

VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELO ESCOAMENTO SOBRE UMA COMPORTA PLANA COM DESCARGA DE FUNDO

Martín Romagnoli e Luiz Augusto Magalhães Endres
Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Brasil.
romagnolimartin@yahoo.com.ar; endres@iph.ufrgs.br

RESUMO

Uma investigação experimental de vibrações induzidas pelo escoamento sobre um dispositivo elástico representativo de uma comporta plana vertical com descarga de fundo é apresentada. O dispositivo elástico utilizado, instalado em um canal aberto com escoamento de água, consiste, basicamente, em uma placa plana de alumínio cujas dimensões aproximadas são de 500 mm de largura x 800 mm de altura x 20 mm de espessura. Cinco geometrias de terminal inferior em contato com o escoamento são ensaiadas. O comportamento vibratório do dispositivo, submetido a diferentes configurações de escoamento em valores de abertura de descarga de 10, 20, 30 e 40 mm, é caracterizado através de medições de aceleração instantânea no sentido do escoamento e de níveis médios de água em torno do dispositivo. Os resultados mostram que a geometria do terminal inferior em contato com o escoamento desempenha um papel de fundamental importância quando o objetivo a atingir é a diminuição da magnitude das vibrações. Aparentemente, a magnitude dos processos vibratórios se acentua em aberturas de descarga menores, sendo ainda mais significativa em valores deste parâmetro que sejam inferiores à espessura da placa. Uma notável diminuição na intensidade da vibração tem lugar com a condição de descarga sem afogamento.

Palavras Chave: vibrações induzidas, comportas hidráulicas, trabalho experimental.

ABSTRACT

Abstract: An experimental investigation of flow-induced vibrations on an elastic device representative of an underflow vertical gate is presented. The elastic device, installed in an open-channel water flow, consists basically of an aluminum flat plate with approximate dimensions of 500 mm of width x 800 mm of height x 20 mm of thickness. Five different gate bottom lips in contact with the flow are investigated. The behaviour of the vibrations of the device, submitted to different flow conditions in opening discharge values of 10, 20, 30 e 40 mm, is characterized through measurements of instantaneous acceleration in the streamwise direction and average water levels around the flat plate. The results show that the geometry of the gate bottom lip in contact with the flow plays an important role when the objective is the reduction of the magnitude of the vibrations. Apparently, the magnitude of the vibrations is higher in lower opening discharge values, being more significant in values of this parameter lower than the plate thickness. Lower intensity of the vibration is reached in flow conditions with zero submergence.

Keywords: flow-induced vibrations, hydraulics gates, experimental work.

INTRODUÇÃO

Estruturas hidráulicas como comportas são utilizadas com os mais diferentes propósitos. Usualmente são empregadas em diversos tipos de obras, citando como exemplo estruturas auxiliares de aproveitamentos hidrelétricos, canais de navegação e aquedutos para abastecimento ou irrigação, entre outras.

O desenvolvimento da ciência no sentido do projeto racional das estruturas, assim como o surgimento de novos materiais, fez com que os projetistas empregassem os mesmos em seus limites de aplicação, tornando as estruturas progressivamente mais leves, mais flexíveis e, portanto, mais sujeitas à vibração.

Escoamentos em torno de estruturas, em função das características dinâmicas do conjunto e das condições do fluxo, podem ser fonte de vibrações, o qual não é um problema menor, especialmente quando envolvido em aplicações industriais. Seus efeitos bem podem contribuir ao comprometimento tanto da estabilidade estrutural como do funcionamento normal do conjunto causando, desta maneira, perdas milionárias em somas de dinheiro.

Problemas com comportas hidráulicas, ocorridos como consequência da fadiga do material assim como de vibrações excessivas, têm sido reportados em anos recentes (Estados Unidos Army Corps of Engineers 1990, 1997; Todd 1999).

Apesar do mencionado anteriormente e da importância crescente quanto à consideração deste tipo de solicitações, estudos de vibrações induzidas por ação de escoamentos sobre comportas não existem em grande número. Causas possíveis são a diversidade de fenômenos e variáveis envolvidos na interação fluido-estrutura e a dificuldade existente quanto à modelagem hidroelástica que estes tipos de estudos requerem.

Além da pequena quantidade de bibliografia disponível, quando este tema é comparado com outros de importância semelhante na utilização de obras hidráulicas, observa-se certa falta de uniformidade quanto à descrição deste tipo de fenômeno pelos diversos autores. Por outro lado, a diferença óbvia entre os distintos modelos, dispositivos, metodologias e instrumentação utilizados faz com que a análise quantitativa de resultados entre os diferentes estudos presente, de fato, muitas incertezas.

Em consequência, e devido à complexidade do tema, não existem critérios gerais bem definidos a respeito do comportamento e do projeto deste tipo de estrutura quando submetida às referidas solicitações.

Neste sentido, o propósito deste estudo é investigar o comportamento vibratório induzido pelo escoamento sobre um dispositivo elástico, representativo de uma comporta plana vertical com descarga de fundo, com diferentes geometrias de terminal inferior em contato com o escoamento e, baseados nos resultados obtidos, contribuir para o desenvolvimento dos critérios de projeto deste tipo de estruturas hidráulicas.

Além do mencionado, a proposta visa estabelecer um ponto de partida para futuras pesquisas no campo da hidroelasticidade a serem desenvolvidas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sempre que possível em parceria com a indústria usuária dos resultados obtidos.

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ESCOAMENTOS

Uma razão simples à ocorrência deste tipo de fenômeno em estruturas, pode-se dizer sem equívoco, é que todos os corpos dotados de uma certa massa e elasticidade, quando submetidos a uma força, ou de outra maneira acelerados, são capazes de experimentar vibrações. Portanto, a maior parte das estruturas que nos rodeiam está sujeita a um certo grau relativo de vibração (Thomson 1978).

Desta maneira, escoamentos em torno de estruturas poderão induzir, através das forças hidrodinâmicas exercidas por eles sobre as mesmas, vibrações que possam provocar tanto deformações não desejadas, que comprometam o correto funcionamento da estrutura, como vibrações excessivas capazes de levar o sistema ao colapso estrutural.

Uma dificuldade que apresenta o estudo deste tipo de fenômeno é a falta de uniformidade de critérios quanto à sua classificação e descrição. Uma causa possível é, provavelmente, a diversidade de disciplinas que abordam o tratamento do tema, tais como a hidráulica, a mecânica, ou a aeronáutica por exemplo. Naudascher e Rockwell (1994) fazem esta citação ainda na introdução de sua obra, a qual é considerada como referência a todo aquele que se inicia no estudo deste tema.

Visando partir de um ponto de vista unificado estes autores propõem a definição dos elementos básicos para o estudo de vibrações induzidas pelo escoamento, sendo os seguintes:

1. Corpos osciladores,
2. Fluidos osciladores, e
3. Fontes de excitação.

Um corpo oscilador consiste, basicamente, de uma estrutura rígida ou parte dela, a qual esteja vinculada elasticamente e possa sofrer deslocamentos livres, tanto angulares como lineares ou, de uma estrutura ou parte dela, a qual seja capaz de experimentar deformações enquanto fosse solicitada.

Um fluido oscilador consiste, geralmente, de uma massa de fluido a qual pode sofrer oscilações usualmente governadas pela gravidade ou pela compressibilidade do fluido. Cabe destacar que no escoamento de um fluido podem coexistir vários fluidos osciladores, pelo que, uma vez excitados, é possível que possam amplificar a vibração do corpo oscilador se uma das suas freqüências naturais se acopla ou se acha em ressonância com a freqüência de vibração do corpo oscilador.

Quanto às fontes de excitação destes fenômenos os mesmos autores consideram três tipos básicos diferentes, denominados Excitação Induzida Externa, pela Instabilidade e pelo Movimento, descritos a seguir. Entretanto, é importante salientar a dificuldade citada quanto à identificação das mesmas e à possibilidade de atuação tanto individualmente como em combinação.

Excitação Induzida Externa

A excitação induzida externa (EIE, “*Extraneous Induced Excitation*”) é causada pelas flutuações nas grandezas do escoamento como velocidade e pressão, as quais são independentes tanto de qualquer instabilidade do escoamento provocada pela estrutura considerada como de movimentos estruturais. Exemplo típico de EIE é a excitação devida à turbulência do escoamento. Na figura 1 ilustra-se o martelamento (“*buffeting*”) sobre um cilindro ocasionado pela turbulência do escoamento de aproximação. Neste caso, a força é fundamentalmente aleatória mas pode ser periódica também. Como exemplo pode ser citada a excitação induzida pelo desprendimento de vórtices a partir de uma estrutura a montante da considerada.



Figura 1. Exemplo de EIE ocasionada pelo martelamento turbulento (“*turbulent buffeting*”) do escoamento de aproximação sobre o cilindro (adaptado de Naudascher 1986).

Excitação Induzida pela Instabilidade

A excitação induzida pela instabilidade (IIE, “*Instability Induced Excitation*”) é devida a condições de instabilidade inerentes ou próprias ao escoamento provocadas pela estrutura considerada. Ziada (2004) dá uma explicação breve e clara a respeito deste tipo de fenômeno. Segundo este autor, escoamentos cisalhantes livres (“*free shear flows*”), como esteiras de corpos rombudos (“*wake of bluff body*”), camadas de cisalhamento livres (“*free shear layers*”) ou jatos livres (“*free jets*”), são inerentemente instáveis e, portanto, pequenas perturbações introduzidas na zona de separação do escoamento são rapidamente amplificadas a jusante, no interior das estruturas rotacionais (“*vortex-like structures*”). O crescimento e a convecção a jusante destas estruturas com vorticidade (“*vortical structures*”) provocam flutuações de pressão e velocidade. Em escoamentos turbulentos, os quais aparentemente prevalecem em aplicações práticas, estas flutuações de pressão e velocidade aparecem normalmente nos espectros sem uma freqüência predominante e, portanto, sua excitação é geralmente de menor intensidade, a menos que se acoplem a um mecanismo de realimentação (“*feedback*”), o qual tome o controle e induza perturbações coerentes na zona de separação do escoamento. Quando isto ocorre as oscilações no escoamento são drasticamente aumentadas, de modo que vibrações excessivas e problemas com ruídos acústicos, no caso do escoamento de gases, são muito prováveis de ocorrer.

