

# IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DA VIBRAÇÃO INDUZIDA PELO ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDROS

Luiz Augusto Magalhães Endres<sup>1</sup>; Gustavo Takeshi Fujihara<sup>2</sup> & Marcelo Giulian Marques<sup>3</sup>

**Resumo** - Este trabalho apresenta resultados iniciais do projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado “Identificação de Padrões Vibratórios em Estruturas Hidráulicas por Ação de escoamentos”, estabelecido em convênio entre FURNAS Centrais Elétricas e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A montagem e aquisição de instalações e equipamentos adequados para estudo desse tipo requerem investigações cuidadosas quanto à qualidade de respostas obtidas visando o conhecimento das possibilidades de emprego dos mesmos. Estas investigações estão sendo feitas através da identificação do comportamento de cilindros, imersos em escoamento transversal, vinculados elasticamente de maneira a permitir a vibração induzida por processos hidrodinâmicos. As vibrações são medidas com a utilização de acelerômetros e os resultados obtidos, até o momento, demonstraram satisfatória adequação na aplicação do conjunto de medição revelando interessantes características do comportamento vibratório dos tubos, tais como o drástico aumento do amortecimento da vibração de estruturas em contato com a água, padrões regulares de vibração possivelmente associados a processos hidrodinâmicos e significativa alteração, em relação às características vibratórias previstas, para a estrutura em vibração quando realmente movimenta-se alternadamente.

**Abstract** - This work presents preliminary results from the developing and research project named “Identificação de Padrões Vibratórios em Estruturas Hidráulicas por Ação de Escoamentos”, established in agreement between FURNAS Centrais Elétricas and Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. The assembly and acquisition of adequate installations and equipments for this kind of study require careful investigations about the quality of results obtained with the aim of knowing its possibilities of use. These investigations are being done identifying circular cylinders’ behavior, subjected to cross flow, elastically fixed in order to allow hydrodynamic induced vibration. The vibrations are measured with the use of accelerometers and the already obtained results showed to be satisfactory in its appliance, revealing

<sup>1</sup> IPH / UFRGS, CP 15029, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, 51.33166669, 51.33167105, endres@iph.ufrgs.br

<sup>2</sup> IPH / UFRGS, CP 15029, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, 51.33166669, 51.33167105, gustavo.fujihara@ufrgs.br

<sup>3</sup> IPH / UFRGS, CP 15029, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, 51.33166405, 51.33167105, mmarques@iph.ufrgs.br

interesting features of the tubes' vibratory behavior like the severe increase in the vibration's damping of structures in contact with water, regular vibration patterns possibly associated to hydrodynamic processes and significant changes, compared to predicted characteristics, for the vibrating structure when it is really in alternate movement.

**Palavras-chave** - vibração; acelerômetro; cilindro

## **INTRODUÇÃO**

### **Caracterização do problema investigado**

As vibrações induzidas pelo escoamento sobre estruturas hidráulicas têm assumido uma importância crescente porque os projetistas estão, cada vez mais, empregando materiais em seus limites de aplicação tornando as estruturas progressivamente mais leves, mais flexíveis e, portanto, mais sujeitas à vibração.

Estas vibrações originam-se de diferentes fenômenos hidrodinâmicos e podem ser classificadas, conforme BLEVINS, 1990, pela natureza do escoamento e da estrutura. No caso de escoamentos permanentes esta classificação considera dois grupos de fenômenos: Instabilidades e Desprendimento de Vórtices. No caso dos escoamentos não permanentes admite-se três grupos de fenômenos: Senoidais, Aleatórios e Transientes.

Em torno de grande parte das estruturas hidráulicas ocorre escoamento com separação da superfície da estrutura o que seria indesejável se a diretriz principal de projeto dessas estruturas estivesse baseada em otimizar sustentação ou minimizar arrasto, como em componentes de aeronaves. No entanto, como os principais objetivos são, normalmente, suportar cargas e conter escoamentos, não é procurada otimização aerodinâmica e as vibrações induzidas pelo escoamento são, usualmente, consideradas como secundárias nos projetos ao menos até que uma falha ocorra e providências corretivas sejam necessárias.

