

# Padrões de Vibração em Estruturas Hidráulicas por Ação de Escoamentos

L. A. M. Endres, M. G. Marques, M. Romagnoli, A. Lapolli, IPH/UFRGS, J. C. Q. Bastos, FURNAS

**Resumo**—O presente trabalho trata de uma análise experimental comparativa entre características de vibração induzida por escoamentos sobre estruturas, especificamente cilindros e comportas. Este tema tem importância crescente na otimização de projetos de estruturas hidráulicas e sua complexidade é significativa devido à inexistência de critérios unificados. Foram empregados cilindros e uma comporta plana vertical com diferentes terminais, em contato com o escoamento em canal, sendo medidas acelerações do movimento induzido. O emprego dos cilindros serviu, principalmente, para a verificação da eficiência do sistema de medições implementado que mostrou ser adequado. O estudo com a comporta, baseado principalmente na análise de diagramas de densidade espectral das acelerações, revelou que as aberturas críticas estão abaixo de 20 mm e o terminal retangular está associado à vibração mais intensa em oposição ao terminal de 60°, provavelmente devido à existência de uma aresta de saída que amplifica a instabilidade na região inferior do terminal retangular.

**Palavras-chave**—aceleração, cilindro, comporta, vibração.

## I. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta, em linhas gerais, o andamento e resultados alcançados no projeto de pesquisa e desenvolvimento sobre a identificação de Padrões de Vibração em Estruturas Hidráulicas por Ação de Escoamentos, visando a utilização no dimensionamento e planejamento de usinas hidrelétricas, em atendimento às disposições da Lei n.º 9991, de 24 de julho de 2000.

O projeto foi contratado entre Furnas Centrais Elétricas e a Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, executado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## II. OBJETIVOS

O objetivo da pesquisa a que este trabalho se refere é o de implementar um sistema de medição de vibrações induzidas por escoamento de líquidos e empregá-lo em investigações realizadas em modelo hidráulico verificando sua aplicabilidade.

As investigações incluem a identificação de características no comportamento vibratório de cilindros e comportas, submetidos a escoamento em canal aberto.

## III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### A. Introdução

Nos tempos primitivos, a água era represada por pequenas barragens e encaminhada até o lugar de sua utilização por meio de canais. Durante as épocas de chuvas intensas, a água excedente, era descarregada por cima da barragem. Em uma evolução natural, foram construídas barreiras móveis que podiam ser removidas de sua posição de represamento, para dar passagem à água em excesso permitindo maior segurança e flexibilidade de operação às obras hidráulicas.

As barreiras eram formadas por um par de pilares de pedra sulcados ao longo da altura e fixados em ambos os lados do canal, e tendo nos sulcos troncos de árvore colocados horizontalmente. Mais tarde, os troncos passaram a ser unidos formando uma barreira única, semelhante às comportas atuais, que podia ser levantada ou baixada como a lâmina de uma guilhotina.

Com a necessidade de construção de represas cada vez maiores, por volta de 1850, surgem as primeiras comportas metálicas e ocorrem as grandes invenções e desenvolvimentos dos tipos existentes na atualidade.

Estes tipos de estruturas, fundamentalmente instaladas em galerias sob pressão ou empregadas no controle de descargas de fundo, são propensas, em determinadas faixas de aberturas, à ocorrência de fenômenos vibratórios os quais podem causar deformações que comprometam tanto a operação do conjunto como a estabilidade global da estrutura [1].

Conseqüentemente, desde que este fenômeno de vibração induzida constitui um elemento importante para o projeto deste tipo de estruturas é essencial o melhor entendimento possível de suas características mais relevantes.

### B. Vibrações induzidas por ação de escoamentos

O estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças que lhes são associadas. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração.

Deste modo, a maior parte das estruturas está sujeita a certo grau de vibração [2].

O escoamento em torno de estruturas pode causar, tanto vibrações destrutivas, como deformações não desejadas. Escoamento e estrutura estão ligados através da força exercida sobre a estrutura pelo escoamento [3].