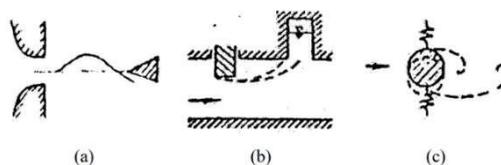


Figura 2. Diferentes mecanismos de controle envolvendo uma realimentação (a) fluido-dinâmica, (b) fluido-ressonante e (c) corpo-ressonante ou fluido-elástica (adaptado de Naudascher 1986).

Basicamente, como pode-se observar na figura 2, existem três tipos diferentes de mecanismos de con-

controle destas instabilidades (Naudascher e Rockwell 1994). A figura 2(a) mostra um exemplo típico de realimentação fluido-dinâmica, onde a distorção do campo de vorticidade devido à incidência do jato plano sobre o objeto a jusante provoca uma realimentação a montante, com o qual novas perturbações são induzidas na saída do jato. O segundo mecanismo, figura 2(b), envolve uma realimentação fluido-ressonante, neste caso com novas perturbações sendo induzidas na zona de separação do escoamento pela ressonância da coluna de água a qual é excitada pela oscilação da camada de cisalhamento. No terceiro caso, a realimentação é dada pela vibração estrutural, podendo-se observar na figura 2(c) o exemplo clássico de desprendimento de vórtices a partir de um corpo rombudo flexível. Este mecanismo pode provocar vibrações de amplitude considerável, especialmente quando a frequência de desprendimento de vórtices se aproximar da frequência natural de vibração da estrutura. As oscilações em fluidos que este tipo de excitação provoca podem se denominar de “auto-excitadas”.

Cabe citar que os três mecanismos anteriores podem coexistir (Ziada 2004, Martin et al. 1975) embora, provavelmente, seja menos difícil de identificar, no caso da pesquisa aqui discutida, onde a estrutura está vinculada elasticamente, fenômenos envolvendo realimentações fluido-ressonante e corpo-ressonante do que fluido-dinâmicas (contornos rígidos).

Excitação Induzida pelo Movimento

Em contraste com o até aqui descrito, a excitação induzida pelo movimento (MIE, “*Movement Induced Excitation*”) está intimamente relacionada com movimentos próprios da estrutura e diminui significativamente quando estes desaparecem. Um pequeno deslocamento do corpo induz uma alteração no escoamento em torno dele e, portanto, na força exercida por este último sobre o mesmo. Se esta alteração está em fase com a velocidade do corpo (amortecimento negativo) ou, de outra maneira, se transfere energia para o movimento do mesmo, a vibração “auto-excitada” da estrutura é possível. Exemplos deste tipo de excitação, ilustrados na figura 3 são o galope (“*galloping*”) em linhas de transmissão de energia elétrica e o drapejamento (“*flutter*”) que experimentam as asas do avião.

Cabe destacar que as forças de excitação que este mecanismo induz podem ser simuladas em modelos se a estrutura é reproduzida com características simi-

lares quanto a sua massa, amortecimento e elasticidade (Naudascher e Rockwell 1994).

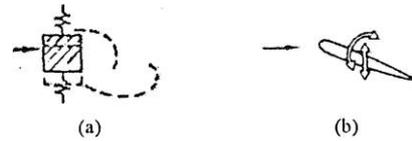


Figura 3. Exemplos de excitação induzida pelo movimento (a) galope e (b) drapejamento (adaptado de Naudascher 1986).

Este mecanismo apresenta características similares àquela citado anteriormente, excitação tipo IIE envolvendo uma realimentação corpo-ressonante (“*fluid-elastic feedback*”) e existem situações onde não é fácil distinguir entre um e outro (Naudascher 1986). Billeter e Staubli (2000) citam a coexistência destes dois fenômenos sobre um modelo de comporta plana com descarga de fundo com dois graus de liberdade.

Embora não seja fácil distinguir entre um e outro mecanismo, provavelmente o aumento a partir de certo valor na velocidade do escoamento de aproximação possa diminuir o efeito da periodicidade da instabilidade da camada de cisalhamento e, assim, os mecanismos de excitação induzida pelo movimento passaram a ser preponderantes.

Vibrações Induzidas em Comportas

De acordo com o apresentado, ficam claras a diversidade e complexidade dos mecanismos de excitação responsáveis pelos fenômenos vibratórios e, ainda, a dificuldade que pode existir para a sua identificação.

Não foram encontrados muitos estudos relatados, com enfoque semelhante, a respeito deste tipo de estrutura. Prova disto é a reduzida bibliografia disponível a qual, geralmente, está orientada a estruturas de relativa simplicidade como cilindros ou prismas com base retangular, por exemplo. Para estes casos, os mecanismos envolvidos no processo vibratório são conhecidos em melhor medida e descrições físicas mais aceitas estão disponíveis.

Estudos experimentais sobre vibrações induzidas em comportas com descarga de fundo com um grau de liberdade foram levados a cabo, entre outros autores, por Hardwick (1974), Kolkman & Vrijer (1977), Thang e Naudascher (1986) e Thang (1990), para vibrações verticais, e por Jongeling (1989) e Thang (1990), para vibrações horizontais. Estudos sobre comportas com dois graus de liberdade foram feitos

em anos mais recentes por Ishii et al. (1994, 1995) e Billeter e Staubli (2000).

Apesar de não existir um consenso quanto a uma descrição detalhada do mecanismo vibratório neste tipo de estruturas, os diversos autores coincidem, para o caso de uma comporta com descarga de fundo, em que a fonte de excitação mais relevante é a instabilidade da camada de cisalhamento que descola da fronteira sólida (figura 4) e se propaga em direção a jusante (Billeter 2004; Thang 1990; Jongeling 1989; Kolkman e Vrijer 1977; Martin et al. 1975 e Hardwick 1974).

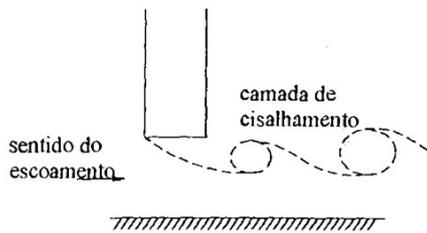


Figura 4. Camada de cisalhamento que descola da fronteira sólida.

Não obstante, como foi mencionado em itens anteriores, é possível que outras fontes de excitação (EIE, IIE ou MIE) atuem em combinação. Conforme Billeter (1998), na figura 5 e tabela 1 são apresentados alguns exemplos das fontes de excitação de vibrações neste tipo de estrutura hidráulica.

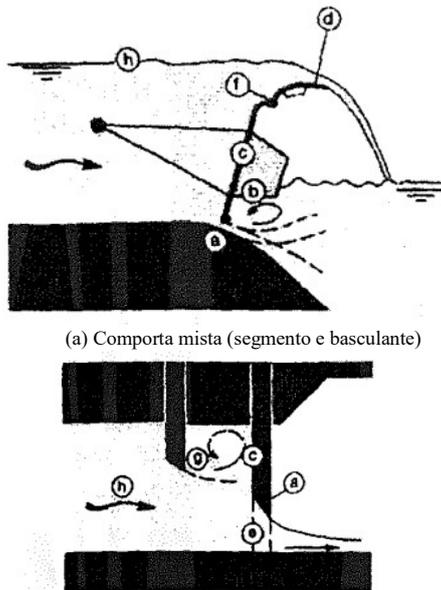


Figura 5. Fontes de excitação de vibrações em comportas hidráulicas, escoamento da esquerda para a direita (Billeter 1998).

Tabela 1. Descrição das fontes de excitação, de acordo com Billeter (1998).

Fontes de Excitação	
a)	IIE devida à instabilidade da camada de cisalhamento (fluido-dinâmica, fluido-ressonante ou fluido-elástica) ou MIE (“galloping”).
b)	EIE devida à turbulência provocada pelo jato de descarga.
c)	EIE devida à turbulência do escoamento de aproximação ou ao desprendimento de vórtices desde um corpo a montante.
d)	IIE fluido-ressonante devida à oscilação do jato (“nappe oscillation”).
e)	IIE fluido-dinâmica (cavidade das guias).
f)	IIE instabilidade da camada de cisalhamento.
g)	IIE fluido-dinâmica, incidência da camada de cisalhamento sobre a comporta a jusante.
h)	EIE do escoamento de aproximação ou IIE fluido-ressonante (sup. livre).

Um dos parâmetros adimensionais fundamentais para caracterizar os fenômenos de vibrações induzidas nestes tipos de estruturas, denomina-se velocidade reduzida e é definido segundo a seguinte relação:

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

onde ΔH é a diferença de níveis a montante e jusante da comporta, g a aceleração da gravidade, f a frequência de vibração e e a espessura da comporta.

Relacionando este último parâmetro com as fontes de excitação referidas anteriormente, segundo Thang (1990), mecanismos de excitação induzida pela instabilidade (IIE) ocorrem em valores relativamente baixos ou moderados de velocidade reduzida ($V_r < 10$), enquanto que, fenômenos associados a mecanismos de excitação induzida pelo movimento (MIE) tomam lugar para valores maiores ($V_r > 10$).