### **Objetivo do trabalho**

O objetivo deste trabalho é apresentar os primeiros resultados obtidos na identificação de características da vibração de cilindros com fixação elástica submetidos a escoamento transversal permanente e uniforme em canal. Estes resultados, bem como sua complementação e análise que se encontram em andamento, fazem parte de projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado Identificação de Padrões Vibratórios em Estruturas Hidráulicas por Ação de Escoamentos,

estabelecido em convênio entre FURNAS Centrais Elétricas e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A pesquisa tem como objetivo implementar um sistema de medição de vibrações induzidas por escoamentos em modelo reduzido, visando contribuir para o estabelecimento de critérios de otimização do dimensionamento de estruturas hidráulicas submetidas a este fenômeno.

## FUNDAMENTOS

### Vibração induzida por vórtices

Segundo BLEVINS, 1990, estruturas imersas em escoamentos subsônicos provocam a formação e desprendimento de vórtices. Enquanto os vórtices são formados e desprendidos, em posições geometricamente opostas e de maneira alternada formando uma “esteira”, as pressões sobre a superfície variam provocando vibrações em estruturas elásticas. A vibração induzida pelo desprendimento de vórtices é de importância prática devido ao seu potencial efeito destrutivo em estruturas elásticas tais como pontes, torres, comportas e condutos em alto mar.

Enquanto a estrutura vibra sua orientação muda em relação ao escoamento e a força do fluido oscila. Se a força do fluido oscilante tende a aumentar a vibração a estrutura é hidrodinamicamente instável e podem resultar vibrações com amplitudes demasiadamente elevadas.

Para uma estrutura com geometria simples como um cilindro liso imerso em escoamento transversal ao eixo, a formação e desprendimento de vórtices é uma função do número de Reynolds (Re)

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

onde  $U$  é a velocidade do escoamento na corrente livre,  $D$  é o diâmetro da seção transversal do cilindro e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido. Em função desse parâmetro adimensional são classificados os diferentes regimes de escoamento que iniciam com o escoamento “sem separação” para  $\text{Re} < 5$ , passando pela faixa entre 300 e  $3 \times 10^5$  em que a “esteira de vórtices formada é plenamente turbulenta”, na qual situam-se os ensaios aqui relatados.

Ao longo de uma extensa faixa de valores do número de Reynolds verifica-se uma proporcionalidade adimensional praticamente constante, denominada número de Strouhal (S), entre a frequência predominante de desprendimento de vórtices ( $f_s$ ) e a razão entre a velocidade do escoamento na corrente livre e o diâmetro da seção transversal do cilindro

$$S = \frac{f_s D}{U} \quad (2)$$

Quando a vibração do cilindro na direção transversal ao escoamento de aproximação, ocorre com frequência igual ou próxima da frequência de formação e desprendimento de vórtices, exerce

efeito significativo sobre o processo em geral. Neste caso, a vibração do cilindro pode, entre outros fatos observados, aumentar a magnitude dos esforços sobre ele aplicados pelo escoamento e alterar fase, seqüência e características dos vórtices na esteira (BLEVINS, 1990).

### **Modelação hidroelástica**

A etapa posterior às investigações descritas nesse trabalho, em que foram utilizados tubos de seção transversal circular, é a aplicação do sistema montado para medição e análise de vibrações em modelos com semelhança elástica, aplicados a projetos de estruturas submetidas a cargas dinâmicas, induzidas pelo contato com escoamentos de características turbulentas, suscetíveis ao processo de vibração mecânica.

O processo de vibração de estruturas hidráulicas, induzida pelo escoamento de líquido em contato direto, é um fenômeno que pode ter conseqüências perigosas, causar fadiga de materiais e falha dos componentes de aproveitamentos, comprometendo seu funcionamento (NOVAK e ČÁBELKA, 1981).

A aplicação de modelos físicos é complementar à abordagem teórica, via de regra baseada na simplificação do comportamento real do fluido e da estrutura, uma vez que a solução analítica completa, normalmente, não é conhecida. Os modelos fornecem uma solução integrada mas, apenas, sob determinadas condições, quando comparados aos protótipos, tais como propriedades do fluido, reprodução simplificada dos contornos do escoamento e elasticidade do modelo.