Dependendo da natureza da estrutura envolvida, complexos mecanismos de excitação podem ser os

---

Este trabalho foi apoiado por Furnas Centrais Elétricas.

L. A. M. Endres é professor/pesquisador no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS (endres@iph.ufrgs.br).

M. G. Marques é professor/pesquisador no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS (mmarques@iph.ufrgs.br).

M. Romagnoli é aluno de mestrado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS (martinromagnoli@hotmail.com).

A. Lapolli é aluno de graduação na Escola de Engenharia/UFRGS (alcamarlapolli@hotmail.com).

J. C. Q. Bastos é engenheiro em Furnas Centrais Elétricas (jbastos@furnas.com.br).

responsáveis pelas forças intervenientes no processo. Pode ser esta uma razão pela qual a bibliografia disponível esta geralmente orientada a estruturas com relativo grau de simplicidade como, por exemplo, cilindros ou prismas retangulares.

Poucos estudos são encontrados a respeito de estruturas mais complexas, como comportas por exemplo. Segundo [4], ainda não é conhecida uma explicação detalhada para os mecanismos de excitação nestas estruturas.

Segundo a referência [5] vibrações induzidas por escoamentos estão sendo tratadas por diferentes disciplinas e, geralmente, sem intercâmbio de informação, o que se traduz em falta de uniformidade de critérios para sua abordagem. Não restam dúvidas de que este fato representa, de alguma maneira, uma dificuldade extra no estudo deste tipo de problema, constituindo-se mais um obstáculo para as pesquisas neste tema.

### C. Mecanismos básicos de excitação induzida

Um fator que dificulta a análise de vibrações induzidas por escoamentos é a variedade de mecanismos de excitação responsáveis pelas mesmas, os quais podem atuar tanto individualmente como em combinação. Não existe um critério uniforme para sua classificação geral. A referência [3] diferencia, basicamente, os fenômenos de excitação segundo a natureza do escoamento e da estrutura, enquanto que [5] baseia sua classificação na origem da fonte de excitação, independentemente da estrutura e do escoamento.

Existem, fundamentalmente, três mecanismos básicos de excitação diferentes [5], independentemente de o sistema oscilador ser a estrutura (corpo oscilador) ou o fluido (fluido oscilador), que são Excitação induzida externa (EIE, “*Extraneous Induced Excitation*”), Excitação induzida pela instabilidade (IIE, “*Instability Induced Excitation*”) e Excitação induzida pelo movimento (MIE, “*Movement Induced Excitation*”).

### D. Vibrações induzidas por ação de escoamentos sobre comportas

Os principais mecanismos responsáveis pelas vibrações em comportas são diversos e complexos na prática. Dependendo do mecanismo de excitação predominante, diferentes tipos de vibrações podem ocorrer. Comportas planas com descarga de fundo com um grau de liberdade foram estudadas por [4], [6] e [7], em referência a vibrações verticais e, por [4] e [8], no que diz respeito a vibrações horizontais. Um modelo de comporta com dois graus de liberdade foi estudado por [9].

Segundo a referência [4] uma das fontes mais frequentes de vibrações neste tipo de estruturas é devida à condição de instabilidade na separação e recolamento do escoamento na calha inferior da comporta.

A referência [6] atribui a vibração induzida em uma comporta de calha inferior plana à periodicidade no recolamento do escoamento que se separa da aresta ou borda principal.

Os autores na referência [9], destacam como característica principal da vibração induzida, sobre comportas com descarga de fundo, a excitação devida tanto à instabilidade como à deflexão da camada de cisalhamento. Os mesmos autores apontam para uma comporta de calha inferior plana e separação do escoamento na aresta principal, que a excitação devida ao “impinging leading edge vortex” (ILEV) e a excitação induzida pelo movimento (MIE) são as

mais significantes. A excitação tipo ILEV é devida à instabilidade da camada de cisalhamento, a qual é amplificada na presença da aresta final ou de saída da comporta.

Não existe ainda um critério uniforme quanto aos mecanismos de excitação de vibrações neste tipo de estrutura. Segundo [4], mecanismos de excitação induzida pela instabilidade (IIE) ocorrem em faixas de velocidades reduzidas baixas,  $V_r < 10$ , enquanto que a excitação induzida pelo movimento (MIE) geralmente ocorre em faixas de velocidades reduzidas maiores,  $5 > V_r > 60$  [7].