A bibliografia disponível a respeito de estudos de vibrações em comportas está desenvolvida, geralmente, em faixas de valores de velocidades reduzidas relativamente menores onde, segundo os diversos autores, a excitação tipo IIE é preponderante. Os únicos trabalhos encontrados, durante o processo de revisão bibliográfica desta pesquisa, a respeito de vibrações induzidas pelo mecanismo de excitação

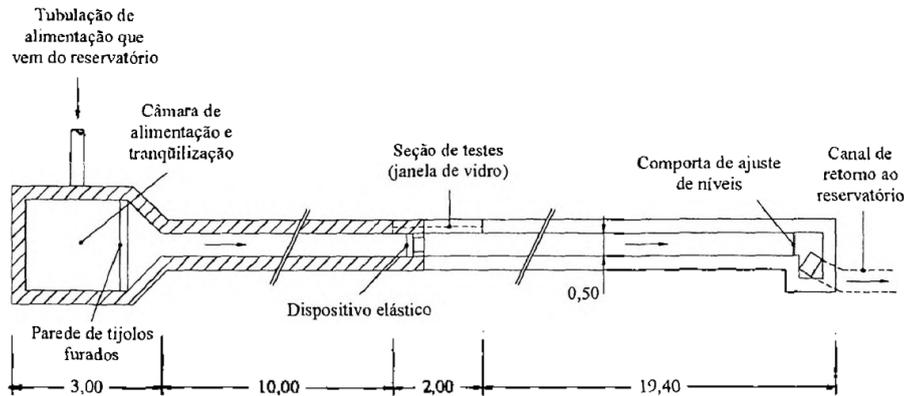


Figura 6. Representação esquemática em planta do canal e do circuito de alimentação (sem escala, com medidas em metros)

tipo MIE, ($10 < V_r < 50$), pertencem a Thang e Naudascher (1986) e Billeter e Staubli (2000).

$$S_c = \frac{2m\zeta}{\rho l e^2} = 2m_r \zeta \quad (2)$$

Embora exista consenso quanto ao fato da ocorrência de vibrações provocadas por mecanismos tipo IIE em valores de velocidades reduzidas menores, não se dispõe de uma descrição uniforme destes fenômenos, segundo os diferentes autores (Thang 1990). Uma causa provável para isto pode ser a apontada por Naudascher e Rockwell (1994) quanto à dificuldade de tratamento de vibrações induzidas em comportas devido à grande variedade de geometrias de terminais encontradas, as quais influem tanto na resposta em vibração como na faixa de aberturas entre as quais a excitação ocorre de forma mais significativa.

Referências aos mecanismos de excitação tipo IIE podem ser encontradas em Naudascher e Locher (1974), Martin et al. (1975) e Shuy e Chua (1999), envolvendo uma realimentação fluido-dinâmica; em Thang (1990) para o caso de fluido-ressonante e, por último, no caso fluido-elástica em Billeter e Staubli (2000), Jongeling (1989) e Thang (1990).

Desta maneira, para completar a descrição dos parâmetros essenciais que governam este tipo de fenômeno, envolvendo tanto mecanismos de excitação tipo IIE como MIE, devemos mencionar o número de Scruton ou parâmetro de amortecimento de massa (“mass-damping”), definido como o produto das razões de massa m_r e amortecimento ζ , mostrado na seguinte relação:

onde m é a massa da estrutura, ζ a razão de amortecimento em ar ($\delta \approx 2\pi\zeta$ é o decremento logarítmico do sistema amortecido no ar), ρ a massa específica do fluido, l e e são a largura e a espessura da seção transversal da estrutura, respectivamente. Segundo Thang e Naudascher (1986) este é o parâmetro mais relevante para as propriedades estruturais e um aumento de seu valor está relacionado a uma diminuição na amplitude da vibração (Blevins 2001).

Conforme Naudascher e Rockwell (1994), as características típicas dos mecanismos de excitação induzida pela estabilidade (IIE) são independentes do número de Scruton e ocorrem com uma máxima amplitude em uma faixa relativamente constante de velocidade reduzida. Entretanto, os autores afirmam que as vibrações ocasionadas por mecanismos de excitação induzidos pelo movimento (MIE), têm início para valores de velocidade reduzida tanto maiores quanto maior for o valor deste parâmetro adimensional.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

O estudo experimental desenvolveu-se através de testes sobre um dispositivo elástico representativo de

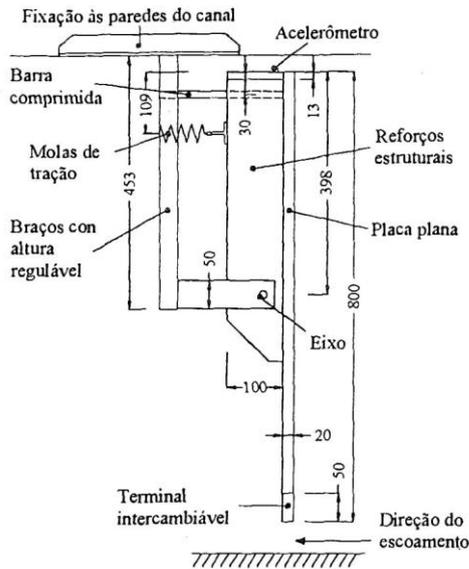
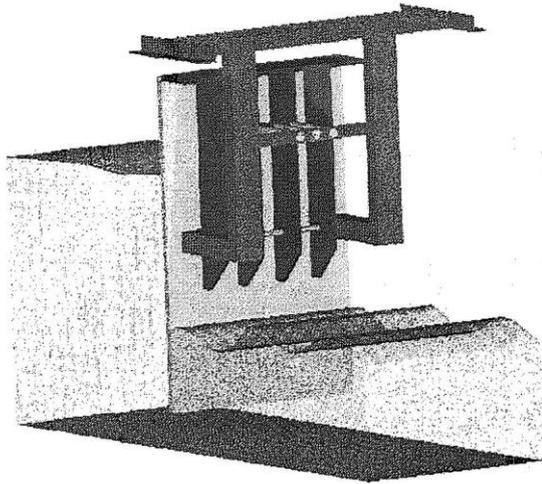


Figura 7. Representação esquemática do dispositivo elástico. (sem escala e com medidas em milímetros)



uma comporta plana vertical com descarga de fundo instalado em um canal aberto com escoamento de água. Cinco geometrias diferentes de terminal inferior, em contato com o escoamento, foram estudadas.

Canal de Ensaios

O comprimento total do canal, construído em alvenaria de tijolos e concreto, é de 34,4 m com uma declividade longitudinal do fundo de 0,2 %. Após a câmara de alimentação e tranquilização do escoamento e de um trecho de 10 m se encontra a seção de testes, caracterizada por uma parede lateral em vidro transparente com um comprimento de 2 m, sobre a qual é montado o dispositivo elástico. Na figura 6, se apresenta um esquema em planta do canal de ensaios.

O canal de seção retangular tem uma largura útil nominal constante de 0,50 m e, a montante do dispositivo elástico, a altura útil é de 0,9 m (região hachurada na figura 6) enquanto que, a jusante do mesmo, sua altura é de 0,6 m. Ao final do canal encontra-se uma comporta plana tipo gaveta para ajuste de níveis. Após a comporta o escoamento é encaminhado para o reservatório do laboratório através do canal de retorno.

Dispositivo Elástico

O dispositivo elástico sobre o qual desenvolveu-se o estudo de vibrações consiste, basicamente, em uma

placa plana em alumínio, posicionada na vertical, cujas dimensões são 501 mm de largura x 800 mm de altura x 20 mm de espessura e massa em torno de 30 kg.. As características e dimensões principais do são ilustradas na figura 7.

A rigidez à flexão longitudinal da placa foi elevada por meio de quatro reforços verticais de 100 mm x 504 mm x 13 mm, unidos em seus extremos por um reforço horizontal, no topo da placa plana, com 503 mm x 100 mm x 13 mm, todos em alumínio.

O terminal inferior da placa é intercambiável permitindo, desta maneira, o estudo de cinco diferentes geometrias em contato com o escoamento. Como pode ser observado na figura 7, o dispositivo conta com um grau de liberdade rotacional em torno do eixo cujo centro se localiza a 398 mm desde o topo da placa.

O mesmo se materializa por meio de uma barra de seção circular de 14 mm de diâmetro a qual, através de um mecanismo que permite o livre giro, se vincula em ambos extremos a dois braços que sustentam o peso do conjunto, os quais estão fixados às paredes superiores do canal.

O sistema de fixação dos braços (representados esquematicamente na figura 7) permite a livre regulação da altura e, conseqüentemente, obter as diferentes aberturas da comporta acima do fundo do canal requeridas no presente estudo. Para permitir o livre deslocamento do dispositivo na direção deseja-

da, uma distância de, aproximadamente, 2 mm separaram, a cada lado, a placa das paredes do canal.

Três molas de tração com idênticas características elásticas e ajustáveis em comprimento posicionadas na direção horizontal, a uma distância de 109 mm do topo da placa, e uma barra comprimida (527 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro) em igual direção, completam a vinculação elástica do dispositivo à estrutura de fixação.

Aspectos Gerais dos Ensaios

O comportamento vibratório do dispositivo elástico submetido a diferentes configurações de escoamentos foi caracterizado através de medições de níveis médios de água e de aceleração instantânea no sentido do escoamento.

Cinco geometrias diferentes de terminal inferior em contato com o escoamento, as quais podem ser visualizadas na figura 8, foram propostas para a realização dos ensaios.

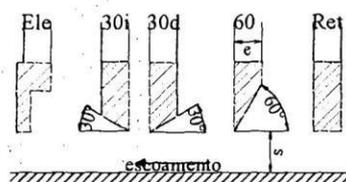


Figura 8. Diferentes geometrias de terminal inferior utilizadas na realização dos ensaios

Em cada uma das cinco geometrias, registraram-se quatro aberturas (s) para passagem de descargas: 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm, contados desde o fundo do canal até a face (ou linha) inferior dos terminais, sendo estes, segundo a bibliografia, valores pertencentes ao intervalo crítico ($s < 2e$) para o qual fenômenos de vibração induzida ocorreriam com maior significância.