Um conjunto de aspectos deve ser levado em conta em estudos do tipo aqui considerado: (a) no cálculo da resposta de uma estrutura submetida a uma carga dinâmica externa, não apenas sua elasticidade e massa devem ser consideradas mas, também, o efeito da massa de água adicionada durante o movimento; (b) a quantidade e distribuição do aumento de massa depende das características da vibração tais como freqüências e amplitudes; (c) o efeito de amortecimento da estrutura e a absorção de energia pela água deve, também, ser conhecido; e (d) no caso das vibrações estarem ligadas com a instabilidade das características do escoamento, os movimentos da estrutura podem influenciar o carregamento, fazendo surgir interação entre os esforços e o movimento (KOLKMAN, 1976).

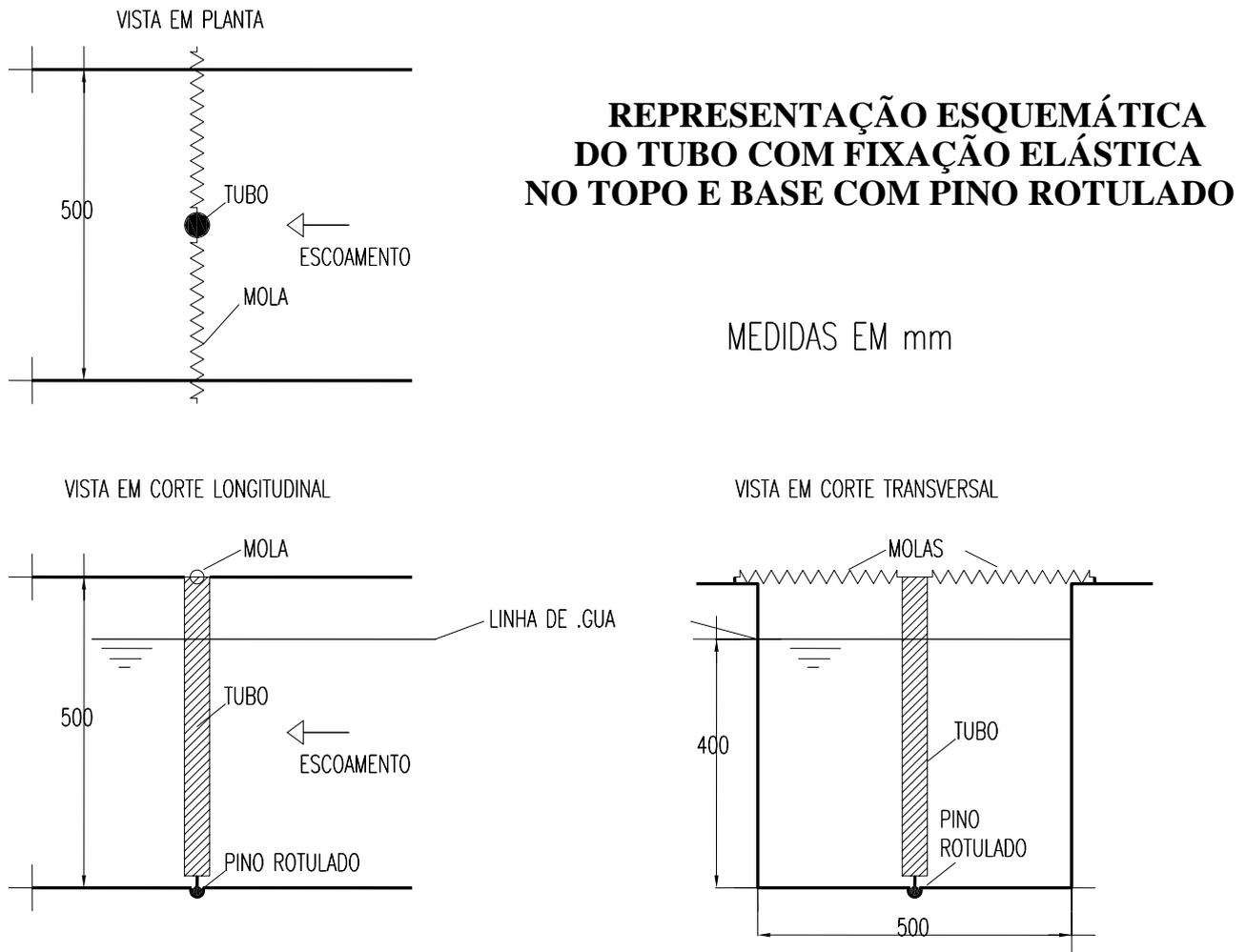
### **METODOLOGIA EMPREGADA**

As medições de vibração estão sendo realizadas com acelerômetros montados no topo de um tubo cilíndrico imerso no escoamento permanente e uniforme de água em canal livre.

O canal utilizado está localizado no Laboratório de Hidráulica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, construído em alvenaria de tijolos com um comprimento total de 36 m, declividade do fundo 2‰ e uma seção transversal constante de

0,5 m x 0,5 m. Após a câmara de alimentação e tranquilização do escoamento e um trecho com 10 m de comprimento, encontra-se a seção de testes com parede de vidro onde foi montado o tubo instrumentado para as medições. O abastecimento do canal se dá com emprego de um conjunto motor bomba comandado por inversor de frequência e vazão controlada por dois medidores eletromagnéticos, até um máximo de 250 l/s.

A figura 1 representa esquematicamente a montagem do tubo cilíndrico na seção de testes