O parâmetro adimensional referido, a velocidade reduzida, que caracteriza este tipo de vibrações é definido por

$$V_r = \frac{\sqrt{2g\Delta h}}{f d} \quad (1)$$

onde  $\Delta h$  é a diferença de níveis a montante e jusante da comporta,  $f$  frequência de vibração e  $d$  a espessura da comporta. Outro parâmetro adimensional de importância na descrição das vibrações é o número de Scruton.

$$S_c = \frac{4\pi m \zeta}{\rho d^2 l} \quad (2)$$

onde  $m$  é a massa da estrutura,  $\zeta$  a razão de amortecimento,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $d$  a espessura e  $l$  a largura da comporta.

Esta última relação, chamada também de amortecimento reduzido ou amortecimento de massa (“mass-damping”) representa um dos parâmetros mais relevantes quanto às propriedades estruturais [7] e, de importância no que diz respeito às vibrações induzidas. Conforme a referência [3] o aumento deste parâmetro reduz as amplitudes das vibrações.

## IV. CANAL E INSTALAÇÕES AUXILIARES

Os experimentos foram conduzidos em um canal de seção transversal retangular, especialmente construído. O comprimento total é de 34,4 m, declividade longitudinal do fundo 0,2 %, largura 1 m e altura total (mínima) 1,2 m construído, basicamente, em alvenaria de tijolos e concreto. Distante 10 m do início do canal está a seção de testes, caracterizada por uma parede lateral em vidro transparente, com comprimento de 2 m, largura útil de 0,5 m e profundidade útil do escoamento até 0,5 m.

A seção de testes dispõe de um conjunto de tomadas de pressão, na linha central junto ao fundo, conectadas a piezômetros.

Uma comporta a jusante, para controle de níveis de água no canal, foi confeccionada no tipo “guilhotina”, com fuso e volante e movimento vertical.

O conjunto principal de equipamentos empregados no desenvolvimento da pesquisa é constituído por: micro computador portátil; conversor analógico - digital com resolução de 16 bits e 16 canais simples ou 8 canais diferenciais de entrada com faixas de entrada analógica programáveis e tempo máximo de conversão 5  $\mu$ s; medidores de vazão eletro - magnéticos nos diâmetros nominais de 50 mm e 250 mm com faixas de vazão entre 2,38 e 71,27 m<sup>3</sup>/h e 56 e 1675 m<sup>3</sup>/h, respectivamente; acelerômetros miniatura (3 unidades) com limite máximo de

frequência 16,5 kHz, frequência de ressonância 55 kHz, elemento sensível piezoelétrico e peso de 2,4 g; e condicionador /amplificador de sinais com 4 canais de entrada seleção de ganho e filtros analógicos.

## V. ENSAIOS DA ETAPA I - CILINDROS

### A. Ensaio no canal livre

A primeira seqüência de ensaios realizada foi denominada **Ensaio no Canal Livre**, e teve como objetivo obter validação do uso e informações preliminares sobre o conjunto composto pelo sistema de bombeamento, tubulação, medidores de vazão e canal.

Os resultados permitiram identificar as mais diversas situações desde distribuições uniformes de velocidades na seção até concentrações de velocidades mais elevadas em pontos fora do centro da seção transversal. Esta não uniformidade é descrita em trabalhos clássicos sobre canais abertos, que salientam ser o escoamento em canais prismáticos retilíneos, de fato, tridimensional, com as partículas de fluido apresentando um movimento em hélice, embora a componente de velocidade na direção transversal ao canal seja, normalmente, reduzida e podendo ser desconsiderada na maioria dos casos. Este efeito tem, como uma de suas causas, perturbações na entrada do canal, normalmente inevitáveis, que ocorram próximas à seção de medições.