Independentemente da geometria do terminal, as vazões no canal variam, em geral, a partir de um valor mínimo de 7 l/s, (abertura menor) aumentando aproximadamente a cada 3 l/s ou 5 l/s (dependendo da abertura) até atingir o limite operacional de nível de água no canal. Geralmente em cada valor de abertura foram ensaiadas de 3 a 4 vazões diferentes. Uma vez fixada a abertura e estabelecida uma vazão, as configurações ensaiadas foram as seguintes: situ-

ação inicial com descarga livre, a seguir o ressalto hidráulico formando-se imediatamente a jusante da comporta (de 1 cm a 2 cm de afogamento observados sobre a placa plana) e, posteriormente, variando os níveis de água, aproximadamente, a cada 5 cm mediante a regulação em altura da comporta de controle localizada no final do canal.

Cabe salientar a intenção de manter idênticas condições quanto às características principais do sistema de fixação elástico do dispositivo, isto é, estiramento e posicionamento das molas e barra, respectivamente.

Medição dos Níveis Médios de Água

As medições dos níveis médios de água, com a finalidade de quantificar as condições de escoamento às quais o dispositivo elástico está submetido, foram executadas através da utilização de pontas linimétricas.

Utilizaram-se um total de 8 pontas linimétricas, tendo-se selecionado duas delas, localizadas a montante e jusante do dispositivo elástico a uma distância de, aproximadamente, 3,5 m e 8,0 m, respectivamente, para caracterização de níveis sobre o dispositivo. Desta maneira evitaram-se as instabilidades provocadas nos níveis de água pela agitação superficial do escoamento, especialmente a jusante da estrutura. Além de determinar as alturas correspondentes aos níveis de água a montante e jusante, as leituras sobre as pontas servem como “gatilho” para o início dos ensaios pela verificação da estabilidade de condições hidráulicas.

Medição de Aceleração

Para realizar as medições de aceleração instantânea foi utilizado um acelerômetro marca Bruel & Kjaer, modelo 4393S, posicionado no topo do dispositivo elástico. As características construtivas do dispositivo, aliadas à existência dos reforços estruturais, permitiu considerar a movimentação da parte inferior e superior da comporta (onde se encontra o acelerômetro longe do contato com a água) com a mesma ordem de grandeza.

A direção de trabalho coincide com a direção do escoamento e considera-se aproximadamente horizontal pelo fato de os ângulos de rotação serem bastante reduzidos.

Aquisição e Tratamento de Dados

Os sinais a partir do sensor foram condicionados através de um condicionador/amplificador marca Bruel & Kjaer, modelo 2690 com filtros passa – alta e passa – baixa incorporados, e adquiridos por meio de um conversor analógico – digital com resolução de 16 bits conectado a um micro computador portátil. Ao longo das investigações os sinais foram monitorados mediante a utilização de um osciloscópio, procurando detectar, preliminarmente, possíveis ruídos elétricos que interferissem nas medições.

Desta maneira, o resultado direto da medição foi a tensão do sinal analógico que, após condicionado, era convertido para o domínio digital, na forma de um número inteiro na faixa de 0 a 65535, valores estes determinados pela resolução de 16 bits do conversor. Este resultado foi armazenado em meio magnético para posterior conversão ao domínio da grandeza física (aceleração). A faixa de variação do sinal de entrada foi previamente analisada, para uma seleção adequada da faixa de trabalho do conversor, visando não perder informações devido a sobre ou sub – tensões.

Cabe salientar que o sistema de medição empregado utilizou as relações de calibração fornecidas pelo fabricante dos equipamentos e, conseqüentemente, o valor de tensão armazenado é diretamente proporcional ao valor de aceleração (em Volts / [m/s²]) selecionada no painel do condicionador de sinais. Portanto, para converter os valores registrados em aceleração, basta dividi-los pelo valor da relação Volts / [m/s²], antes mencionada.

O tempo de duração na obtenção das amostras, bem como os valores das frequências de aquisição e filtragem foram estabelecidos após determinados, através de investigações preliminares, valores aproximados das frequências naturais do dispositivo elástico. Medições prévias deste parâmetro natural revelaram valores em torno de 60 Hz (coincidindo com a frequência da rede elétrica de abastecimento do laboratório), motivo pelo qual todos os equipamentos foram operados alimentados com a utilização de baterias visando reduzir interferências desejadas.

Sendo assim, as amostras de 64×2^{11} pontos foram adquiridas a uma frequência de 2 kHz e filtradas para passar na faixa de frequências entre 1Hz e 100 Hz, descartando-se, desta maneira, a ocorrência de fenômenos de dobramento (“aliasing”) pois ao

atingir a frequência de Nyquist da aquisição (1000 Hz) menos do que 1% da amplitude do sinal estaria presente pois o filtro passa baixas tem uma característica de atenuação de 40 dB por década.

Os registros com as medições realizadas foram tratados visando, basicamente, a determinação das funções de densidade espectral e das médias quadráticas (valores RMS os quais coincidem com os valores dos desvios padrões desde que as médias são nulas) das acelerações, parâmetros selecionados para a comparação entre os comportamentos dos diferentes terminais e aberturas do dispositivo. Para isto, aplicando técnicas apropriadas de transformações de Fourier, com emprego do aplicativo MatLab (função pwelch), foram estimadas, na faixa de frequências de interesse, as funções de densidade espectral das acelerações.

O erro padrão na estimativa das ordenadas espectrais, sendo a resolução em frequência menor a 1 Hz e o tempo de registro de 65,536 segundos, foi de 12,5 % (Bendat e Piersol 2000).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

Características Dinâmicas da Estrutura

O comportamento vibratório do dispositivo induzido pelo escoamento depende, fundamentalmente, de parâmetros característicos da vibração livre como frequências naturais e razão de amortecimento (Ishii et al. 1995). Em conseqüência, se faz necessário sua determinação visando uma melhor compreensão dos resultados posteriores quando submetido à ação das forças hidrodinâmicas do escoamento.

Devido à falta de um conhecimento prévio do comportamento do dispositivo em relação às possíveis variáveis que influiriam nos resultados, as investigações para determinar estes parâmetros foram realizadas para a maior parte das diferentes aberturas de descarga e geometrias de terminal ensaiadas. Em outras palavras, determinações de frequências ou modos naturais e de razões de amortecimento foram feitas uma vez que foi necessário interferir no sistema de fixação elástica, isto é, trocar o terminal ou mudar a abertura de descarga.

Frequências Naturais

Os valores de frequência natural foram deduzidos dos sinais de aceleração registrados durante os testes

de pulso (“Bump Test”). De cada resposta a um pulso de força “instantâneo”, exemplificada mediante a figura 9, foi obtido, da primeira oscilação, o valor do período de tempo entre os dois picos consecutivos.

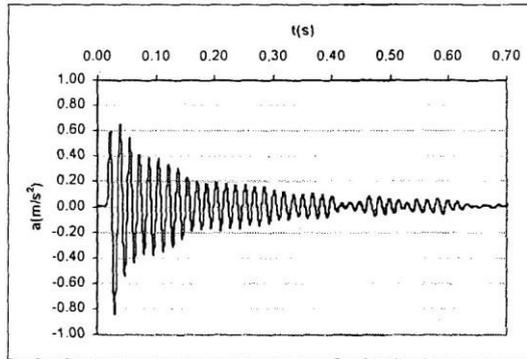


Figura 9. Acelerações da comporta em ar em resposta a um pulso (terminal “60”, $s = 20$ mm).

Desta maneira, foi possível calcular os valores de frequência natural em ar como a inversa do período de oscilação. Seguindo esse procedimento, com os valores correspondentes a cada pulso (em um mínimo de três para cada teste) foi calculado um valor médio representativo da frequência natural correspondente às aberturas (s) e geometrias de terminal.

Os valores representativos de frequência natural em ar, conforme os resultados, variam aproximadamente, entre 55 Hz e 63 Hz sem influência considerável do valor da abertura de descarga. Isto concorda com o esperado, as condições de fixação elástica que, em princípio, influem no valor deste parâmetro, foram, aproximadamente, idênticas para todas as situações avaliadas. A pequena variação que estes valores apresentam, no entanto, deve-se, provavelmente, à falta de sensibilidade do sistema de fixação em relação ao controle do posicionamento e ajuste de molas e barra, respectivamente.

Em conseqüência, podemos inferir que esta identificado o modo fundamental de vibração em ar em torno do valor nominal aproximado de 60 Hz. Não obstante, devido à complexidade da configuração estrutural, provavelmente, o dispositivo possua mais de um modo natural de vibração e que, com o método empregado, estes poderiam não ser identificados.

Neste sentido, conforme a metodologia proposta por Ishii et al. (1995), investigações visando identificar outros possíveis modos naturais de vibração foram levadas a cabo através das determinações de funções

de densidade espectral da resposta a um pulso de força “instantâneo”.

A seguir, na tabela 2, são apresentados os resultados, obtidos por meio da metodologia mencionada anteriormente, correspondentes à vibração livre em ar e em água (neste último caso, com um nível médio de água no canal de, aproximadamente, 30 cm totalmente em repouso).

Tabela 2. Resumo das frequências naturais de vibração livre da comporta em ar e em água.

	1	2	3	4	5
Em ar	60 Hz	50 Hz	35 Hz	69 Hz	12 Hz
Em água	60 Hz	45 Hz	35 Hz	69 Hz	—

O fato de não coincidir os modos ou frequências naturais de vibração em ar e em água, embora não seja inesperado, pode ser devido à influência que exerce o empuxo da água sobre o sistema composto pela placa, suporte e fixação, modificando assim condições importantes para suas determinações.

Razão de Amortecimento em Ar e Número de Scruton

Os valores das razões de amortecimento (ζ) foram deduzidos dos mesmos sinais de aceleração, registrados durante os testes de pulso, dos quais determinaram-se os valores medios de frequências naturais em ar apresentados no item anterior. Sendo assim, foram obtidos dos dois primeiros picos consecutivos os valores das amplitudes de aceleração instantânea.

Desta maneira foi possível calcular o valor do decremento logarítmico ($\delta = \ln(x_1/x_2)$) e, uma vez determinado, o respectivo valor de razão de amortecimento ($\delta \approx 2\pi\zeta$).