**Figura 1:** Representação esquemática da montagem do tubo em planta e cortes na seção de testes do canal (sem escala).

Os tubos utilizados até o momento da preparação desse trabalho são em PVC e possuem diâmetros nominais (externos) de 20 mm, 25 mm, 32 mm e 40 mm sendo que os resultados apresentados serão relativos a este último. A montagem na seção de testes (figura 1) tem na base um pino rotulado que permite o movimento livre do tubo, pivotado em torno do ponto de fixação. No topo do tubo foram instalados dois acelerômetros com eixos de trabalho formando um ângulo de 90°, sendo um na direção do escoamento (longitudinal) e outro na direção normal ao escoamento

(transversal), e duas molas de tração na direção transversal ao escoamento principal do canal (figura 1) responsáveis pela vinculação elástica dos tubos.

Os acelerômetros utilizados são em número de dois, modelo 4393S marca Bruel & Kjaer com elemento sensível piezoelétrico e massa de 2,4 g. Os sinais condicionados obtidos a partir dos sensores foram adquiridos através de conversor analógico digital com resolução de 16 bits conectado a micro computador portátil, a uma frequência de amostragem igual a 20 Hz durante um intervalo de tempo igual a 102,4 s.

Em torno do tubo montado na seção de testes escoaram diferentes vazões, sempre com o nível de água posicionado a, aproximadamente, 0,4 m (figura 1), com o auxílio de uma comporta de controle de níveis instalada na saída do canal.

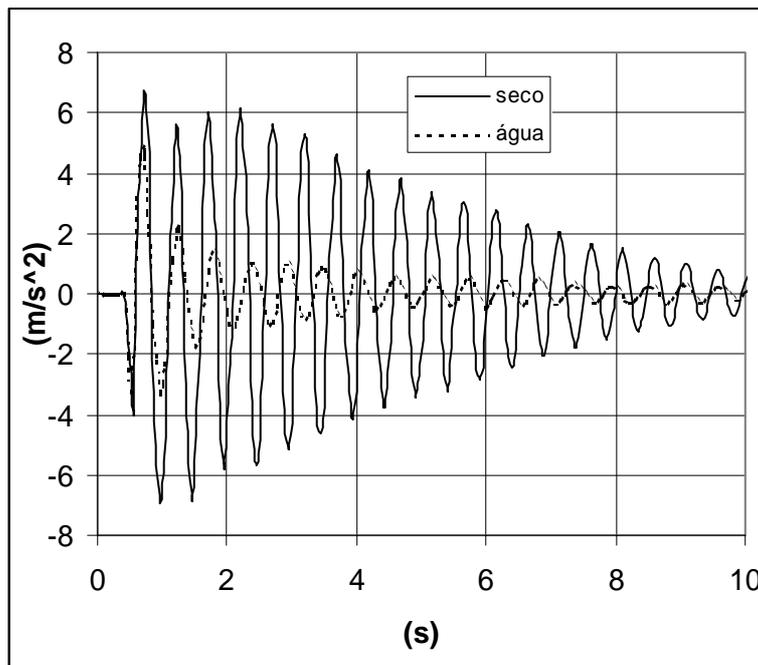
As amostras do comportamento vibratório dos tubos foram registradas em meio magnético e posteriormente analisadas segundo técnicas descritas em BENDAT e PIERSOL, 1986 e ENDRES, 1997, entre outros, para comparação com os padrões esperados nessa situação de escoamento. Dessa maneira está sendo possível verificar a adequação e desempenho do sistema de medição e análise de vibrações constituído, aplicado a um primeiro conjunto de estruturas de comportamento mais simples (os cilindros) para posterior emprego em modelos reduzidos de estruturas hidráulicas, conforme o objetivo da pesquisa na qual este trabalho está inserido.