### B. Ensaio com fixação rígida dos cilindros

A segunda seqüência de ensaios foi denominada **Ensaio com Fixação Rígida dos Cilindros**, cujo objetivo foi obter informações sobre características do escoamento no canal equipados com os acessórios selecionados para teste do sistema de medição de vibrações, quais sejam, os cilindros, sem, no entanto, possibilidade de vibração.

A seleção de cilindros (seção transversal circular) empregou pequenos tubos de PVC para água, classe 15, montados na vertical, formando um ângulo de 90° com a direção do escoamento principal. Foi utilizada uma série de diâmetros nominais, disponível comercialmente, que corresponde ao diâmetro externo do cilindro. Estes diâmetros são, em mm, 20, 25, 32, 40, 50, 60, 75, 85 e 110.

Cada ensaio constou de uma vazão e um nível de água mantido constante. Durante os ensaios foram medidas velocidades médias com uma sonda de Pitot-Prandtl em uma série de pontos, em três seções transversais a jusante do tubo, sempre no interior do trecho de testes. A primeira seção dista do tubo 1 vez seu diâmetro, a segunda dista 3 vezes o diâmetro e a terceira, em princípio, dista 10 vezes o diâmetro do tubo.

As mais diferentes situações de escoamentos foram verificadas no decorrer desses ensaios. Com vazão no canal de 50 l/s e tubo com diâmetro 20 mm, as velocidades não ultrapassam 0,25 m/s e a 10 diâmetros de distância do cilindro utilizado é praticamente imperceptível a influência do bloqueio dele resultante.

Por outro lado, com vazão no canal de 200 l/s e tubo com diâmetro 20 mm, as velocidades estão em torno de 1,0 m/s e, mesmo a uma distância igual a 10 vezes o diâmetro do tubo, ainda é visível a perturbação provocada no campo de velocidades. A retomada de condições uniformes mostra ser dificultada com o aumento da vazão, para uma mesma estrutura submersa.

Com vazão no canal de 200 l/s e tubo com diâmetro 60 mm, percebe-se um gradiente de velocidade bastante abrupto, tanto na vertical quanto na horizontal, na seção imediatamente a jusante do tubo. Apesar disso, na seção mais distante é possível identificar razoável simetria na comparação entre as laterais do tubo.

### C. Ensaio com fixação elástica dos cilindros

A terceira e última seqüência de ensaios realizada na Etapa I foi denominada **Ensaio com Fixação Elástica dos Cilindros**, cujo objetivo foi empregar e verificar o desempenho do sistema de medição de vibrações montado.

Os ensaios foram realizados com os cilindros vinculados elasticamente à estrutura do canal (figura 1) de maneira que era possível movimentar-se.



Figura 1: Aspecto da fixação elástica do cilindro no canal

A vibração do tubo, induzida pelo escoamento, em uma faixa inicial de valores de números de Reynolds apresentou padrão bastante irregular com pequenas amplitudes. A seguir passou a surgir resultados com característica bastante regular de oscilação transversal e amplitudes da aceleração 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.

Os valores das 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 a ocorrência do fenômeno hidrodinâmico principal e da vibração efetiva do tubo. Esta diferença pode ser explicada, em parte, pelas diferenças entre as condições de escoamento necessárias para supor número de Strouhal constante e igual a 0,2 e as verificadas no canal como, por exemplo, o efeito das paredes próximas ao tubo.

Para vazões maiores, com o aumento da energia fornecida pelo escoamento, altera-se o comportamento vibratório do tubo. As amplitudes da aceleração tornam-se bastante reduzidas e passa a surgir uma certa irregularidade no movimento. Neste caso é possível identificar que o processo de ressonância, verificado nas situações anteriores, não mais ocorre com a mesma intensidade dando lugar aos processos associados às oscilações aleatórias induzidas pelo escoamento turbulento. Neste caso, possivelmente, é reduzido o efeito do processo de acoplamento entre a

freqüência natural de vibração do tubo e a freqüência de indução à vibração por formação e desprendimento de vórtices na esteira.

A partir do registro de freqüência natural de vibração foi possível verificar o significativo aumento ocorrido no amortecimento da vibração dos conjuntos quando em contato com a água. Quanto às amplitudes, o resultado obtido na situação a seco foi reduzido quando na imersão em água. Esta redução está em acordo com o fato de que uma parcela de massa de água movimentava-se junto com o tubo, aumentando a massa total deslocada.