Levando em consideração os valores representativos de razão de amortecimento calculados e sendo, aproximadamente, a massa da comporta igual a 30 kg, por meio da expressão 2, foram obtidos os valores do parâmetro adimensional denominado número de Scruton. A figura 10 apresenta estes valores em relação às geometrias de terminal e aberturas da comporta para a descarga de fundo.

A apresentação do comportamento deste parâmetro com as diferentes geometrias de terminal inferior e aberturas de descarga, justifica-se por possibilitar a comparação posterior entre os respectivos comportamentos vibratórios induzidos pelo escoamento.

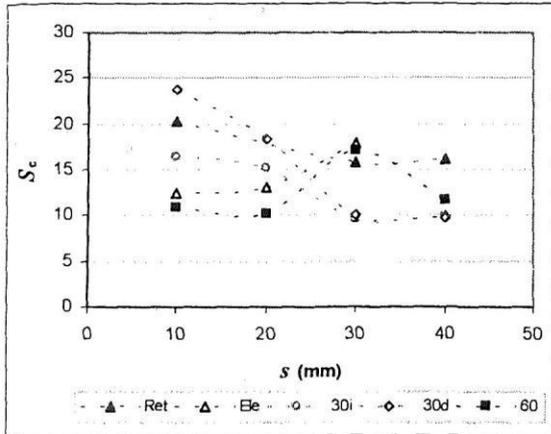


Figura 10. Valores médios do número de Scruton (em ar) em relação à abertura de descarga para os diferentes terminais (linhas apenas para visualização).

Considerando que as condições de fixação elástica foram similares para todas as situações, os resultados obtidos não parecem de acordo com o esperado. Como pode-se observar na figura anterior e, diferentemente dos resultados de frequências naturais, estes apresentaram uma maior dispersão. Além disso, os valores de desvio padrão, nas determinações dos valores médios, foram consideráveis.

Possivelmente, a imprecisão na estimação dos valores da razão de amortecimento, o grau de complexidade da configuração estrutural, incluindo a vinculação elástica, assim como variáveis relacionadas à metodologia utilizada para a realização dos testes de pulso (intensidade do pulso de força instantâneo, ponto de aplicação, entre outros), sejam causas possíveis para estas diferenças particulares. Billeter (1998), indicando a suscetibilidade deste parâmetro, cita valores de razão de amortecimento em uma faixa entre 1 % e 3,5 %, enquanto que Vikestad et al. (2000), para o caso de uma estrutura mais simples como um cilindro, relata uma variação de valores do mesmo parâmetro de até 30 %.

De todos modos, embora a variação deste parâmetro seja considerável no presente trabalho de pesquisa, a razão das amplitudes de vibração em função do número de Scruton, conforme Naudascher & Rockwell (1994), se apresenta, aproximadamente, inversamente proporcional ao quadrado do mesmo, com marcada influência para os valores menores ($S_c < 2$). Portanto, e sendo que estes valores de número de Scruton são relativamente elevados ($S_c \gg 2$), pode-se esperar que a variação deste parâmetro não seja de maior importância quando forem comparados os

comportamentos vibratórios correspondentes às diferentes geometrias de terminal inferior em situações de escoamento semelhantes.

Vibração Induzida pelo Escoamento

Características Gerais

Como primeiro passo, e antes de discutir mais em detalhe o comportamento vibratório induzido pelo escoamento sobre o dispositivo, serão apontadas algumas das características gerais mais relevantes através da análise de determinadas funções de densidade espectral correspondentes a diferentes situações, tanto de geometria de terminal inferior como de configurações de escoamento, as quais serão apresentadas a seguir.

Desta maneira, a figura 11 caracteriza o comportamento vibratório do dispositivo, através das funções de densidade espectral das acelerações correspondentes a três diferentes situações de escoamento, para o caso de terminal inferior “Ret” (figura 8) e uma abertura de descarga (s) de 10 mm. O nível médio de água a jusante do dispositivo foi, em média para as três situações, aproximadamente, de 13 cm.

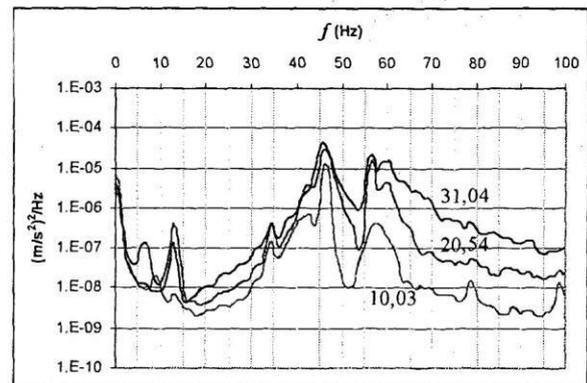


Figura 11. Funções de densidade auto-espectral. Geometria de terminal “Ret”, $s = 10$ mm, $N_j \approx 13$ cm, $\Delta H = 10,03$ cm; 20,54 cm e 31,04 cm.

Pode-se observar, na figura citada, das respectivas funções de densidade espectral das acelerações, o incremento na transferência de energia desde o escoamento para a vibração do dispositivo enquanto os valores de diferença de níveis (ΔH) aumentam, de acordo com o aumento correspondente da área encerrada abaixo dos respectivos diagramas.

É possível notar, ainda analisando a mesma figura, a ampla faixa de frequências, no trecho analisado, na

qual o escoamento induz o dispositivo a vibrar, com valores significativos, aproximadamente, a partir de 20 Hz e até 80 Hz.

Neste caso, destacam-se faixas de frequências em torno de 45 Hz e entre 55 Hz e 60 Hz, valores que correspondem às frequências de vibração livre em água identificadas anteriormente e apresentados na tabela 2. Também é possível identificar, embora com uma menor intensidade em comparação com as faixas já mencionadas, frequências naturais de ordem 3 e 5 da tabela 2, em torno de 35 Hz e 12 Hz, respectivamente.

A seguinte, figura 12, ilustra a caracterização do comportamento vibratório do dispositivo com a geometria de terminal inferior “60” (figura 8) em três configurações diferentes de escoamento. A abertura de descarga, para todas as situações, é igual a 10 mm. Sendo os desníveis médios de água $\Delta H = 9,68$ cm; 20,73 cm e 32,64 cm e, um valor médio de nível de jusante (N_j), em média para os três casos de, aproximadamente, 15 cm.

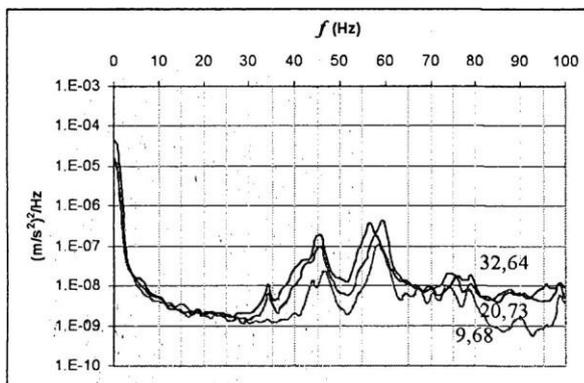


Figura 12. Funções de densidade auto-espectral. Geometria de terminal “60”, $s=10$ mm, $N_j \approx 15$ cm, $\Delta H = 9,68$ cm ; 20,73 cm e 32,64 cm.

Comparando estes resultados com os anteriores, correspondentes à geometria “Ret” apresentados na figura 11, podemos observar a notável diminuição na transferência de energia desde o escoamento para a vibração do dispositivo que ocorre neste caso, sendo ainda mais significativa esta diferença para valores de desníveis maiores, de acordo com a redução da área encerrada pelas funções de densidade espectral em comparação com espectros correspondentes a configurações similares de escoamento utilizando a geometria de terminal citada anteriormente (“Ret”).

Da mesma forma que para o caso anterior, as faixas de frequências predominantes, no trecho analisado, se situam em torno de 60 Hz e 45 Hz, correspondendo-se com as frequências naturais em água indicadas por 1 e 2, respectivamente, da tabela 2. Cabe destacar, nestas faixas de frequências, o acentuado decréscimo nas ordenadas espectrais que tem lugar para este caso de geometria de terminal, nas configurações de escoamento apresentadas e sendo, aproximadamente, de duas a três décadas nas unidades das ordenadas espectrais.

Pode-se observar, diferentemente do caso anterior (figura 11), a pequena variação entre as ordenadas espectrais quando comparadas as diferentes configurações de escoamento, mesmo na faixa de altas frequências e para maiores desníveis.

As características apontadas nestes últimos parágrafos indicam, de acordo com o esperado, a menor susceptibilidade, sob o ponto de vista da ocorrência de vibrações induzidas pelo escoamento, que apresenta este tipo de estrutura quando a geometria de terminal “60” encontra-se em contato com o escoamento.

Desta maneira buscou-se, através do apresentado nos parágrafos anteriores, fornecer um panorama geral representativo do comportamento vibratório do dispositivo elástico quando submetido ao escoamento. Duas situações bem diferentes, sob o ponto de vista da ocorrência de vibrações induzidas, foram expostas. Por um lado, a geometria de terminal inferior “Ret” e, por outro, a geometria de terminal “60”, sendo que, esta última, conforme o esperado, apresentou uma menor susceptibilidade à ocorrência de fenômenos vibratórios.

Cabe mencionar que, especificamente, não foram feitas referências aos casos de geometrias de terminal “Ele”, “30d” e “30i” devido a que as características gerais de seus respectivos comportamentos estão contidas dentro dos casos apresentados. Um maior detalhamento desses casos será feito em itens posteriores.

Modos de Vibração

A seguir serão apresentados resultados do comportamento vibratório da comporta, correspondentes às cinco geometrias de terminal inferior ensaiadas, caracterizados através do parâmetro adimensional

denominado velocidade reduzida, um dos mais relevantes no estudo deste tipo de fenômenos (Thang 1990) o qual foi apresentado anteriormente por meio da expressão 1.