## **RESULTADOS OBTIDOS**

Os resultados a seguir apresentados são referentes ao tubo com diâmetro nominal de 40 mm, tendo sido medidos diâmetro efetivo de 40,4 mm, massa total do conjunto em oscilação igual a 0,43 kg e massa de água adicionada equivalente a 0,49 kg.

### **Frequências naturais de vibração**

Com o tubo montado na seção de testes, conforme representado na figura 1, foram identificadas as frequências naturais de vibração transversal do conjunto a seco e imerso em água parada. O trecho inicial do registro com 10 s está representado na figura 2.

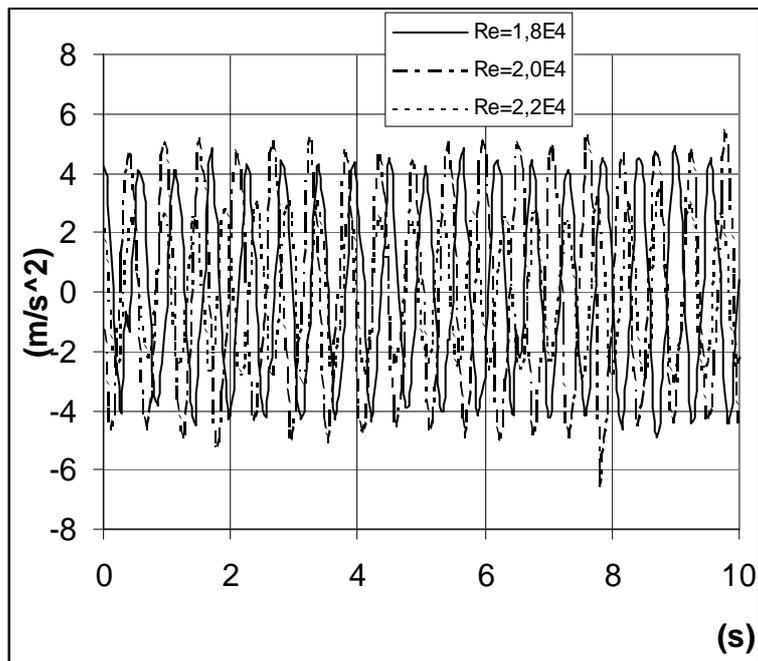


**Figura 2:** Trechos dos registros dos decaimentos naturais das vibrações do tubo com 40 mm de diâmetro, a seco e em água parada.

A partir da análise desse registro é possível verificar o significativo aumento ocorrido no amortecimento do conjunto quando em contato com a água. Quanto às frequências naturais de vibração, o resultado obtido na situação a seco, igual a 2,0 Hz, foi levemente reduzido no caso com imersão em água para 1,8 Hz, com base nos parâmetros adotados para a análise espectral efetuada. Esta redução está em acordo com o fato de que uma parcela de massa de água movimenta-se junto com o tubo, aumentando o total deslocado.