A comparação dos resultados aqui obtidos com o esperado, a partir dos levantamentos bibliográficos realizados, demonstra a perfeita adequação do sistema de medição de vibrações, nos diferentes aspectos envolvidos, tais como reduzida massa dos acelerômetros, comprimento de cabos, faixas de seleção da sensibilidade das medições, filtros analógicos disponíveis, freqüências de aquisição, faixas de trabalho, resolução da representação digital de tensões, número de canais simultâneos, facilidades de registro e acesso aos dados, entre outros.

Estas avaliações fecharam o primeiro ano da pesquisa que, conforme esperado, demonstrou acerto na escolha dos diversos componentes adquiridos e permitiu caracterizar as possibilidades e limitações de emprego do sistema na aplicação prevista para o segundo ano da pesquisa, então com a estrutura hidráulica.

## VI. ESTRUTURA HIDRÁULICA

Visando os trabalhos previstos para o segundo ano da pesquisa foi construída a estrutura hidráulica cujo comportamento, quando submetida ao escoamento, deveria ser caracterizado. Foi selecionada uma comporta representada por uma placa plana de alumínio, medindo 800x501x20 mm, posicionada na vertical no interior da seção de testes, que pode ter montados em seu extremo inferior diferentes terminais, que ficam em contato com o escoamento que se dá entre a comporta e o fundo do canal (figura 2).

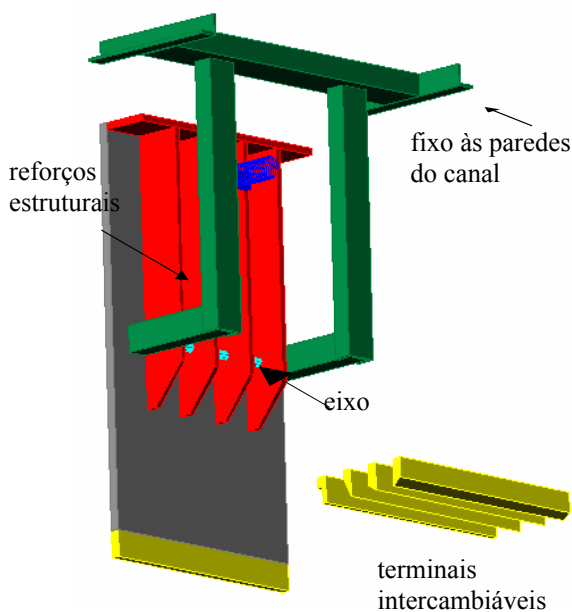


Figura 2: Perspectiva esquemática da comporta para estudo de vibrações

Os terminais empregados foram (a) retangular (RET), (b) em ângulo de 60° (60d), (c) em "ELE" invertido, (d) em ângulo de 30° (30d) e (e) em ângulo de 30° invertido (30i), conforme esquema na figura 3.

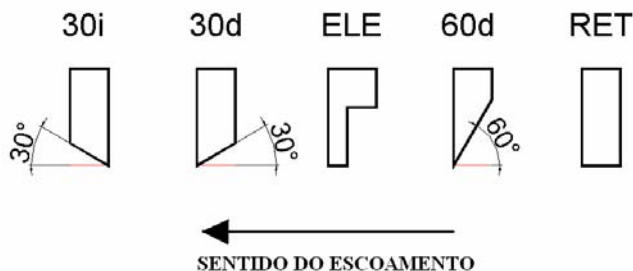


Figura 3: Representação esquemática dos terminais intercambiáveis

A fixação elástica da comporta foi obtida através de um conjunto composto por molas tracionadas e uma barra comprimida, ajustado para impor ao sistema uma freqüência natural de vibração (em ar) na faixa selecionada para a investigação (figura 4).



Figura 4: Aspecto da fixação elástica da comporta montada com molas de tração e barra de compressão, em vista de jusante

Todas as peças responsáveis pelo suporte e fixação da comporta ao canal são metálicas e permitiram seu livre movimento de giro em torno do eixo.

