A expressão para a amplitude máxima é dada por:

$$\frac{A_y}{D} = \frac{0,32\gamma}{\sqrt{0,06 + (2\pi S^2 K_s)^2}} \quad (4)$$

No presente estudo, verificou-se a acurácia destas equações e concluiu-se estarem próximas dos valores obtidos no laboratório. As equações acima não dependem da magnitude da corrente, são influenciadas pelo fator de modo adimensional, número de Strouhal e pela taxa de amortecimento, incluída no fator de estabilidade.

Para o cálculo da amplitude *cross* máxima do sistema, em que foram realizados os ensaios, encontrou-se um K_s igual a 0,036, considerando o amortecimento de 0,003 e o número de Strouhal igual a 0,2. Através desse fator de amortecimento obtiveram-se valores de A/D igual a 1,33 para equação de Blevins; 1,27 para a equação de Griffin e Ramberg; e 1,30 para a equação de Sarpkaya. Valores esses, acima dos verificados nos ensaios no laboratório de hidráulica, em torno de 0,60 para cada direção. A provável explicação para as diferenças dos valores são as limitações do canal de correntes.

O efeito da rugosidade na emissão de vórtices está relacionado com seus efeitos sobre a camada limite. A velocidade é considerada nula próxima a parede do cilindro, havendo

pouca perda de energia por fricção. No entanto, se as irregularidades nas paredes do tubo forem grandes o suficiente para ultrapassar a região de camada limite, passa a existir uma maior perda de energia por atrito^[1]. Com isso, o sincronismo de emissão de vórtices diminui conseqüentemente, diminuindo a amplitude de vibração *cross*. Por outro lado, o efeito da rugosidade aumenta a amplitude *in-line* devido ao aumento da força de arrasto na estrutura.

Associada a força de arrasto está o fenômeno de desprendimento de vórtices, para diferentes superfícies a emissão de vórtices pode ocorrer em pontos diferentes^[1], ou seja, em ângulos diferentes. Por isso, a velocidade onde ocorre a amplitude máxima pode variar, deslocando a curva do gráfico A/D versus Vr para direita ou esquerda.

Vandiver^[2] desenvolveu uma equação onde calcula as ampliações do coeficiente de arrasto devido às vibrações de um cilindro. Esta equação, representada abaixo, indica que quanto maior forem as amplitudes de vibração, maiores serão os coeficientes de arrasto.

$$C_{D,amp}(i) = 1.0 + 1.043 \left(2 \frac{y_{rms}(i)}{D} \right) \quad (5)$$

Onde $y_{rms}(i)$ é o valor RMS do deslocamento estrutural no nó i, que pode ser calculado por um programa dedicado de análise estrutural do fenômeno de VIV no domínio da frequência, denominado SHEAR7, desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), nos Estados Unidos.

A rugosidade pode modificar o regime de fluxo nas proximidades da parede do cilindro. Se esse regime for laminar, os desprendimentos de vórtices ocorrem a um ângulo α em torno de 82° e para os regimes turbulentos, para um ângulo β em torno de 120° ^[2], de acordo com a figura 3.

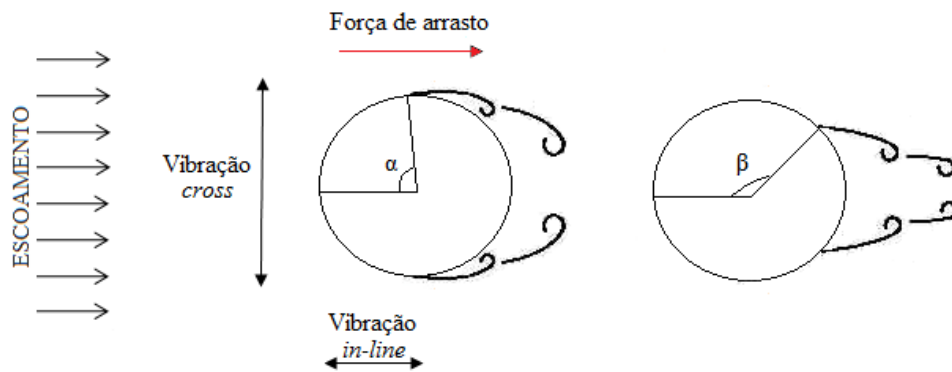


Figura 3: Ângulos de desprendimento de vórtices

4 LIMITAÇÕES

A principal limitação do estudo foi a variação de velocidade do canal de correntes, devido a instabilidade da válvula que regula a quantidade de água que entra no canal. Além disso, não foi possível identificar a regularidade cilíndrica do tubo rugoso. Outra limitação do estudo consistiu na impossibilidade de medir os coeficientes de arrasto dos cilindros, pois o laboratório não dispunha de um bloco de força.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo comprovou que a rugosidade é relevante para a análise das vibrações induzidas por vórtices. O efeito da rugosidade na emissão de vórtices está relacionado com seu efeito sobre a camada limite. Associada a força de arrasto, associada com a rugosidade da estrutura, o fenômeno de desprendimento de vórtices ocorreu para ângulos diferentes dependendo da rugosidade do cilindro, apesar de não ter sido possível precisar o quanto.

6 AGRADECIMENTOS

Agradeço à Maria Paula Bacan de Souza Paiva pela contribuição na correção gramatical do trabalho. Ao CNPq pelo auxílio financeiro através da bolsa de iniciação científica. À Universidade Católica de Petrópolis pelo apoio financeiro para montar o aparato de teste. Ao Prof^o Luiz Grinsztajn e ao Luís Fernando Barbosa pela colaboração para realizar os ensaios no laboratório de hidráulica.

7 REFERÊNCIAS

- [1] FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; Introdução à Mecânica dos Fluidos. LTC 5^a ed Rio de Janeiro, 1998.
- [2] FRANCISS, R. **Vibrações Induzidas por Vórtices em Membros Esbeltos de Estruturas Offshore Flutuantes**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. 1999.
- [3] SILVA, E. M. C. **Vibração Auto Induzida por Vorticidade**. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro 2007.
- [4] FUJARRA, A. L. C.; **Estudos Experimentais e Analíticos das Vibrações Induzidas pela Emissão de Vórtices em Cilindros Flexíveis e Rígidos**. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2002.
- [5] BEER F. P. JOHNSTON, E R. JR. Resistência Dos Materiais. Makron 3^a ed Rio de Janeiro, 1995.
- [6] VIKESTAD, K. **Multi-Frequency Response of a Cylinder Subjected to Vortex Shedding and Support Motions**. Ph. D. Thesis, Dept of Marine Structures, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegian, 1998.