O valor de frequência de vibração f utilizado para as determinações deste parâmetro foi obtido de cada uma das respectivas funções de densidade espectral das acelerações correspondendo-se com o valor de frequência predominante.

A cada valor de velocidade reduzida, quantificando o comportamento vibratório para cada situação, foi associado o valor da média quadrática das acelerações (a_{rms}) obtido do tratamento estatístico dos dados. Estes valores de aceleração foram adimensionalizados seguindo na mesma direção das metodologias propostas por Jongeling (1988, 1989), Thang (1990) e Vikestad et al. (2000). Conseqüentemente, a expressão adimensional obtém-se da seguinte forma:

$$\frac{a_{rms}}{\omega^2 e} = \frac{a_{rms}}{(2\pi f)^2 e} \quad (3)$$

onde ω é a frequência angular de vibração.

Geometria de Terminal “Ret”

A figura 13 ilustra as características do comportamento vibratório do dispositivo elástico correspondente à situação com geometria de terminal inferior “Ret”.

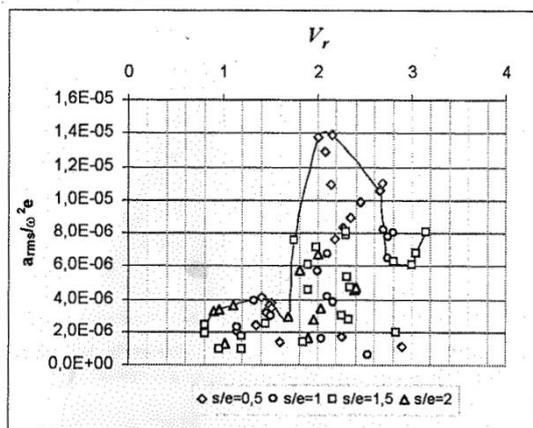


Figura 13. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, $s/e = 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Terminal “Ret” (linha apenas para indicação de envoltória).

É possível observar, da figura mencionada, em função dos valores adimensionalizados de aceleração, duas faixas de valores de velocidade reduzida bem diferenciadas, aproximadamente, entre $0,8 < V_r < 1,6$ e entre $1,6 < V_r < 3,0$, sendo esta última de uma magnitude consideravelmente superior, em torno de até 3 a 4 vezes a primeira.

Valores máximos de aceleração adimensionalizada ocorrem na faixa superior em torno de $V_r = 2,0$, enquanto que a primeira faixa apresenta ordenadas relativamente constantes sem valores de velocidade reduzida predominantes.

Comparando estes resultados com os apresentados por Jongeling (1989), podemos relacionar estas duas faixas identificadas com os modos dominantes II e III reportados pelo citado autor. Em conseqüência,

Modo II, $1,6 < V_r < 3,0$ e,

Modo III, $0,8 < V_r < 1,6$

Não obstante a boa correspondência que apresentam os resultados, existe certa diferença entre estes valores dos extremos inferior e superior do modo II e, os citados pelo respectivo autor, iguais a $V_r = 1,2$ e $3,5$, respectivamente. Uma concordância mais aceitável tem-se com os valores reportados por Thang (1990), iguais a $V_r = 1,5$ e $3,0$, obtidos mediante o método das oscilações forçadas.

Cabe salientar, no entanto, que estes valores são deduzidos de curvas envoltórias da resposta da estrutura desenhadas conforme o critério de cada autor. Por outro lado, é razoável supor que a utilização de diferentes modelos ou dispositivos, empregando distintas metodologias e instrumentos de medição, possivelmente, provoque alterações nos resultados pelo que, consideramos que ainda assim, com esta diferença apontada, estes valores e sua interpretação são aceitáveis.

Enquanto ao número de Scruton, da comparação com os resultados do Jongeling (1989), pode-se observar que as maiores ordenadas se mantêm, relativamente, nas mesmas faixas de velocidade reduzida, independente da diferença entre valores do número de Scruton, entre 16 e 20 (figura 10) para este trabalho e de, aproximadamente, 1,0 no estudo de Jongeling (1989), concordando desta maneira com Naudacher e Rockwell (1994).

Em relação aos mecanismos de excitação responsáveis pela vibração do dispositivo, com base nos valores de velocidade reduzida que podem ser observados da figura 13, fontes de excitação induzida pela instabilidade do escoamento (IIE) seriam predominantes no processo vibratório.

Levando em consideração o mencionado no item sobre características gerais quanto à ocorrência da vibração induzida pelo escoamento em valores de frequências predominantes em torno dos modos naturais próprios da estrutura, poder-se-ia inferir que o mecanismo de excitação IIE envolve uma realimentação corpo ressonante ou fluido elástica. De todos modos, conforme Billeter (2004), este processo de realimentação tomaria o controle em valores de velocidade reduzida maiores ($V_r > 4,0$), sendo neste caso os mecanismos do tipo ILEV (“*impinging leading edge vortex*”) os que induziriam a placa a vibrar.

Geometria de Terminal “60”

Conforme pode ser observado da figura 14, devido à redução das ordenadas na faixa de valores de velocidade reduzida analisada e em comparação com a figura 13, é notável a diminuição da magnitude do processo vibratório, em até 3 vezes, que tem lugar com este tipo particular de geometria.

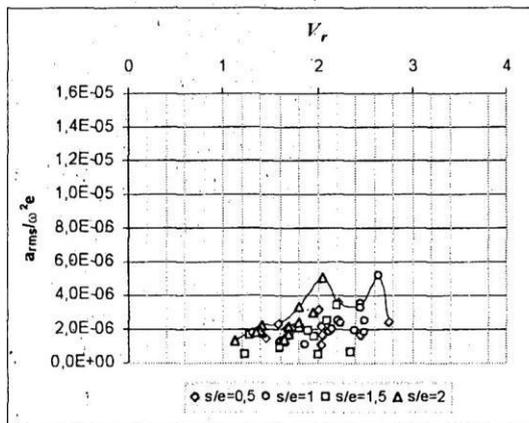


Figura 14. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, $s/e = 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Geometria de terminal “60” (linha apenas para indicação de envoltória).

O valor de velocidade reduzida no início das vibrações seria de, aproximadamente, $V_r = 1,0$, com a tendência a aumentar a magnitude da vibração conforme a velocidade reduzida, sendo que maiores

vibrações podem ser observadas para valores deste parâmetro $V_r > 2$.

Cabe salientar que não foram encontrados resultados de outros autores referidos a possíveis valores de velocidade reduzida característicos desta geometria de terminal. Porém, conforme o esperado foi observada a menor susceptibilidade à ocorrência de vibrações induzidas, na faixa de aberturas de descarga e de condições de escoamento às quais foi submetida, que este tipo de geometria de terminal possui.

Possivelmente, a mudança do ponto de descolamento do escoamento, em comparação com a geometria retangular, para a aresta de saída do terminal e, portanto, provocar o afastamento da instabilidade da camada de cisalhamento a jusante do dispositivo, possa ser uma das causas para este comportamento.

Geometria de Terminal “Ele”

A figura 15 ilustra a caracterização do comportamento vibratório do dispositivo, neste caso, com a geometria de terminal inferior “Ele” em contato com o escoamento. É possível identificar, em função da magnitude das ordenadas de aceleração adimensional, duas faixas de valores de velocidade reduzida bem diferenciadas. Neste sentido, o comportamento poderia ser considerado similar ao caso com geometria “Ret” citado anteriormente (figura 13).

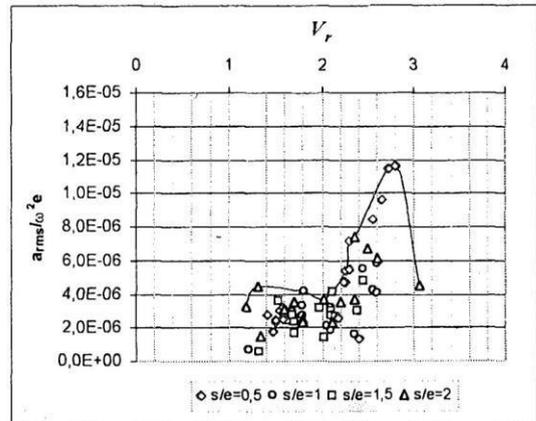


Figura 15. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, $s/e = 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Geometria de terminal “Ele” (linha apenas para indicação de envoltória).

As faixas ocorrem, aproximadamente, entre $1,1 < V_r < 2,0$ e entre $2,0 < V_r < 3,0$, sendo que, a primeira, apresenta valores de aceleração adimensiona-

lizada similares ao modo III da geometria “Ret”, enquanto que o valor máximo da segunda faixa ou modo II resultou com uma magnitude algo menor e em um valor de velocidade reduzida em torno de $V_r = 2,8$.

Geometria de Terminal “30d”

Particularmente para este tipo de geometria, como pode ser observado da figura 16, a magnitude de vibração, na faixa de valores de velocidade reduzida analisados, mantém-se, relativamente, com características uniformes, sem apresentar particularidades que mereçam destaque.

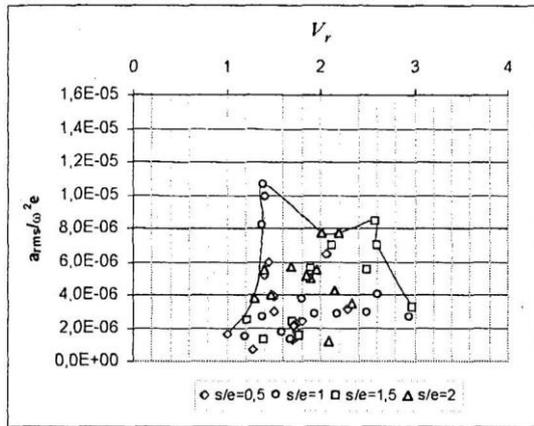


Figura 16. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, $s/e = 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Geometria de terminal “30d” (linha apenas para indicação de envoltória).

Não obstante, a diferença dos comportamentos identificados nos casos das geometrias “Ret” e “Ele”, as mais susceptíveis à ocorrência de vibrações vistas até aqui, este caso particular apresenta, para valores de velocidade reduzida $V_r < 1,6$, valores de aceleração adimensional consideravelmente maiores. Possivelmente, a incidência da camada de cisalhamento (figura 17), que descola da aresta de entrada, possa ser responsável por este comportamento, em velocidades reduzidas menores, quando comparado com as geometrias antes mencionadas.

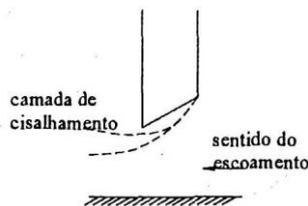


Figura 17. Representação esquemática do descolamento do fluxo, geometria “30d”.

Geometria de Terminal “30i”

O comportamento vibratório do dispositivo com a geometria de terminal “30i” em contato com o escoamento, como pode ser observado da figura 18 foi, basicamente, similar ao caso da geometria de terminal “60” (figura 14). O valor de velocidade reduzida de início de vibração seria de, aproximadamente, $V_r = 1,1$, sendo que as vibrações de maior magnitude ocorrem a partir de $V_r = 2,0$.

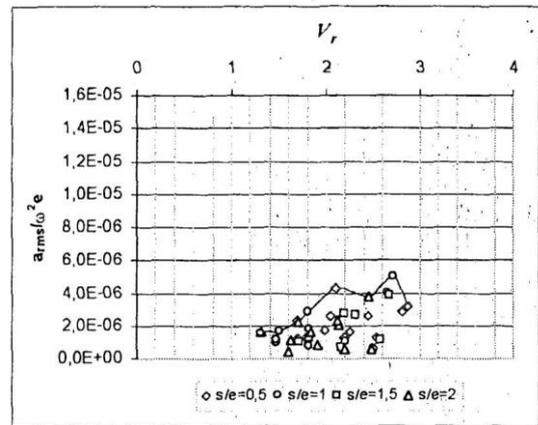


Figura 18. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, $s/e = 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Geometria de terminal “30i” (linha apenas para indicação de envoltória).

Da figura anterior, pelas magnitudes das ordenadas, é possível notar como este tipo de geometria de terminal, na faixa de velocidades reduzidas e aberturas analisadas, é favorável sob o ponto de vista da diminuição da intensidade dos processos vibratórios quando comparadas com os casos vistos anteriormente, “Ret”, “Ele” e “30d” (figuras 13, 15 e 16, respectivamente).

Provavelmente, baseado no mecanismo de excitação descrito por Billeter (2004) para o caso da geometria “Ret”, uma causa deste comportamento particular, mesmo que a camada de cisalhamento descole da aresta principal ou de entrada e, portanto, a zona de instabilidade não seja afastada da calha inferior do terminal, seja devida à supressão da superfície de incidência da camada de cisalhamento e a diminuição da zona de atuação da força de excitação horizontal (em traços, figura 19).

Apesar disso, segundo Thang (1990), este tipo de geometria seria instável em valores de velocidades reduzidas maiores e sua utilização deveria ser evitada quando o objetivo fosse a diminuição da magni-

tude de vibrações induzidas.

Conforme ilustram os resultados apresentados anteriormente, geometrias de terminal inferior “Ret”, “Ele”, e “30d” apresentaram, na faixa de valores de velocidade reduzida analisadas, uma maior intensidade de vibração, sendo, aproximadamente, de 2 a 4 vezes superior quando comparadas com geometrias “60” e “30i”.

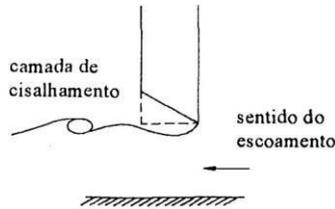


Figura 19. Representação esquemática do descolamento do fluxo, geometria “30i”.

Em conseqüência, e observando o comportamento similar da comporta com geometrias “60” e “30i”, podemos apontar estes tipos de geometrias como favoráveis na faixa de velocidade reduzida analisada e comparadas com as demais, visando a diminuição dos fenômenos vibratórios neste tipo de estruturas hidráulicas.

Não obstante, se consideramos valores de velocidade reduzida $V_r < 1,6$, a magnitude da vibração do dispositivo com geometrias “Ret” e “Ele” apresenta a mesma ordem de grandeza que nos casos “30i” e “60” em velocidades reduzidas $V_r > 2,0$. A maior intensidade de vibração encontrada foi para a geometria de terminal inferior “Ret” em um valor de velocidade reduzida $V_r = 2,0$, enquanto que, as menores, foram nos casos de geometrias “30i” e “60” em valores de $V_r < 1,6$.

Influência da Abertura de Descarga

A abertura de descarga, juntamente com a geometria do terminal em contato com o escoamento e as características da dinâmica estrutural, é parâmetro relevante sob o ponto de vista da ocorrência de vibrações induzidas, visando a estabilidade da estrutura quando submetida à ação das forças hidrodinâmicas do escoamento.

Em conseqüência, é apresentada na figura 20 a caracterização do comportamento vibratório do dispositivo, para cada uma das geometrias de terminal inferior, através dos máximos valores de aceleração

dimensional em função das razões de abertura de descarga s/e , sendo e a espessura da comporta e s a abertura da descarga.

Segundo ilustra a figura 20, para um valor de razão de abertura igual a $s/e = 0,5$; as geometrias “Ret” e “Ele” foram as mais suscetíveis à ocorrência de vibrações, enquanto que, para um valor de $s/e = 1,0$ e de uma magnitude algo menor às anteriores, a geometria “30d” mostrou-se como a mais instável.

Com certa tendência a diminuir a intensidade da vibração conforme aumenta o valor da razão de abertura, em um valor deste último parâmetro igual a 2,0, geometrias “Ret”, “30d” e “Ele” apresentaram um comportamento similar, sendo superiores, aproximadamente, em uma vez, quando comparadas com as geometrias “30i” e “60”.

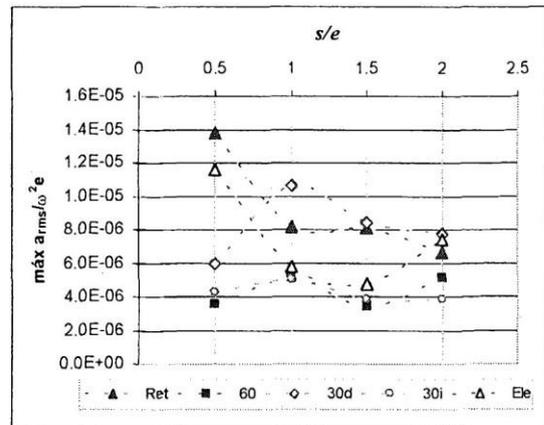


Figura 20. Valores máximos de a_{rms} dimensional em relação à razão de aberturas s/e para todas as geometrias de terminal inferior (linha de tendência apenas para visualização).

Caso particular para apontar o comportamento da geometria “Ele”, resultou ser mais instável em um valor de razão de abertura $s/e = 2,0$ do que para valores $s/e = 1,0$ e 1,5. Neste sentido, Thang (1990) relata uma situação semelhante para este tipo de geometria, mas sob o ponto de vista de vibrações verticais.

Cabe observar o comportamento similar e praticamente constante, em função da abertura de descarga, entre as geometrias “60” e “30i”, indicadas como as mais favoráveis quando é visada a diminuição da magnitude das vibrações induzidas pelo escoamento. Conforme o esperado, a magnitude das vibrações acentua-se em valores de aberturas menores,

$s/e = 0,5$ e $1,0$. Não obstante e baseado em trabalhos de outros autores, provavelmente valores de razão de abertura entre $0,25 < s/e < 1,0$ apresentem comportamentos vibratórios com uma maior magnitude. Desta maneira pode-se observar, nos valores de razões de aberturas analisados, como as geometrias de terminal inferior “30i” e “60” apresentaram menor suscetibilidade à ocorrência de fenômenos de vibração induzida quando comparadas com as geometrias “Ret”, “Ele” e “30d”.

Por outro lado, não foram identificados comportamentos particulares relacionados com a variação dos valores do número de Scruton relatada anteriormente (figura 10). Não obstante esta variação influencie os resultados, possivelmente, o fato de serem valores deste parâmetro relativamente altos faz com que a influência desta não mude consideravelmente o comportamento vibratório da estrutura.

Influência do Afogamento

Visando identificar a influência do afogamento na saída do jato de descarga nas características da vibração induzida sobre a estrutura, as figuras 21 e 22 ilustram os comportamentos vibratórios, correspondentes a todas as geometrias de terminal inferior e aberturas de descarga estudadas, em diferentes configurações de escoamento com descarga não afogada.

Possivelmente, concordando com Thang (1990), a presença da superfície livre do fluido oscilando (IIE fluido-ressonante) a jusante do dispositivo e a maior agitação provocada pelo ressalto hidráulico afogado (EIE) resultem em um processo adicional de amplificação que incrementa a excitação.

Da comparação entre a figuras 21 e 22, pode-se observar como na situação de descarga não afogada, na faixa de velocidade reduzida e aberturas de descarga analisadas, a geometria de terminal “30d” aparenta ser a mais suscetível à ocorrência de vibrações induzidas, enquanto que os demais terminais apresentaram, relativamente, uma menor intensidade de vibração.

Particularmente, comparando estes valores de aceleração apresentados pelo dispositivo com geometria de terminal “Ret” e “Ele” (figura 21) com os correspondentes a configurações de escoamento com descarga afogada (figuras 13 e

15), podemos observar a notável diminuição da intensidade do processo vibratório.

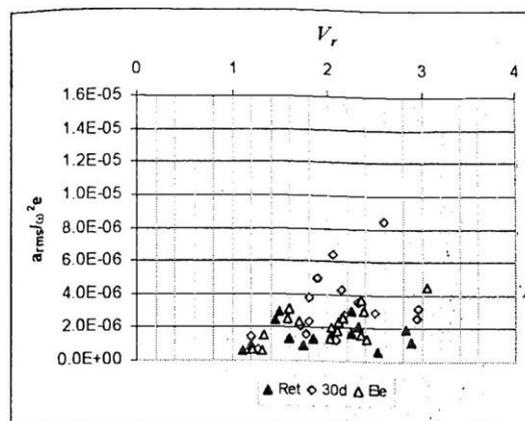


Figura 21. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, descarga não afogada, $s/e=0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Geometrias de terminal “Ret”, “30d” e “Ele”.

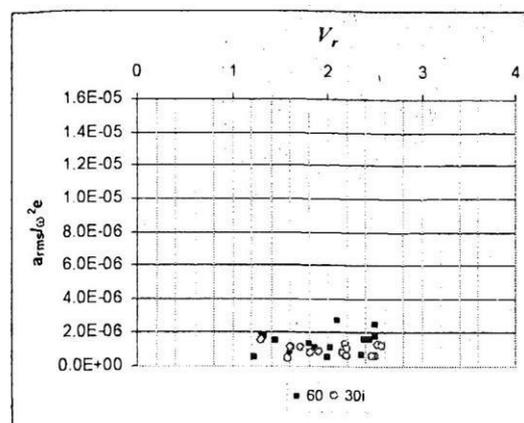


Figura 22. Valores de a_{rms} adimensional em relação à velocidade reduzida, descarga não afogada, $s/e=0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. Geometrias de terminal “60” e “30i”

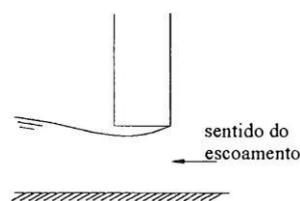


Figura 23. Representação esquemática do descolamento do fluxo na situação de descarga não afogada. Geometria “Ret”.

Provavelmente, conforme Jongeling (1989) e Naudascher e Locher (1974), o descolamento estável do escoamento a partir da aresta de entrada sem recolamento (figura 23) e, portanto, a não incidência da

camada de cisalhamento sobre a zona de saída da calha inferior do terminal, seja uma causa provável para este comportamento.

CONCLUSÕES

Em geral, em todas as configurações de escoamento às quais a comporta foi submetida, nas respectivas aberturas de descarga e geometrias de terminal inferior analisadas, os valores de frequências de vibração induzida pelo escoamento com maior destaque corresponderam-se com as frequências naturais de vibração livre em água.

Em relação à geometria do terminal inferior em contato com o escoamento, conforme o observado, nota-se que desempenha um papel de fundamental importância quando o objetivo a atingir é a diminuição da magnitude deste tipo de solicitações não desejadas.

Geometrias “Ret”, “Ele”, e “30d” mostraram ser mais suscetíveis à ocorrência de fenômenos de vibração induzida, com diferenças de até 3 a 4 vezes nos valores das médias quadráticas das acelerações (a_{rms}), nas situações de escoamento às quais a comporta foi submetida, quando comparadas com geometrias “60” e “30i”.

Aparentemente, a magnitude dos processos vibratórios, conforme os valores das médias quadráticas das acelerações (a_{rms}), se acentua em aberturas de descarga menores, sendo ainda mais significativa em valores deste parâmetro que sejam inferiores à espessura da placa. Não obstante, em todas as aberturas de descarga analisadas, fenômenos de vibração induzida se apresentaram com uma menor intensidade quando geometrias de terminal inferior “60” e “30i” estiveram em contato com o escoamento.

Uma notável diminuição na intensidade da vibração tem lugar, em todos os casos de geometrias de terminal inferior e aberturas de descarga nas diferentes configurações de escoamento analisadas, com a condição de descarga livre.

Baseados nos comportamentos observados correspondentes às diferentes geometrias de terminal inferior, julga-se haver evidência suficiente para considerar a instabilidade da camada de cisalhamento (IIE) como uma das fontes de excitação de vibrações

de maior relevância, na faixa de valores de velocidade reduzida analisadas, neste tipo de estrutura.

Particularmente nos casos de geometria de terminal inferior “60” e “30i”, considerando a semelhança nas respostas do dispositivo em vibração nas condições de escoamento e aberturas às quais foi submetido, e sendo que nestas situações a instabilidade da camada de cisalhamento perderia significância como mecanismo de excitação de vibrações, possivelmente fontes de excitação do tipo EIE atuem com uma maior importância no processo de excitação de vibrações para estes casos particulares.

A figura 24 apresenta um esquema das fontes de excitação intervenientes no processo, complementando assim o estudo de causas e efeitos às quais a estrutura está submetida.

Neste sentido, da citada figura, podemos apontar mecanismos de excitação do tipo EIE (1) e (3), causados pela turbulência do escoamento, identificados pela resposta da comporta com geometrias de terminal inferior “30i” e “60” nas condições de descarga livre (1) e de descarga afogada (3).

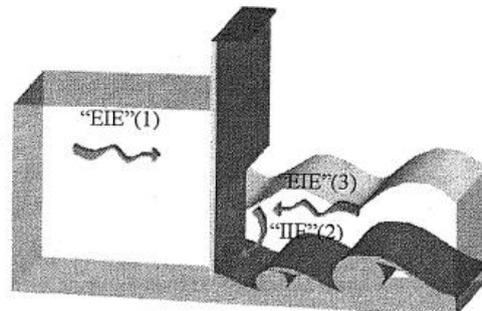


Figura 24. Representação esquemática das fontes de excitação intervenientes no processo vibratório da comporta (escoamento da esquerda para a direita).

Já nos casos das geometrias “Ret”, “Ele” e “30d” a instabilidade da camada de cisalhamento como mecanismo IIE (2) responsável pelas vibrações, teria uma maior significância, envolvendo tanto uma realimentação (“feedback”) fluido-elástica, devida à vibração da comporta, como fluido-ressonante, causada pela oscilação da superfície livre do escoamento a jusante da mesma.

Certos itens que tem sido desenvolvidos neste texto podem ser achados com um maior grau de detalhe em Romagnoli (2005).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o aporte institucional do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e financeiro da empresa Furnas Centrais Elétricas S.A.

BIBLIOGRAFÍA

- Bendat JS, and Piersol AG. 2000. Random data: analysis and measurement procedures. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Billeter P. 1998. Strömungsinduzierte Schwingungen von Schützen mit mehren Freiheitsgraden. Thesis (Ph.D.). VAW -ETH, Zurich.
- Billeter P. 2004. Properties of single shear layer instabilities and vortex-induced excitation mechanisms of thick plates. *Journal of Fluids and Structures*, 19, 335-348.
- Billeter P. and Staubli T. 2000. Flow-Induced Multiple-Mode Vibrations of Gates with Submerged Discharge. *Journal of Fluids and Structures*, 14, 323-338.
- Blevins RD. 2001. Flow-induced vibration. 2nd ed. Krieger Malabar.
- Estados Unidos 1990. Army Corps of Engineers. Hydraulic design of spillways. Engineer Manual, n.1110-2-1603. Washington.
- Estados Unidos 1997. Army Corps of Engineers. Vertical lift gates. Engineer Manual, n.1110-2-2701. Washington.
- Hardwick JD. 1974. Flow-induced vibration of vertical-lift gate. *Journal of Hydraulics Division*, 100(5), 631-644.
- Ishii N., Knisely CW. and Nakata A. 1994. Coupled-mode vibration of gates with simultaneous over-and underflow. *Journal of Fluids and Structures*, 8, 455-469.
- Ishii N., Knisely CW. and Nakata A 1995. Field study of a long-span shell-type gate undergoing flow-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 9, 19-41.
- Jongeling, THG. 1988. In-flow vibrations of gate edges. Delft Hydraulics Laboratory, 392.
- Jongeling, THG. 1989. Flow-induced self-excited in-flow vibrations of gate plates. Delft Hydraulics Laboratory, 420.
- Kolkman PA. and Vrijer A 1977. Gate edge suction as a cause of self-exciting vertical vibrations. Delft Hydraulics Laboratory. 188.
- Martin WW., Naudascher E. and Padmanabhan M. 1975. Fluid-dynamic excitation involving flow instability. *Journal of Hydraulics Division*, 101(6), 681-698.
- Naudascher E. 1986. Flow induced forces and vibrations: outline of an intensive course. Lisbon: LNEC.
- Naudascher E. and Locher FA. 1974. Flow-induced forces on protruding walls. *Journal of Hydraulics Division*, 100(2), 295-313.
- Naudascher E. and Rockwell D. 1994. Flow-induced vibrations: an engineering guide. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Romagnoli M. 2005. Avaliação experimental da vibração induzida sobre uma comporta plana com descarga de fundo. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Shuy EB. and Chua HC. 1999. Fluid-dynamic feedback in shear layer oscillation below a submerged sluice gates. *Journal of Hydraulic Research*, 37(1), 107-120.
- Thang ND. and Naudascher E. 1986. Self-excited vibrations of vertical-lift gates. *Journal of Hydraulic Research*, 24(5), 391-404.
- Thomson WT. 1978. Teoria da vibração com aplicações. Interciência, Rio de Janeiro.
- Todd RV. 1999. Spillway tainter gate failure at Folsom dam, Califórnia. In: Waterpower Conference, Las Vegas, Nevada. Proceedings. ASCE, New York.
- Vikestad K., Vandiver JK. and Larsen CM. 2000. Added mass and oscillation frequency for a circular cylinder subjected to vortex-induced vibrations and external disturbance. *Journal of Fluids and Structures*, 14, 1071-1088.
- Ziada S. 2004. Industrial aeroacoustics: excitation mechanisms and counter-measures. In: Escola De Primavera de Transição e Turbulência, 4., Porto Alegre. [Anais]., 1 CD., ABCM, Rio de Janeiro.

Artículo recibido el 03/2006 y aprobado para su publicación el 05/2006.