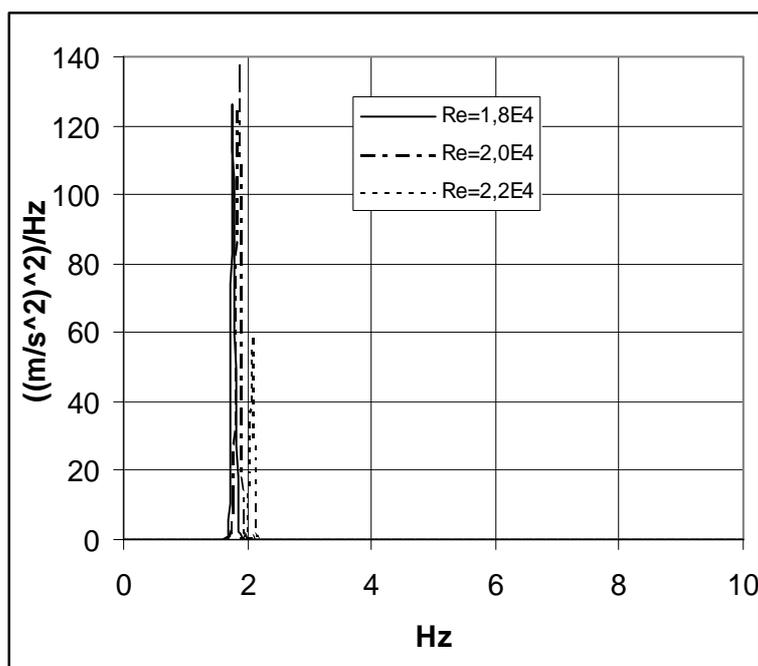
### **Características da vibração transversal dos tubos induzida pelo escoamento**

A vibração do tubo induzida pelo escoamento caracterizado por números de Reynolds até  $6,0E3$  (a partir deste ponto e ao longo de todo o texto esta será a representação típica utilizada para números no formato  $6,0 \times 10^3$ ) apresenta padrão bastante irregular com amplitudes muito reduzidas. A partir deste valor passam a surgir resultados como os apresentados na figura 3, com característica bastante regular de oscilação e amplitudes significativas, indicando a proximidade do acoplamento entre o comportamento mecânico do conjunto em vibração e o principal fenômeno hidrodinâmico responsável por esta movimentação, provavelmente, o processo de formação e desprendimento de vórtices na esteira do tubo.



**Figura 3:** Trechos dos registros das vibrações regulares do tubo com 40 mm de diâmetro, imerso em diferentes situações de escoamento, caracterizadas pelo número de Reynolds (Re).

Os resultados da análise espectral dos registros apresentados, com as maiores amplitudes de aceleração, estão na figura 4. O aspecto suave dos gráficos reforça a afirmação sobre a ocorrência predominante de um fenômeno hidrodinâmico periódico sendo responsável pela movimentação do tubo.



**Figura 4:** Densidade espectral das vibrações regulares do tubo com 40 mm de diâmetro, imerso em diferentes situações de escoamento, caracterizadas pelo número de Reynolds (Re).

As amplitudes dos picos nos espectros permitem identificar as oscilações periódicas com diferentes amplitudes de aceleração, conforme já era possível observar na figura 3.

Os valores do número de Reynolds, as frequências predominantes observadas em cada registro e os valores do número de Strouhal (S) estão apresentados na tabela 1. Para comparação são apresentadas, também, as frequências calculadas para o processo de desprendimento de vórtices na esteira do tubo, adotando o valor 0,2 do número de Strouhal, aceito como praticamente constante nesta faixa de números de Reynolds investigada (BLEVINS, 1990).