## VII. ENSAIOS DA ETAPA II - COMPORTA

Os ensaios para medição de vibrações da comporta tiveram as seguintes características:

- Aberturas da comporta:  $\delta = 10, 20, 30$  e  $40$  mm;
- Vazões no canal (Q): em geral, a partir de 7 litros por segundo, aumentando a cada 5 l/s até atingir o limite operacional de nível de água no canal;
- Limites de nível de água mínimo, com jato livre, e máximo, em torno de 0,60 m a montante da comporta;

Nos ensaios realizados, para cada terminal da comporta e abertura em relação ao fundo ( $\delta$ ), a vazão no canal (Q) foi um dos parâmetros controlados em conjunto com a posição da comporta auxiliar de jusante (hc). Após estabelecido o equilíbrio entre os níveis de montante (Nm) e jusante (Nj) as acelerações que caracterizam a vibração da comporta, com



movimento horizontal (direção do escoamento principal), foram registradas.

As diferentes combinações entre terminais, aberturas, vazões e níveis de água resultaram em um total de 490 ensaios, incluindo repetições, determinações de interferência nos sinais elétricos e frequências naturais de vibração do conjunto.

#### A. Frequência natural e razão de amortecimento

Os resultados para a razão de amortecimento, normalmente representada pelo parâmetro adimensional denominado número de Scruton, apresentaram dispersão significativa, diferentemente dos resultados para a frequência natural que puderam ser bem representados pelo valor médio 58,53 Hz.

Como o número de Scruton representa amortecimento nas vibrações da estrutura, quanto maior seu valor menores amplitudes são esperadas. Com relação às significativas variações entre os diferentes testes, cabe salientar que não se trata de fato inesperado [8] pois os valores deste parâmetro podem ser dependentes da própria amplitude da vibração.

Embora essa variação seja considerável no presente trabalho de pesquisa, sua variação em função das amplitudes de vibração apresenta um comportamento de caráter exponencial, com marcada influência para pequenos valores de números de Scruton [10] ( $Sc < 2$ ). Desta maneira, e comparando com os valores obtidos neste trabalho, pode se esperar que a variação deste parâmetro não seja de maior importância quando forem comparados os diferentes terminais para uma mesma situação de escoamento.

#### B. Caracterização visual do escoamento

A metodologia empregada nesta pesquisa não inclui técnicas de visualização do escoamento. No entanto foi possível, através de fotografias, registrar alguns detalhes do escoamento sob a comporta. Na figura 5, as oscilações de pressão na base do terminal retangular e na face de jusante ocorrem pela instabilidade da camada de cisalhamento que descola a partir da primeira aresta, sendo responsáveis pela indução à vibração. Este efeito sobre a estrutura pode ser claramente visualizado a partir de diagramas de densidade espectral.



Figura 5: Fotografia do escoamento sob a comporta para terminal retangular –  $Q=23$  l/s,  $\delta=20$  mm, jato livre

#### C. Análise espectral das acelerações

A análise espectral das acelerações medidas nos diferentes ensaios constituiu a principal ferramenta empregada nesta pesquisa para atingir o objetivo de comparação entre os comportamentos da comporta quando equipada com os diferentes terminais.

Os diagramas de densidade espectral permitem identificar importantes características da vibração da comporta, induzida pelo escoamento, na direção horizontal ("in-line"), nas diferentes aberturas, faixas de vazão e velocidade investigadas.

Alguns resultados típicos, a título de exemplo, estão apresentados nas figuras 6-a a 6-d, onde "s" representa a abertura da comporta acima do fundo do canal (o mesmo que  $\delta$ , anteriormente citado). Os exemplos apresentados são caracterizados por possuírem desníveis de água sobre a comporta com ordens de grandeza semelhantes e com o ressalto hidráulico formado imediatamente a jusante da comporta.

As áreas calculadas abaixo de cada traçado dos gráficos, comparadas à área correspondente ao ruído elétrico ou às situações de menor indução à vibração, indicam absorção de energia pela comporta, a partir do escoamento, em praticamente toda a faixa de frequências investigada, entre 0 e 100 Hz, variando entre os diferentes casos.

De maneira geral, em todas as representações está claro que, em torno da frequência natural, ocorrem as maiores ordenadas espectrais por tratar-se da tendência natural de vibração da estrutura.

Valores significativos de ordenadas espectrais em torno das frequências na faixa entre 5 Hz e 10 Hz e em 46 Hz, que não coincidem com a frequência natural medida em ar, indicam um comportamento característico da interação entre o fluido em escoamento no canal e a estrutura hidráulica. A frequência a partir da qual ocorre um crescimento global das ordenadas espectrais está em torno dos 20 Hz, com variações para mais e para menos.

Pela figura 6-a, com a pequena abertura 10 mm da comporta, os terminais retangular e em "ele" apresentam as maiores ordenadas. Na figura 6-b, correspondente à abertura de 20 mm, exceto pelo terminal retangular, os comportamentos são, em geral, semelhantes no que diz respeito à absorção de energia pela estrutura a partir do escoamento. Para a abertura igual a 30 mm, figura 6-c, os diagramas apresentam-se bastante semelhantes, porém, com maiores energias para o caso do terminal em "ele". Para a maior abertura, 40 mm representada na figura 6-d, podem ser percebidas faixas de frequências nas quais a indução à vibração imposta pelo escoamento não mais é significativa pois possuem valores na mesma ordem de grandeza do ruído elétrico.

#### D. Modos de vibração e velocidade reduzida

Seguindo procedimento semelhante ao de outros autores ([8], por exemplo), foi possível identificar, no presente trabalho, os modos de vibração da comporta designados por "modo II" e "modo III", com o terminal retangular. Este resultado permite acreditar que determinação análoga para os demais terminais tem qualidade e confiabilidade.

## VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão a este trabalho, que faz parte da implementação e execução de projeto de pesquisa e desenvolvimento sobre a identificação de Padrões Vibratórios em Estruturas Hidráulicas por Ação de Escoamentos, são feitas algumas considerações.

Sob o ponto de vista técnico, a interpretação dos resultados das investigações realizadas deixaram claro que:

- As aberturas críticas da comporta foram as iguais a 10 mm e 20 mm;
- Entre as geometrias investigadas, o terminal retangular é o mais desfavorável sob o ponto de vista da indesejada vibração da comporta enquanto o terminal em ângulo de 60° é o mais favorável;
- De maneira geral, quanto aos resultados obtidos, houve boa qualidade na concordância com os resultados apresentados por [8] (terminal retangular), validando o trabalho aqui desenvolvido. Assim, é razoável supor semelhante qualidade e representatividade para as demais situações investigadas; e
- A faixa de velocidades reduzidas investigada corresponde à dos mecanismos do escoamento associados com I.I.E. ("instability-induced excitation" ou excitação induzida pela instabilidade).

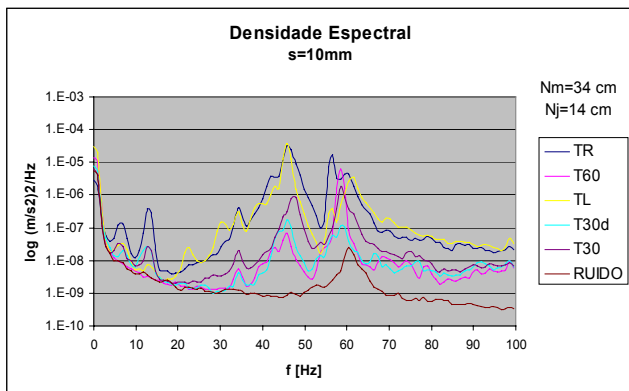
Todo o conjunto de trabalhos e a complementação das análises, aqui apresentadas a respeito da comporta, faz parte de dissertação de mestrado concluída em abril de 2005, dentro do programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - IPH/UFRGS. Investigações sobre a vibração de cilindros estão sendo realizadas e fazem parte de dissertação de mestrado, no mesmo programa, com a fase experimental em andamento.