**Tabela 1:** Parâmetros característicos dos resultados via análise espectral das vibrações do tubo.

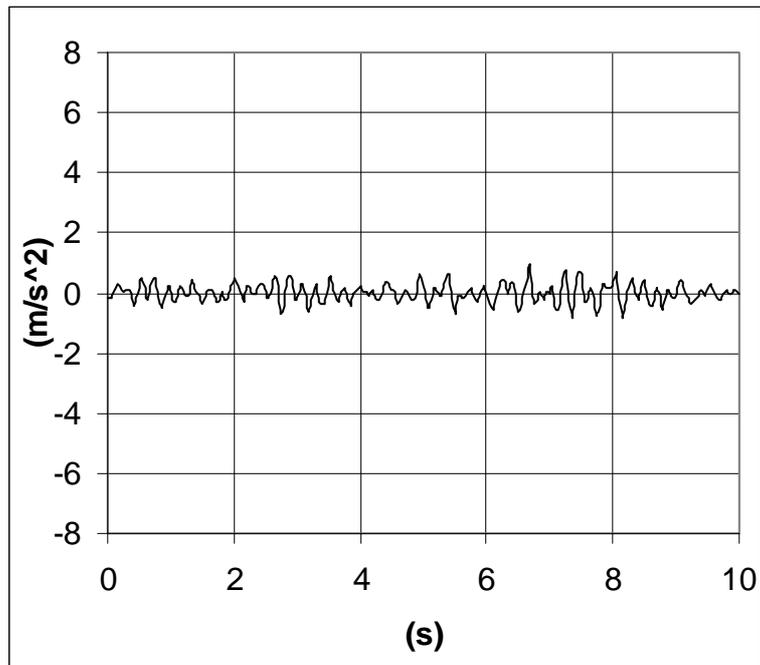
Número de Reynolds	Frequência predominante observada	Número de Strouhal	Frequência calculada com S=0,2
(-)	(Hz)	(-)	(Hz)
1,8E4	1,76	0,16	2,23
2,0E4	1,84	0,15	2,50
2,2E4	2,07	0,15	2,75

Conforme apresentado, as frequências predominantes crescem com o valor do número de Reynolds mas o número de Strouhal permanece, praticamente, constante. Além disso, existe diferença significativa entre a frequência calculada para ocorrência do fenômeno hidrodinâmico principal e da vibração efetiva do tubo. Esta diferença pode ser explicada, em parte, pelas diferenças entre as condições de escoamentos necessárias para supor número de Strouhal constante igual a 0,2 e as verificadas no canal como, por exemplo, o efeito das paredes próximas ao tubo.

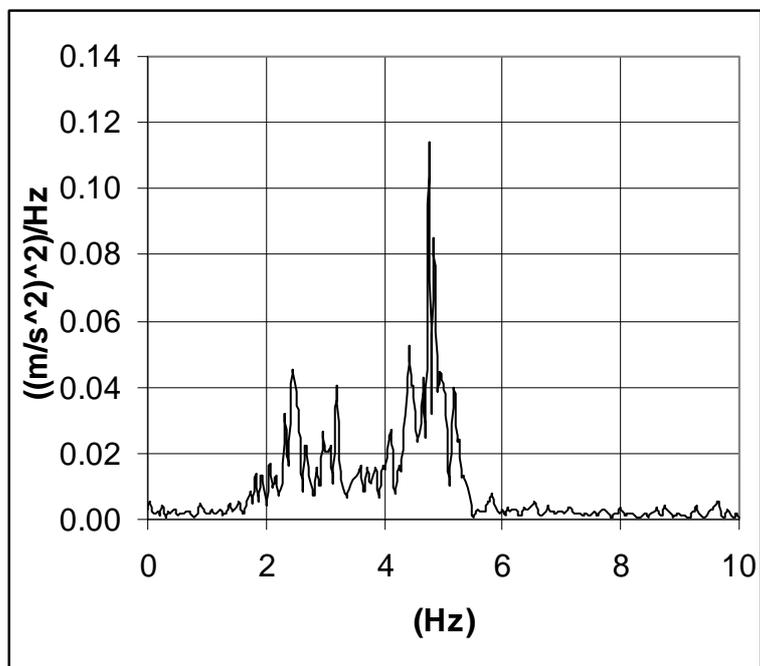
Com o aumento da energia hidráulica fornecida pelo escoamento altera-se o comportamento vibratório do tubo. As amplitudes da aceleração são bastante reduzidas e surge uma certa irregularidade no movimento. Na figura 5 é apresentado o padrão de oscilação correspondente ao número de Reynolds igual a 4,0E4.

Na figura 6 é apresentado o diagrama de densidade espectral relativo ao escoamento com número de Reynolds de 4,0E4.

A frequência associada ao maior pico no espectro é 4,41 Hz que corresponde a um número de Strouhal calculado de 0,18. O resultado apresentado é caracterizado por um traçado mais áspero do diagrama o que reflete o comportamento vibratório do tubo com oscilações mais rápidas e com menores amplitudes de aceleração. Neste caso é possível identificar que não mais ocorre o processo de ressonância verificado nas situações anteriores, apresentadas nas figuras 3 e 4, dando lugar aos processos associados às oscilações aleatórias do escoamento turbulento. Neste caso, possivelmente, deixa de haver o acoplamento entre a frequência natural de vibração do tubo e a frequência de indução à vibração por formação e desprendimento de vórtices na esteira.



**Figura 5:** Trecho do registro das vibrações do tubo de 40 mm de diâmetro, imerso em escoamento, caracterizado pelo número de Reynolds igual a 4,0E4.



**Figura 6:** Densidade espectral das vibrações do tubo com 40 mm de diâmetro, imerso em escoamento, caracterizado pelo número de Reynolds igual a 4,0E4.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto de instrumentos montado durante o projeto de pesquisa cujos resultados iniciais estão aqui, em parte, apresentados, visando identificação de vibrações de uma estrutura, induzida por escoamento na qual está imersa, mostrou-se adequado para a faixa de trabalho proposta.

Foi possível verificar o significativo aumento ocorrido no amortecimento da estrutura, constituída pelo cilindro e fixação elástica, quando em contato com a água. Frequências naturais de vibração de estruturas parecem ser reduzidas quando uma massa de água movimenta-se junto com a mesma, submetida a uma mesma energia do escoamento.

Em torno de determinados valores do número de Reynolds do escoamento ocorre acoplamento entre a frequência predominante do fenômeno hidrodinâmico responsável pela movimentação periódica da estrutura e a frequência de vibração desse movimento. Esta frequência não parece corresponder com rigor às previsões efetuadas com base em modelos de proporcionalidade governados pelos números adimensionais de Reynolds e de Strouhal calculados para o escoamento. Motivos prováveis para este fato são que o tubo vibra no interior do canal e altera de maneira drástica o escoamento tornando previsível esta falta de correspondência entre os processos e diferentes condições de escoamento no canal e no modelo de escoamento com paredes infinitamente distantes.

Quando deixa de haver proximidade ou coincidência entre as frequências características dos processos mecânico e hidrodinâmico as amplitudes de vibração parecem ser, inicialmente, reduzidas e o padrão regular toma aspecto semelhante ao de oscilações aleatórias sendo acrescentadas parcelas de energia em faixas mais largas de frequência nos gráficos de densidades espectrais.

Com a continuidade da pesquisa que investigará outros diâmetros de tubos e levando em conta diferentes massas dos conjuntos em vibração, bem como diferentes tipos de vinculação elástica alterando parâmetros de rigidez das molas utilizadas, as afirmações aqui contidas poderão ser confirmadas ou alteradas. Deverá, também, ser realizada revisão bibliográfica aprofundada sobre o tema para obtenção de maior embasamento de afirmações ou conclusões aqui estabelecidas. A aplicação desses resultados, após consistidos e depurados de forma adequada, a modelos reduzidos de estruturas hidráulicas, conforme está previsto na continuidade dos trabalhos do projeto de pesquisa, deverá passar pela compreensão das complexas técnicas experimentais que permitem a obtenção de razoável semelhança hidroelástica entre sistemas.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas pelo suporte financeiro e à FAURGS e Secretaria Administrativa do IPH pelo apoio logístico no desenvolvimento desta pesquisa.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BENDAT, J. S., PIERSOL, A. G. **Random data** : analysis and measurement procedures. 2nd. ed. New York : John Wiley & Sons, 1986
- BLEVINS, R. D. **Flow induced vibration**. 2nd. ed. New York : Van Nostrand Reinhold, 1990.
- ENDRES, L. A. M. **Análise experimental do campo de pressões flutuantes em bancos de tubos submetidos a escoamento transversal turbulento**. Tese de Doutorado, Porto Alegre : PROMEC/UFRGS, 1997.
- KOLKMAN, P. A. **Models with elastic similarity for the investigation of hydraulic structures**. Pub. n. 164, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, 1976.
- NOVAK, P., ČÁBELKA, J. **Models in hydraulic engineering**. London, Pitman, 1981.