## IX. AGRADECIMENTOS

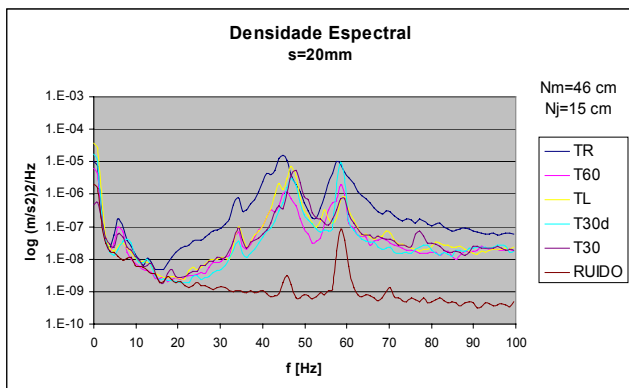
Os autores agradecem à Fundação de Apoio e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à FURNAS Centrais Elétricas S.A o apoio à realização desta pesquisa.

## X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

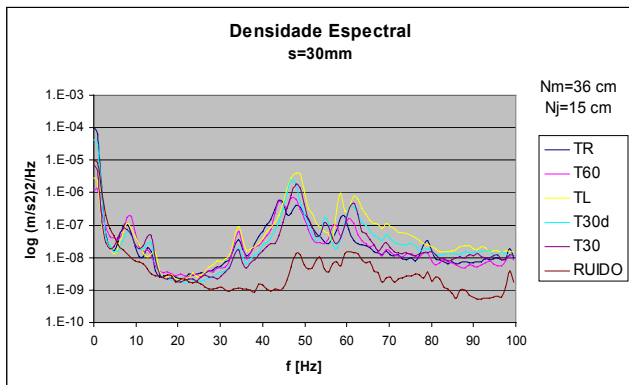
- [1] P. C Erbiste, *Comportas Hidráulicas*, Rio de Janeiro: Ed. Campus-Eletronbras, 1987.
- [2] W. T Thomson, *Teoria da vibração com aplicações*, Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1978.
- [3] R. D Blevins, *Flow induced vibration*, 2<sup>nd</sup> ed., New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [4] N. D. Thang, "Gate vibrations due to unstable flow separation", *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 116, pp. 342-361, 1990.
- [5] E. Naudascher, "Flow induced forces and vibrations", Lisbon, Outline of an Intensive Course, 6<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup> Oct. 1986.
- [6] J. D. Hardwick, "Flow-induced vibration of vertical lift-gate", *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 100, pp. 631-644, May 1974.
- [7] N. D. Thang, E. Naudascher, "Self-excited vibration of vertical lift-gate", *Journal of Hydraulic Research*, vol. 24, pp. 391-404, 1986.
- [8] T. H. G. Jongeling, "Flow-induced self-excited in-flow vibrations of gate plates", Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Pub. n. 420, Nov. 1989.
- [9] P. Billeter, T. Staubli, "Flow-induced multiple mode vibrations of gate with submerged discharge", *Journal of Fluids and Structures*, vol. 14, pp. 323-338, 2000.
- [10] E. Naudascher, D. Rockwell, *Flow-induced vibrations*, Rotterdam: Balkema, 1994.



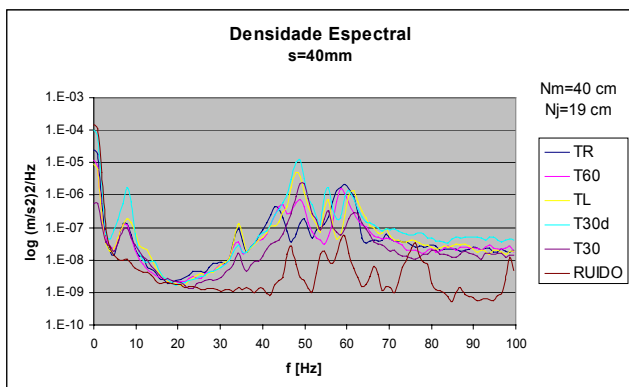
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6: Exemplos de diagramas de densidade espectral para os terminais e aberturas da comporta: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm