

CONTROLADOR FLUIDO-DINÂMICO HÍBRIDO PARA ATENUAÇÃO DE OSCILAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS E ESBELTOS

HYBRID FLUID-DYNAMIC CONTROLLER OF WIND INDUCED OSCILLATIONS IN TALL AND SLENDER BUILDINGS

Roberto de A. Souza (A) (1); Ronaldo C. Battista (2); Eliane M. L. Carvalho (3)

(1) Eng^o. Civil, D.Sc., Prof. Adjunto, UFBA, Salvador, Brasil.

(2) Eng^o. Civil, Ph.D, Prof. Titular, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

(3) Eng^a. Civil, D.Sc., Prof^a. Adjunta, TEC/UFF, Rio de Janeiro, Brasil.

Endereço para correspondência: rdas@ufba.br; (A) apresentador

Resumo

Estruturas altas e esbeltas de edifícios têm, em geral, baixas frequências e pequenas taxas de amortecimento associadas aos modos fundamentais de oscilação. Sob ação de forças dinâmicas ambientais, como por exemplo, as geradas pelo vento, essas estruturas podem apresentar grandes amplitudes de oscilação. Para atenuar essas amplitudes, diferentes soluções têm sido adotadas, cada uma adequada às características da ação dinâmica ambiental e às características físicas e geométricas do sistema estrutural.

Neste trabalho propõe-se a utilização de um sistema fluidodinâmico híbrido para o controle das oscilações da estrutura. Concebido a partir do Atenuador de Coluna Líquida para controle passivo, que é um dispositivo constituído de um ou mais recipientes tubulares em forma de “U” contendo fluido, que gera forças hidráulicas que se opõem às forças de inércia causadas na estrutura pelas ações externas, o Atenuador de Coluna Líquida Híbrido possui a capacidade de se ajustar à direção na qual a estrutura apresenta a oscilação e possui um sistema ativo de variação do amortecimento.

Alguns dos principais aspectos de projeto, propriedades dinâmicas e desempenho do ACLH são apresentados e discutidos com o auxílio dos resultados do sistema controlado e não controlado, obtidos com modelos analíticos e numéricos do sistema estrutural discretizado via MEF.

Para demonstrar a viabilidade técnica, a praticidade e o desempenho desse dispositivo de controle híbrido das amplitudes das oscilações, é apresentado um exemplo de aplicação prática na redução das oscilações por flexão da estrutura esbelta de um edifício alto sob ação do vento.

Palavras-chave: Atenuador Fluido, Atenuador Híbrido, Redução de Vibrações, Análise Dinâmica.

Abstract

Tall and slender building structures have, in general, low frequencies and damping ratios associated with the fundamental oscillation modes and, when subjected to dynamic loadings, they may experience large amplitudes of bending oscillation. To attenuate these oscillation amplitudes a few engineering solutions have been adopted, each one with attributes adequate for each type of dynamic loading and for the physical and geometrical features of the structural system.

In the present work a hybrid fluid-dynamic system is proposed for the control of oscillations, which are conceived on the basis of the traditional tuned liquid dampers. The mathematical model of the hybrid system is developed from its passive counterpart, i.e. a tuned liquid column damper, formed by one or more “U” shape tubes filled with fluid which when in motion generates hydraulic forces that counteract the inertia forces produced by the dynamic loadings acting on the structure. The hybrid fluid-dynamic damper has a direction control system that adjusts to structure’s oscillation direction and another active system for damping variation.

Some of the main design aspects, dynamic properties and the resulting performance of the hybrid fluid-dynamic damper are presented with the aid of results obtained from both analytical and FEM models for the controlled and uncontrolled responses of the structure.

To demonstrate the feasibility and performance of the hybrid control device in attenuating oscillations an example of practical application for reducing bending vibration amplitudes of a tall building under wind loading is presented.

Keywords: Fluid Damper, Hybrid Damper, Vibration Reduction, Dynamic Analysis.

1 INTRODUÇÃO

À medida que a tecnologia da construção civil avança, novas concepções estruturais são criadas, que, em sua maioria, geram estruturas mais leves, flexíveis e com baixo amortecimento intrínseco. Estando sujeitas a ações dinâmicas ambientais estas estruturas podem sofrer grandes amplitudes de deslocamentos e acelerações, resultando em problemas de conforto para os usuários, de utilização em serviço e até de segurança e durabilidade da estrutura.

Para atenuar as amplitudes das respostas dinâmicas, uma solução é sempre possível na fase de projeto, como por exemplo, a alteração da concepção estrutural, de maneira que suas características dinâmicas sejam tais que afastem a probabilidade de ressonância na faixa espectral da carga dinâmica. O acréscimo de amortecimento modal da estrutura nem sempre é possível, mas a utilização de sistemas de controle dinâmico é uma solução alternativa a ser buscada tanto na fase de projeto de novas estruturas quanto na reabilitação de estruturas existentes.

Os sistemas de atenuação dinâmica passiva ou ativa produzem na estrutura forças que se opõem às forças de inércia geradas na estrutura pela ação dinâmica externa. As forças de controle dependem das propriedades dinâmicas do sistema e da própria estrutura.

A concepção de um sistema passivo de atenuação pode envolver características físicas, geométricas e mecânicas as mais variadas. Desta maneira, vários modelos diferentes surgiram, tais como: o atenuador hidráulico para estabilização de navios, inventado por Frahm (1909); os sistemas massa-mola-amortecedor (Den Hartog 1972); mecanismos de amortecimento adicional, isoladores e atenuadores de vibração aplicados, por exemplo, a pontes (Battista e Pfeil 1996, 2010), torres (Pinheiro 1997, Battista e Pfeil 2009) e a edifícios altos (Souza *et al.* 2000).

O presente trabalho mostra o comportamento e o desempenho de um tipo de sistema de controle híbrido dirigido à atenuação de oscilações de estruturas esbeltas de edifícios: o Atenuador de Coluna Líquida Híbrido (ACLH) (Battista *et al.* 2008). Desenvolvido a partir do Atenuador de Coluna Líquida (ACL) (Sakai *et al.* 1989), que é um dispositivo de controle passivo composto por tubos rígidos na forma “U” contendo líquido, que acoplado à estrutura excitada pela ação dinâmica externa, gera com o movimento do líquido uma força hidráulica de controle e redução das amplitudes de oscilação.

2 O ATENUADOR DE COLUNA LÍQUIDA HÍBRIDO

O Atenuador de Coluna Líquida Híbrido (ACLH) com direcionamento ativo se constitui no ACL passivo unidirecional montado sobre uma plataforma circular que através de um sistema mecânico pode ser girada em torno do seu eixo vertical (Figura 1). O sistema atenuador resultante é então híbrido, já que é passivo na geração da força de controle que promove a redução das oscilações da estrutura, porém ativo em seu direcionamento.

A concepção do ACLH é, portanto, simples: o ACL originalmente fixo é posto a girar em torno de um eixo vertical, comandado por um controlador ativo de redirecionamento, passará a atuar em qualquer plano vertical de flexão lateral da estrutura do edifício no qual as amplitudes de deslocamentos no topo alcancem valores acima de um valor de referência. Para que o atenuador seja devidamente direcionado é preciso que seja dotado de um sistema mecânico acionado por um controle automático elétrico-eletrônico.

Além do direcionamento do atenuador, torna-se também ativo o controle da abertura do orifício que promove a restrição da área da seção transversal no interior do tubo do ACLH. Desta forma, o sistema atenuador passa a ter amortecimento variável, para se adaptar a diferentes condições e forças de excitação e melhorar seu desempenho na redução das oscilações da estrutura.

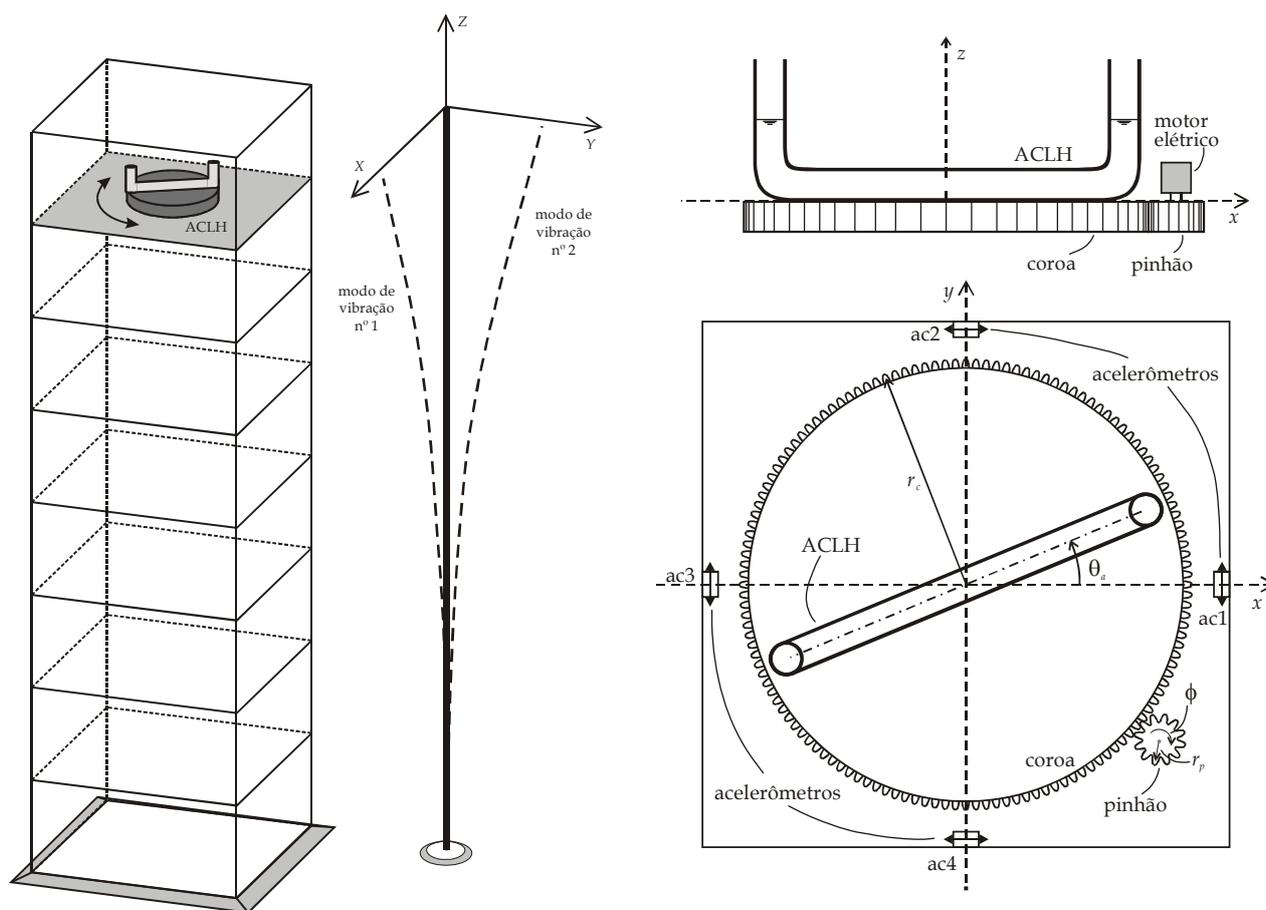


Figura 1 – Desenho esquemático do ACLH acoplado a uma estrutura 2GL generalizados, e do mecanismo de rotação

Estando o ACLH devidamente sintonizado e acoplado a uma estrutura, a oscilação da mesma faz movimentar o líquido no interior do tubo. O princípio de funcionamento do atenuador está na criação de uma força de inércia com o movimento do líquido e na dissipação da energia do movimento do líquido através da perda de carga hidráulica resultante da restrição imposta pelo regulador automático do diâmetro do orifício no interior do trecho horizontal do tubo.

O direcionamento automático do ACLH entra em operação sob duas condições simultâneas:

- i. avaliação da amplitude máxima do deslocamento horizontal no topo da estrutura e identificação da direção ou plano predominante de flexão da estrutura; e
- ii. amplitudes dos deslocamentos da estrutura maiores do que um certo valor de referência.

A identificação da direção predominante do deslocamento da estrutura é realizada através da avaliação da amplitude máxima absoluta da resposta em deslocamentos a cada período de oscilação. Conhecida esta direção, o sistema de controle ativo fará girar o ACLH de forma que ele venha ter esta mesma direção e assim a força de controle nele gerada venha contrapor a força de inércia da estrutura e promover, de forma mais eficiente, a atenuação das oscilações.

A outra condição estabelece um gatilho para que o sistema de direcionamento entre em operação. Isso é necessário porque enquanto a estrutura apresenta oscilações de pequenas amplitudes de deslocamentos a direção predominante de movimento não é claramente identificada. A utilização deste gatilho faz com que o sistema mecânico de rotação do ACLH funcione apenas quando necessário, reduzindo desgastes e, conseqüentemente, aumentando o tempo de vida útil do sistema e o intervalo de tempo para manutenção preventiva.

O sistema de direcionamento do ACLH pode ser concebido de diferentes formas, como um sistema eletromecânico composto por motor elétrico, engrenagens e sensores tal como ilustrado na Figura 1, que no modelo matemático é representado apenas através de um controle de posição.

2.1 Modelo Matemático do Atenuador de Coluna Líquida Híbrido

A modelagem matemática da hidrodinâmica e força de interação com a estrutura para o ACLH é a mesma do ACL (Souza *et al.* 2002).

A Figura 2 mostra um desenho esquemático do ACLH com a restrição em forma de orifício no interior do tubo. Os parâmetros que o caracterizam são:

- L – comprimento total de líquido; B – comprimento horizontal de líquido;
- ρ – massa específica do líquido; A – área da seção transversal do recipiente;
- y – deslocamento da coluna de líquido; x – deslocamento horizontal do recipiente, que é o deslocamento da estrutura a qual está acoplado.

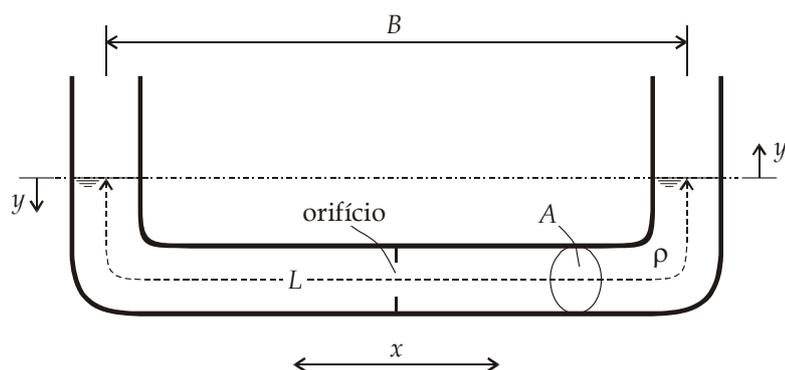


Figura 2 – Desenho esquemático do ACLH e os seus parâmetros

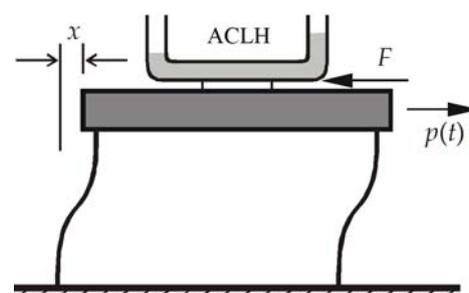


Figura 3 – Acoplamento do ACLH a uma estrutura 1GL

A equação de movimento da coluna de líquido se obtém por meio de princípios variacionais de energia, resultando numa equação não-linear (Sakai *et al.* 1989)

$$\rho AL\ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A\delta|\dot{y}|\dot{y} + 2\rho Agy = -\rho AB\ddot{x} \quad (1)$$

onde δ é o coeficiente de perda de carga devido ao orifício, e g é a aceleração da gravidade.

A equação se assemelha com a de um sistema mecânico discreto constituído de massa, mola e amortecedor, estando presentes as parcelas devido à força de inércia $\rho AL\ddot{y}$, força de amortecimento $\frac{1}{2} \rho A\delta|\dot{y}|\dot{y}$, força elástica $2\rho Agy$ e força de excitação $\rho AB\ddot{x}$.

Neste caso, a força de amortecimento é não-linear devido ao amortecimento do líquido, resultante da perda de carga hidráulica ao passar pela restrição em forma de orifício no interior do tubo.

A equação (1) pode ser reescrita na forma

$$m_{ACLH} \ddot{y} + \frac{1}{2} \frac{m_{ACLH} \delta}{L} |\dot{y}|\dot{y} + \omega_{ACL}^2 m_{ACLH} y = -\frac{m_{ACLH} B}{L} \ddot{x} \quad (2)$$

onde $m_{ACLH} = \rho AL$ é a massa do ACLH, representada pela massa total do líquido, e $\omega_{ACLH} = \sqrt{2g/L}$ é a frequência natural do ACLH.

3 MODELAGEM DA ESTRUTURA COM O ACLH

O movimento da estrutura original (sem ACLH), ou com o ACLH acoplado (Figura 3), é analisado através das respostas obtidas utilizando-se o Método da Superposição dos Modos Generalizados de Vibração dominantes e dependentes do carregamento dinâmico. A equação diferencial do movimento associada a cada grau de liberdade generalizado ϕ_i é dada por

$$M_i \ddot{W}_i + C_i \dot{W}_i + K_i W_i = P_i \quad (3)$$

onde M_i , C_i , K_i e P_i são, respectivamente, a massa, o amortecimento, a rigidez e a força, todos generalizados e associados à forma modal i :

$$M_i \equiv \phi_i^T \underline{M} \phi_i \quad C_i \equiv \phi_i^T \underline{C} \phi_i \quad K_i \equiv \phi_i^T \underline{K} \phi_i \quad P_i \equiv \phi_i^T \underline{P} \quad (4)$$

A resposta dinâmica da estrutura, em termos de deslocamentos nodais, é obtida através da superposição das respostas modais W_i obtidas integrando numericamente cada equação modal com

o algoritmo Runge-Kutta. Depois, para se obter o vetor deslocamento global, é realizada a superposição na forma do somatório

$$\tilde{X} = \sum_{i=1}^n \phi_i W_i \quad (5)$$

A força de controle gerada no ACLH é representada pela parcela horizontal de massa de líquido se movimentando em sentido contrário em relação ao movimento da estrutura

$$f(t) = \frac{m_{ACLH} B}{L} \ddot{x} \quad (6)$$

A força $f(t)$ de acoplamento do ACLH à estrutura é transformada em componentes de forças generalizadas associadas a cada modo de vibração i da modelagem, e para posicioná-la segundo o grau de liberdade da estrutura discretizada onde atua o ACLH deve-se aplicar um vetor apontador \tilde{L}

$$F_i = \phi_i^T \tilde{L} f(t) \quad (7)$$

Somando F_i à força generalizada P_i na Eq. (3) tem-se a equação do movimento relativa ao i -ésimo modo com o atenuador acoplado

$$M_i \ddot{W}_i + C_i \dot{W}_i + K_i W_i = P_i + F_i \quad (8)$$

3.1 ACLH Aplicado a uma Estrutura 2GL

Em uma estrutura considerada como 2GL – dois graus de liberdade generalizados, representados pelo 1º modo de flexão lateral nas direções x e y (modos nº 1 e 2, respectivamente), ver Figura 1, os deslocamentos são obtidos através da solução das equações simultâneas de movimento

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i = p_i, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

onde x_i é o deslocamento modal e m_i , c_i , k_i e p_i são, respectivamente, a massa, o amortecimento, a rigidez e a força, generalizados e associados a cada forma modal i . Neste estudo as características dinâmicas modais da estrutura (m_i , c_i , k_i) são as mesmas nas duas direções ortogonais.

Os deslocamentos modais x_1 e x_2 se constituem nas componentes ortogonais do vetor deslocamento da estrutura, ilustrado na Figura 4 projetado no plano x - y , cujo módulo e ângulo são

$$|\mathbf{x}| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad \theta_s = \arctg\left(\frac{x_2}{x_1}\right) \quad (10)$$

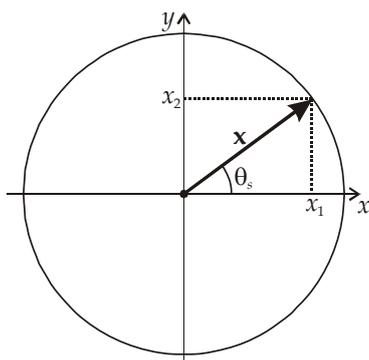


Figura 4 – Vetor deslocamento no plano x - y

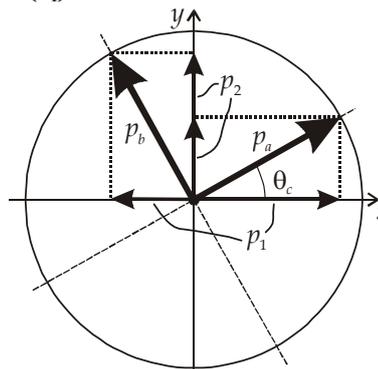


Figura 5 – Componentes da carga dinâmica

Para o acoplamento do ACLH à estrutura modelada como 2GL tem-se o seguinte sistema de equações de movimento

$$\begin{cases} (m_i + m_{ACLH})\ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i = p_i - \varphi_{a_i} m_{ACLH} \frac{B}{L} \ddot{y}_i \\ m_{ACLH} \ddot{y}_i + \frac{1}{2} \frac{m_{ACLH} \delta}{L} |\dot{y}_i| \dot{y}_i + \omega_{ACLH}^2 m_{ACLH} y_i = -\varphi_{a_i} m_{ACLH} \frac{B}{L} \ddot{x}_i \end{cases}, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

onde φ_a é o apontador do direcionamento do ACLH a partir do ângulo θ_a de sua posição, e p_i é a carga dinâmica modal, associada a cada direção x e y , devido às componentes da carga dinâmica

dada por p_a e p_b (Figura 5), para o caso de vento (forças de arrasto e lateral devido ao desprendimento de vórtices):

$$\begin{cases} \varphi_{a1} = \cos \theta_a \\ \varphi_{a2} = \sin \theta_a \end{cases} \quad \begin{cases} p_1 = p_a \cos \theta_c - p_b \sin \theta_c \\ p_2 = p_a \sin \theta_c + p_b \cos \theta_c \end{cases} \quad (12)$$

O módulo do vetor deslocamento é avaliado a cada instante de tempo, e, dentro de um intervalo igual ao período fundamental da estrutura, o valor máximo deste módulo é tomado como referência para a avaliação do ângulo da direção predominante do deslocamento da estrutura θ_s (Eq. (10)).

Após serem atendidas as duas condições simultâneas mencionadas anteriormente, o sistema de direcionamento automático do ACLH entra em operação. Ele é acionado para girar num determinado sentido a partir da comparação entre o ângulo da direção predominante do deslocamento da estrutura e o ângulo da direção em que o ACLH está posicionado naquele instante. Desta forma, a pior situação que pode ocorrer é o ACLH estar posicionado numa direção perpendicular à que a estrutura apresenta oscilação e assim ter que fazer um giro de 90 graus.

4 DIMENSIONAMENTO DO ACLH

A utilização de um sistema atenuador está condicionada às características da própria estrutura onde se quer aplicar, tais como: frequências e modos naturais de vibração dominantes e força de excitação. Além disso, é preciso determinar os parâmetros adequados do sistema atenuador, tais como frequência, amortecimento e massa do líquido, para se obter os níveis de redução desejados.

Para dimensionar o Atenuador de Coluna Líquida Híbrido (ACLH) é preciso definir os parâmetros na seguinte ordem:

- i. $\Omega = \frac{\omega_{ACLH}}{\omega_s}$: relação entre as frequências do atenuador ω_d e da estrutura ω ;
- ii. ρ : massa específica do líquido utilizado;
- iii. $\mu = \frac{m_{ACLH}}{m_i}$: relação entre a massa do atenuador m_{ACLH} e a massa modal da estrutura m_i ;
- iv. A : área da seção transversal do tubo;
- v. $\alpha = \frac{B}{L}$: razão entre o comprimento horizontal do tubo B e total de líquido L ;
- vi. δ : coeficiente de perda de carga hidráulica.

O estudo paramétrico desenvolvido por Souza *et al.* (2002) mostrou que a eficiência do ACL é muito sensível à variação dos parâmetros envolvidos em seu dimensionamento. Quanto maior é a massa do líquido do ACL melhor é a eficiência na atenuação das oscilações, porém para valores de μ acima de 4,0% não há aumento significativo da eficiência e sua aplicação prática pode se tornar inviável. O mesmo ocorre para a relação α , quanto maior é o comprimento horizontal do tubo melhor é a eficiência na atenuação das oscilações, sempre respeitando a condição de permanência do líquido nos trechos verticais do tubo. A razão de abertura do orifício do tubo atua na limitação da amplitude do movimento da coluna de líquido e é definido em parceria com os parâmetros de massa e comprimento horizontal para se atingir um desejado nível de redução.

A frequência do ACLH é determinada em função da frequência de excitação ou da frequência fundamental de vibração da estrutura, dependendo, portanto, do tipo de carregamento, do comportamento da estrutura e do nível de redução de amplitudes desejado. Grandes estruturas flexíveis da engenharia civil apresentam, em geral, frequências naturais afastadas entre si; com isso, o projeto do sistema de controle de vibrações pode ser direcionado à atenuação da amplitude da resposta dinâmica de um modo de vibração específico.

Conhecida a estrutura e o modo de vibração que domina sua resposta ao carregamento dinâmico, sintoniza-se o atenuador próximo à frequência natural deste modo. Assim, com o parâmetro Ω tem-se a frequência de oscilação do ACLH (ω_d) e com a aceleração da gravidade, determina-se o comprimento total necessário de líquido dentro do tubo

$$\omega_{ACHL} = \sqrt{\frac{2g}{L}} \rightarrow L = \frac{2g}{\omega_{ACHL}^2} \quad (13)$$

Conhecida a massa da estrutura, após a definição de μ tem-se a massa do ACLH m_{ACHL} . Definindo-se o líquido a ser utilizado obtém-se a área da seção transversal

$$m_{ACHL} = \rho AL \rightarrow A = m_{ACHL} / \rho L \quad (14)$$

O comprimento horizontal do tubo tem influência direta na força de controle do atenuador, que é representada pelo movimento da massa do líquido que se encontra no trecho horizontal do tubo. Dessa forma toma-se para α o maior valor possível, geralmente em torno de 0,90.

O coeficiente de perda de carga hidráulica é regido pela razão entre a área de abertura do orifício e a área da seção transversal do tubo e é obtido experimentalmente.

5 ESTUDO PARAMÉTRICO

5.1 Velocidade de Rotação do ACLH

Neste estudo paramétrico foi verificada a influência da velocidade de giro do ACLH na sua eficiência em reduzir as oscilações da estrutura. Também são analisadas as alterações provocadas, pelo sistema atenuador, na direção de oscilação que a estrutura apresenta.

Para isso a estrutura 2GL com o ACLH acoplado foi excitada por uma carga harmônica de frequência ω_e em ressonância com a frequência fundamental da estrutura

$$p(t) = \bar{p} \text{sen}(\omega_e t) \quad (15)$$

e cujo ângulo de incidência θ_c , medido a partir da mesma referência do ângulo θ_a do ACLH (zero graus em x positivo, ver Figura 1), inicia em 90 graus, varia linearmente até 160 segundos e depois de acordo com uma função senoidal decrescente, ilustrado na Figura 6

$$\begin{cases} \theta_c = 90 - 0,2 t & \text{para } t \leq 160s \\ \theta_c = 110 + 20 \text{sen}(0,03 t) - 0,2 t & \text{para } t > 160s \end{cases} \quad (16)$$

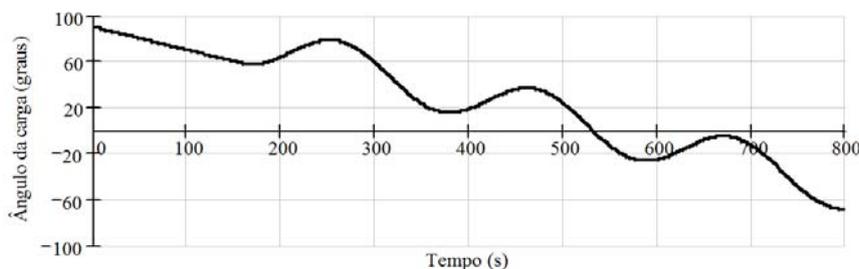


Figura 6 – Ângulo de incidência da carga

Inicialmente o ACLH está alinhado com o eixo x , $\theta_a = 0$, e após o primeiro período de avaliação da direção do deslocamento da estrutura o ACLH inicia o giro para se alinhar à direção avaliada. Desta forma, as análises iniciam com o atenuador na pior situação em termos de direcionamento, perpendicular à direção de incidência da carga e, conseqüentemente, à direção que a estrutura apresenta os deslocamentos no início da análise.

O ACLH foi dimensionado conforme os dados da e durante o estudo paramétrico somente a velocidade de rotação v_{rot} foi variada de 0,1 graus/s a 3,0 graus/s.

Tabela 1 – Dimensionamento básico do ACLH no estudo paramétrico

Parâmetro	Valor	Comentário
Rel. entre as freq. da carga dinâmica e da estrutura: ω_e/ω_s	1,0	excitação em ressonância com a freq. natural da estrutura
Relação entre as frequências do ACLH e da estrutura: Ω	1,0	atenuador sintonizado na frequência natural da estrutura
Relação entre as massas do ACLH e da estrutura: μ	2,0%	a massa de líquido é 2% da massa modal da estrutura
Rel. entre o compr. horizontal e total de líquido: α	0,9	B equivale a 90% de L
Razão de abertura do orifício: Ra	50%	o orifício restringe metade da área da seção transversal
Coefficiente de perda de carga hidráulica: δ	7,8	coeficiente equivalente a $Ra = 50\%$
Massa específica do líquido: ρ	1,0 t/m ³	o líquido utilizado foi sempre água

Para cada simulação foram avaliados os deslocamentos nas direções x e y , e também o módulo do deslocamento da estrutura (Eq. (10)) composto pelas componentes ortogonais. A razão entre o deslocamento da estrutura original $|x_o|$ e o deslocamento da estrutura com o ACLH acoplado $|x|$, é a relação de controle dinâmico γ utilizada para verificar a eficiência na atenuação das oscilações

$$\gamma = \frac{|x|}{|x_o|} \quad (17)$$

A Figura 7 mostra as respostas em termos dos deslocamentos normalizados pela amplitude máxima no topo da estrutura nas direções x e y isoladamente. Nota-se que no início da análise a estrutura só apresenta resposta em y , já que a carga parte desta direção. Mas à medida que o ângulo de incidência da carga muda as amplitudes de deslocamento em y diminuem e as em x aumentam.

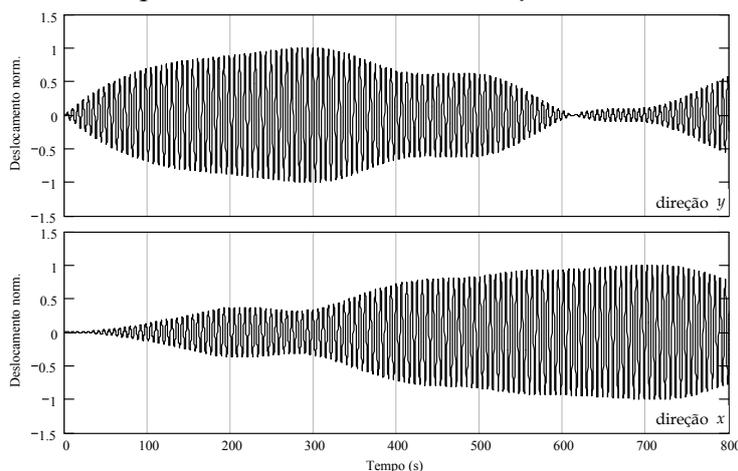


Figura 7 – Deslocamento normalizado da estrutura original nas direções y e x

A reúne os gráficos que mostram as variações angulares \times tempo do ângulo de incidência da carga, do ângulo da direção do deslocamento máximo avaliado da estrutura e do ângulo da direção de atuação do ACLH, todos contados a partir de $\theta = 0$ graus em x positivo. Foram traçadas curvas para a estrutura original e com o ACLH acoplado para valores da velocidade de rotação v_{rot} iguais a 0,1, 0,6, 1,0, 1,5 e 3,0 graus/s.

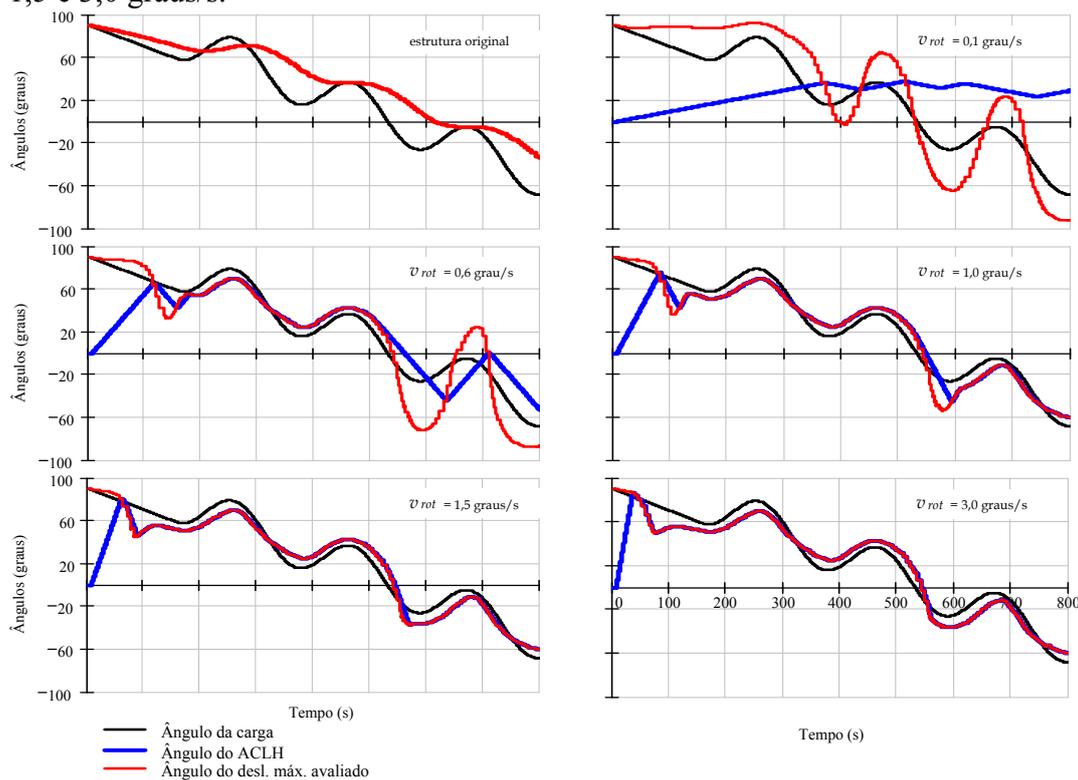


Figura 8 – Variação angular \times tempo: carga, deslocamento da estrutura e ACLH

O gráfico no canto superior esquerdo da (que traz as respostas para a estrutura original, sem o ACLH) mostra como é o comportamento desta quando submetida à carga com variação do ângulo de incidência. Nota-se que a direção do deslocamento máximo apresenta a mesma variação do ângulo de incidência da carga com uma pequena defasagem, porém com uma variação de amplitude menor do que a do ângulo da carga.

Analisando as respostas traçadas nota-se que a presença do ACLH com velocidade de rotação muito baixa faz aumentar a variação angular da direção do deslocamento da estrutura, pois a carga tem uma grande variação angular e o ACLH não consegue acompanhar as variações angulares impostas à estrutura pela carga.

Para valores crescentes de v_{rot} , o ACLH alcança mais rápido a direção do deslocamento da estrutura e mais cedo entra em operação plena. Depois persegue com maior presteza a direção do deslocamento máximo da estrutura, fazendo com que ele tenha a tendência de se apresentar da mesma forma, acompanhando a variação do ângulo da carga.

A avaliação da eficiência do ACLH na redução das amplitudes de deslocamento é feita a partir da relação de controle dinâmico γ (Eq. (17)). A porcentagem de redução de amplitude de deslocamentos é calculada através da razão das amplitudes máximas ocorridas em durante a análise.

A Figura 9 mostra os gráficos dos históricos das respostas para a estrutura original e com o sistema atenuador acoplado, nos quais nota-se que o ACLH se mostra muito eficiente mesmo com velocidade de rotação abaixo de 1,0 grau/s. Para valores da velocidade de rotação iguais ou maiores que 1,0 grau/s as respostas apresentam grande semelhança e o ACLH é ainda mais eficiente, pois é cada vez mais curto o tempo necessário para o atenuador atingir seu desempenho máximo e se torna menor a amplitude e a duração do pico apresentado no início das respostas.

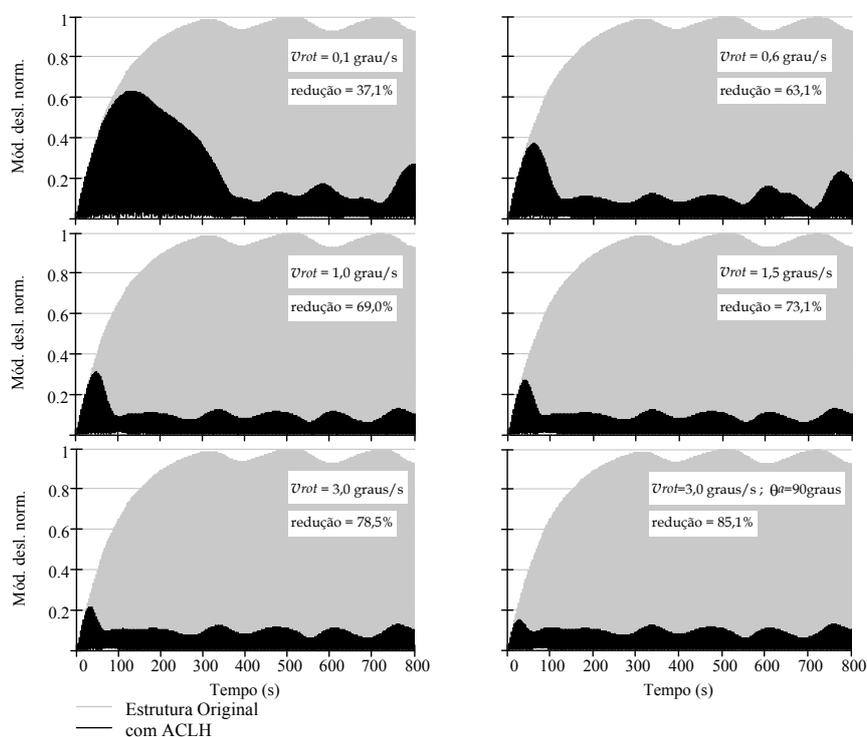


Figura 9 – Módulo do deslocamento da estrutura original e com o ACLH, para diferentes valores da velocidade de rotação do ACLH

5.2 Velocidade de Abertura do Orifício do ACLH

A ativação da abertura do orifício do Atenuador de Coluna Líquida pode ser utilizada tanto no sistema atenuador passivo unidirecional (ACL), como no sistema híbrido de direcionamento variável (ACLH). Ela se dá através de um sistema eletromecânico capaz de variar a abertura do orifício contido dentro do recipiente do ACLH. O sistema atenuador permanece sendo de natureza

passiva na geração da força de controle, porém seu amortecimento é ativo e variável em função da resposta da estrutura e da própria coluna líquida.

O orifício de abertura regulável tem como objetivo aumentar ou diminuir o amortecimento hidrodinâmico do Atenuador de Coluna Líquida Híbrido. A variação do amortecimento do ACLH tem influência direta no comportamento hidráulico e na amplitude de deslocamento da coluna líquida e deve atuar segundo duas condições básicas:

- i. permitir que a coluna líquida tenha a maior liberdade de movimento possível;
- ii. manter a integridade da coluna líquida e preservar o dimensionamento do ACLH e seu perfeito funcionamento.

A primeira condição é para que a eficiência do atenuador em reduzir os deslocamentos da estrutura seja a maior possível, quanto maior a amplitude de oscilação da coluna líquida maior será o trabalho realizado pela força de inércia fluida se contrapondo à energia de oscilação da estrutura.

A outra condição é para evitar uma eventual alteração no dimensionamento do ACLH em decorrência da perda de líquido e a consequente perda de eficiência e de controle.

A razão de abertura do orifício Ra é definida como

$$Ra = \frac{\text{área da abertura do orifício}}{\text{área da seção transversal do ACLH}} \quad (18)$$

A relação entre Ra e o coeficiente de perda de carga hidráulica δ (Tabela 2) é obtida de maneira experimental (Balendra *et al.* 1995), e destes valores tem-se a função $\delta(Ra)$ (Figura 10).

Tabela 2 – Relação entre Ra e δ

Ra (%)	δ
10	70,88
25	62,00
50	7,80
75	6,87
100	1,86

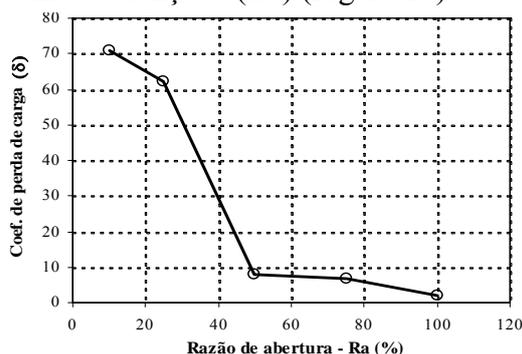


Figura 10 – Relação entre Ra e δ

O funcionamento do mecanismo de abertura e fechamento do orifício está condicionado a uma amplitude de referência de deslocamento da coluna líquida y_{lim} que foi estabelecida como 80% do valor de y_{max} , que é o valor máximo para o deslocamento da coluna líquida

$$y_{lim} = 0,80 y_{max} \quad y_{max} = (L - B)/2 \quad (19)$$

O orifício se abre automática e continuamente enquanto o deslocamento da coluna líquida permanece abaixo do valor limite. Atingindo o valor limite, o orifício se fecha continuamente, obedecendo aos valores mínimos e máximos estabelecidos para a razão de abertura do orifício

$$Ra_{min} = 10\% \quad Ra_{max} = 95\% \quad (20)$$

Assim como no estudo do direcionamento ativo, a mesma estrutura descrita anteriormente e simulada como 2GL é excitada pela carga harmônica (Eq. (15)), que neste caso tem direção fixa.

O dimensionamento básico do ACLH é o mesmo do estudo anterior () exceto para a razão de abertura do orifício Ra e o parâmetro de perda de carga δ , que é a única variável deste estudo.

Para cada simulação foram avaliados os deslocamentos comparando os resultados obtidos para a estrutura original com os obtidos para a estrutura com o ACLH acoplado. A eficiência na atenuação das oscilações é avaliada através da relação de controle dinâmico γ (Eq. (17)).

A velocidade de abertura e fechamento do orifício v_{ori} teve valores: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 $Ra(\%)/s$.

Os resultados são ilustrados no gráfico da Figura 11, onde cada curva $\gamma \times v_{ori}$ corresponde a um valor para a razão de abertura inicial do orifício Ra_i , de 10 a 90%. Os resultados para $v_{ori} = 0,0$ representam as respostas para o ACLH com a razão de abertura fixa durante toda a análise. Os valores de γ mostrados próximos às curvas do gráfico se referem à resposta para $Ra_i = 10\%$. Para uma melhor visualização, o eixo horizontal do gráfico não está em escala.

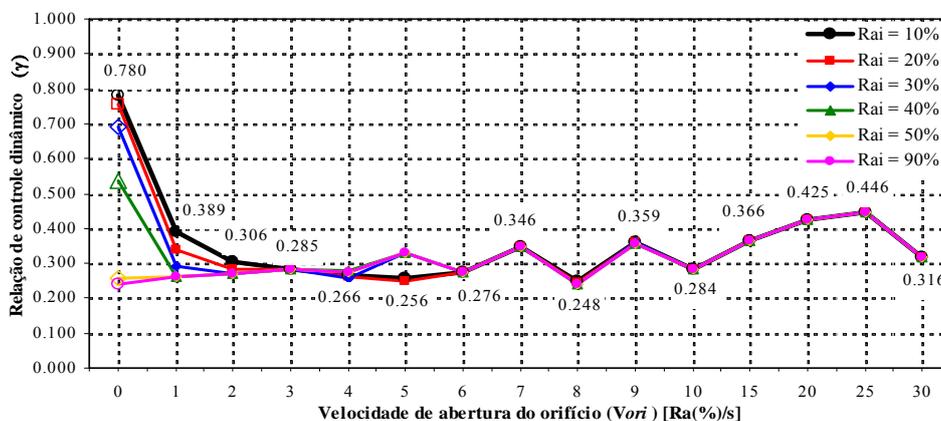


Figura 11 – $\gamma \times v_{ori}$ para diferentes valores de Ra inicial

Os resultados mostram que à medida que aumenta o valor da velocidade da abertura do orifício a relação de controle dinâmico obtida é a mesma para qualquer razão de abertura inicial.

Quando o ACLH tem, inicialmente, o orifício mais fechado, Ra_i de 10 a 40%, a ativação de sua abertura lhe confere ótimo ganho em eficiência. Quando o ACLH está dimensionado com o orifício mais aberto, Ra_i igual a 50 e 90%, a ativação de sua abertura não traz benefício em termos de eficiência do sistema atenuador em reduzir as oscilações dos deslocamentos da estrutura. Pois se com o orifício bem aberto o sistema funciona perfeitamente, respeitando a condição de limite máximo para o deslocamento da coluna líquida (Eq. (19)), não há necessidade de fechá-lo.

A Figura 12 traz uma comparação entre as respostas obtidas para dois valores de v_{ori} , 1 e 5 %/s. Cada gráfico mostra o histórico do deslocamento da coluna líquida normalizado e a variação de Ra .

Os gráficos lado a lado evidenciam a diferença de velocidade de abertura do orifício: no início ambos têm $Ra_i = 10\%$ e na simulação para $v_{ori} = 5\%/s$ o deslocamento da coluna líquida atinge o valor de referência já aos 30 segundos da análise, enquanto que para $v_{ori} = 1\%/s$ isso ocorre aos 49 segundos. Ainda, para $v_{ori} = 5\%/s$ o orifício chega a ser aberto até o limite de 95%, e após isso varia entre 46 e 95%, enquanto que para $v_{ori} = 1\%/s$ fica entre 46 e 59%.

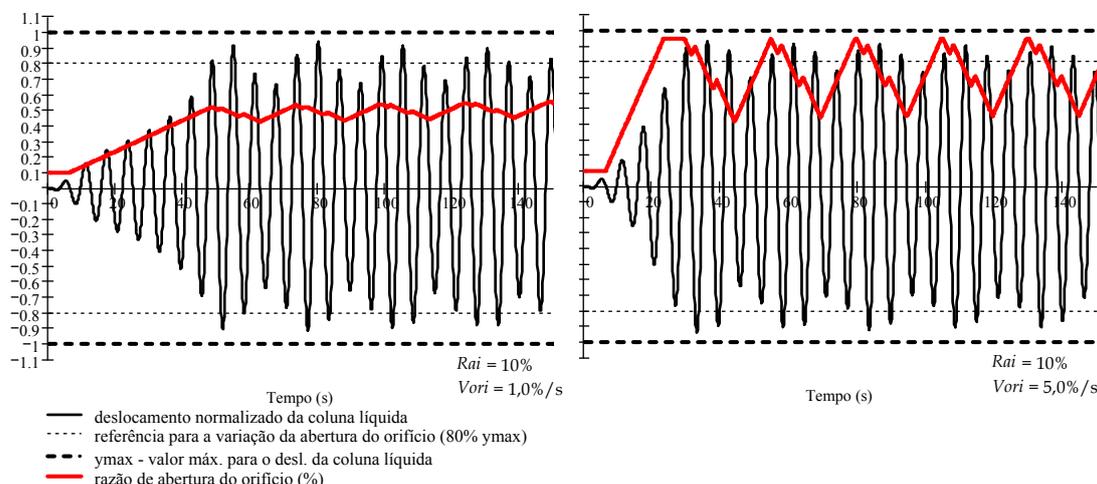


Figura 12 – Deslocamento normalizado da coluna líquida e variação de Ra

6 APLICAÇÃO DO ACLH A UMA ESTRUTURA ESBELTA

Com o objetivo de testar a eficiência do Atenuador de Coluna Líquida Híbrido quando a estrutura está submetida à carga de vento, formulada pelas parcelas de arrasto e vorticidade, foi utilizado como exemplo de aplicação a estrutura de uma das torres do World Trade Center (WTC), Nova York, EUA (Figura 13 (a)).

As torres do WTC tinham a estrutura em aço constituída por uma grelha nas fachadas, formando uma estrutura tubular, e por um núcleo aperticado simples (Figura 13 (b)). A grelha das fachadas apresentava a forma quadrada com chanfros e o núcleo tinha forma retangular (Figura 13 (c)).

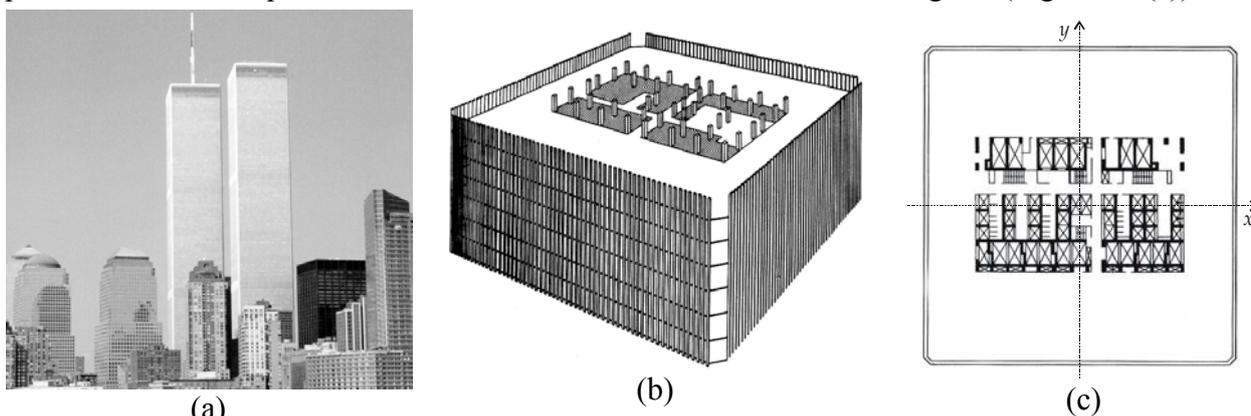


Figura 13 – Torres do WTC (Hart *et al.* 1978)

A forma retangular do núcleo constituía diferentes rigidezes nas duas direções ortogonais, e propiciava uma pequena diferença entre as frequências naturais dos dois modos de vibração lateral. Para incorporar mais amortecimento à estrutura, a torre dispunha de amortecedores visco-elásticos instalados na junção entre a estrutura de suporte dos pavimentos e a grelha da fachada.

Os valores das características dinâmicas modais da torre do WTC são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dinâmicas modais da torre do WTC

	Modo 1 (direção X)	Modo 2 (direção Y)
Massa	52823 t	51419 t
Frequência natural	0,1080 Hz	0,1025 Hz
Período	9,260 s	9,758 s
Rigidez	24320 kN/m	21317 kN/m
Taxa de amortecimento	2,5%	2,5%

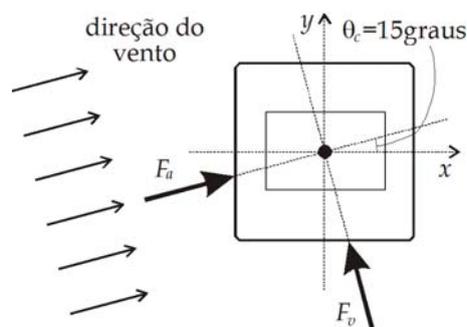


Figura 14 – Direção da carga de vento

A carga dinâmica decorrente da ação do vento é expressa através de duas componentes ortogonais (Simiu e Scanlan 1996): a força de arrasto (F_a), que ocorre na direção do vento devido à parcela laminar da velocidade do vento e à turbulência causada pela flutuação desta velocidade; e a força lateral (F_v), que ocorre na direção perpendicular à do vento devido ao desprendimento alternado de vórtices. O ângulo da direção do vento foi de $\theta_c = 15$ graus, como mostra a Figura 14.

As forças de arrasto e vorticidade, em ressonância com a estrutura, são

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho_{ar} A_s C_d (U_z + U_f(t))^2 \quad F_v(t) = \frac{1}{2} \rho_{ar} A_s C_l U_z^2 \text{sen}(\omega_v t) \quad (21)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar, A_s é a área frontal efetiva da estrutura, C_d é o coeficiente de arrasto, U_z é a velocidade média na altura z , U_f é a flutuação da velocidade, C_l é o coeficiente de força lateral e ω_v é a frequência de desprendimento de vórtices.

A área efetiva da estrutura, a velocidade média à altura z e a frequência de desprendimento de vórtices são calculadas, respectivamente, a partir de:

$$A_s = D \frac{h}{3} \quad U_z = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{0,3} \quad \omega_v = \frac{2 \pi S_t U_z}{D} \quad (22)$$

onde D é a dimensão característica da estrutura, h é a altura da estrutura, U_{10} é a velocidade média na altura de referência $z = 10\text{m}$ e S_t é o número de Strouhal.

A velocidade de projeto a 10 metros de altura é calculada da seguinte forma (ABNT 1987)

$$V_p = 0,34 V_{50} S_1 S_3 \quad (23)$$

onde V_{50} é a velocidade básica do vento para um período de retorno de 50 anos, S_1 é o fator topográfico e S_3 é o fator estatístico, que caracteriza o grau de segurança e vida útil da estrutura. A velocidade básica do vento é definida como a velocidade de uma rajada de 3 segundos com período de retorno de 50 anos, a 10 metros acima do terreno em campo aberto e plano.

Os valores dos parâmetros que determinam a carga dinâmica de vento são mostrados na Tabela 4, onde também constam o valor da frequência de despreendimento de vórtices calculada e a relação desta com as frequências naturais da estrutura. Vê-se que o fenômeno de despreendimento de vórtices se encontra praticamente em ressonância com a estrutura.

Tabela 4 – Parâmetros da carga dinâmica de vento aplicada à torre do WTC

Vel. básica do vento para um período de retorno de 50 anos	$V_{50} = 29,0\text{m/s} = 104\text{km/h}$
Vel. média do vento a 10 metros de altura	$U_{10} = 10,8\text{m/s} = 39\text{km/h}$
Velocidade média do vento à altura $z = h$	$U_{z=h} = 33,1\text{m/s} = 119\text{km/h}$
Massa específica do ar	$\rho_{ar} = 1,25\text{kg/m}^3$
Dimensão característica da estrutura	$D = 63,5\text{m}$
Altura da estrutura	$H = 417,2\text{m}$
Coeficiente de arrasto	$C_d = 1,5$
Coeficiente de força lateral	$C_l = 0,8$
Número de Strouhal	$S_t = 0,2$
Fator topográfico: terreno plano	$S_1 = 1,0$
Fator estatístico: ruína total ou parcial afeta a segurança e socorro a vítimas	$S_3 = 1,10$
Freq. de despreendimento de vórtices	$\omega_v = 0,1046\text{Hz}$
Relação entre a freq. de despreendimento de vórtices e as frequências naturais da estrutura	Modo 1: 0,969 Modo 2: 1,021

Tabela 5 – Dimensionamento do ACLH para a torre do WTC

Parâmetro	valor
Líquido	Água
Massa específica líquido	ρ 1,0t/m ³
Relação de massa	μ 3,0%
Relação entre frequências	Ω 1,0
Relação B/L	α 0,85
Razão abertura do orifício	Ra 42%
Coef. perda carga hidráulica	δ 25,144
Velocidade de rotação	v_{rot} 1grau/s
Compr. total de líquido	L 47,308m
Compr. trecho horizontal	B 40,212m
Área da seção transversal	A 33,497m ²
Massa de líquido	m_{ACLH} 1584,68t
Frequência angular natural	ω_{ACLH} 0,6439rad/s
Frequência cíclica natural	f_{ACLH} 0,1025Hz
Período natural	T_{ACLH} 9,758s

O ACLH foi dimensionado em sintonia com o primeiro modo de vibração, referente à direção y (ver Figura 13 (b)), que apresenta a frequência mais baixa (ver Tabela 3). Os valores dos parâmetros de dimensionamento do ACLH são mostrados na Tabela 5.

Inicialmente o ACLH está alinhado com a direção da carga ($\theta_a = 15\text{graus}$), pois é a pior situação que pode ocorrer, já que a estrutura responde com maiores amplitudes na direção perpendicular à do vento devido à parcela da carga de vento referente à força de vorticidade. Com isso o atenuador terá que girar 90 graus até encontrar a direção que a estrutura está apresentando oscilações.

A Figura 15 mostra as variações da resposta em amplitude de deslocamentos do topo da torre do WTC separadamente em cada direção. Nota-se o comportamento diferente de cada resposta.

Na direção y tem-se grandes amplitudes de resposta harmônica (associada à ressonância aeroelástica), da ordem de 3,7 metros para a estrutura original e 2,5 metros para a estrutura com o ACLH, de notável eficiência.

Na direção x a resposta tem variação aleatória de amplitudes menores, (0,9 metros) oscilando em torno de um valor (0,36 metros) equivalente ao deslocamento referente à parcela da velocidade média de vento. A curva referente à resposta da estrutura com o ACLH praticamente sobrepõe toda a curva referente à resposta da estrutura original, mostrando que nessa direção o atenuador não é funcional.

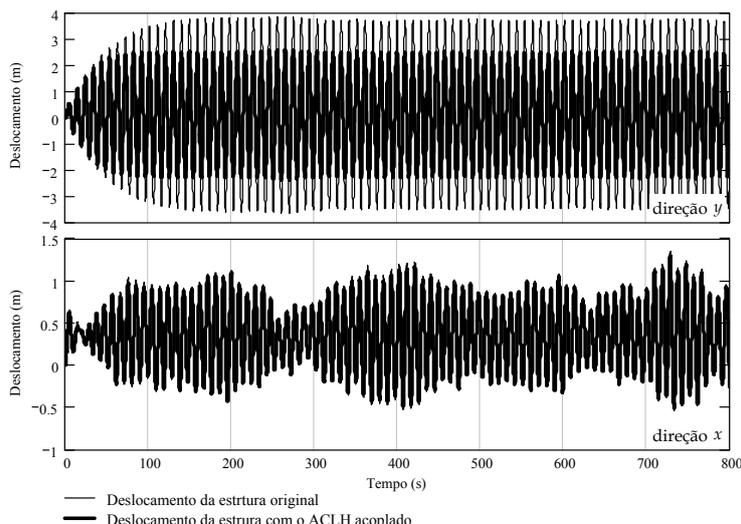


Figura 15 – Deslocamento no topo da torre do WTC nas direções x e y

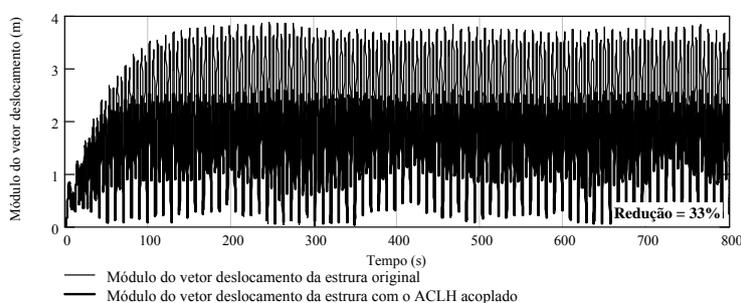


Figura 16 – Módulo do deslocamento no topo da torre do WTC

A avaliação da eficiência do ACLH em redução dos deslocamentos da estrutura é verificada através da comparação entre os módulos do vetor deslocamento, traçados no gráfico da Figura 16, onde se vê claramente o efeito da redução de 33% que se obtém com o ACLH acoplado.

As variações angulares apresentadas pela direção dos deslocamentos no topo da estrutura da torre do WTC e pela direção de atuação do ACLH são mostradas no gráfico da Figura 17, onde os ângulos são medidos a partir do eixo x positivo. Vê-se nesta figura que a estrutura inicia em zero e rapidamente atinge a direção de 95 graus, onde permanece oscilando, enquanto que o ACLH inicia em 15 graus e vai de encontro à direção da estrutura.

A trajetória do deslocamento do topo da torre do WTC para a estrutura com o ACLH acoplado projetado no plano x - y , é traçada no gráfico da Figura 18. Que mostra a direção predominante que a estrutura apresenta as oscilações, praticamente perpendicular à direção do vento.

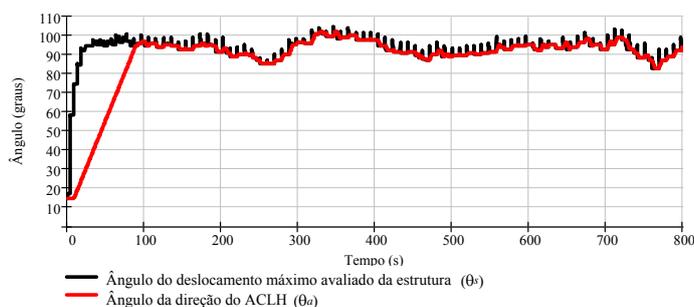


Figura 17 – Variação angular \times tempo: deslocamento máximo no topo da estrutura e direção do ACLH

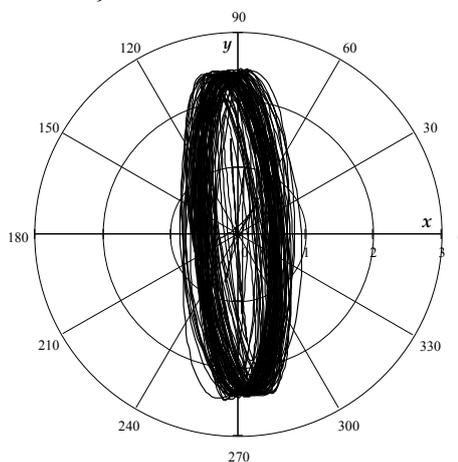


Figura 18 – Trajetória do deslocamento do topo da estrutura com o ACLH, plano x - y

7 CONCLUSÕES

O Atenuador de Coluna Líquida Híbrido (ACLH) com direcionamento ativo é muito eficiente na atenuação das amplitudes de oscilação lateral de estruturas de edifícios altos e esbeltos sujeitos a ações dinâmicas, especialmente quando são excitadas em ressonância, mesmo para velocidades de giro relativamente baixas. O sistema ativo de direcionamento é capaz de identificar a direção predominante em que a estrutura apresenta os maiores deslocamentos e assim fazer girar o ACLH até a direção ótima.

O ACLH com sistema ativo de abertura e fechamento do orifício localizado no interior do tubo mostrou que a variação do amortecimento do atenuador não lhe confere mais eficiência se ele já estiver dimensionado com um amortecimento ótimo para uma determinada carga de projeto.

Quando aplicado à estrutura de um edifício alto sujeito à carga dinâmica de vento, composta pelas forças de arrasto e lateral, o ACLH com direcionamento ativo se mostrou eficiente em atenuar os deslocamentos de grande amplitude observados para a estrutura original.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1987). *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*, Rio de Janeiro.
- Balendra, T., Wang, C.M., Cheong, H.F. (1995). Effectiveness of Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Towers. *Engineering Structures*, v. 17, n. 9, pp. 668-675.
- Battista, R.C., Carvalho, E.M.L., Souza, R.A. (2008). Hybrid Fluid-Dynamic Control Devices to Attenuate Slender Structures Oscillations. *Engineering Structures*, v. 30, n. 12, pp. 3513-3522.
- Battista, R.C., Pfeil, M.S. (1996). Active/Passive Control of Vortex-Induced Oscillations of Rio-Niterói Bridge. *Proceedings of The Third European Conference on Structural Dynamics: Eurodyn'96*, pp. 561-567, Florence.
- Battista, R.C., Pfeil, M.S. (2009). Double Controller of Wind Induced Oscillations in Telecom Towers. *Proceedings of International Seminar on Modeling and Identification of Structures Subjected to Dynamic Excitation*, pp. 67-81, UPF Editora-RS.
- Battista, R.C., Pfeil, M.S. (2010). Control of Wind Oscillations of Rio-Niterói Bridge. *Proceedings of ICE-Institute of Civil Engineers, UK, Journal of Structures and Buildings*, v. 163, pp. 87-96.
- Den Hartog, J.P. (1972). *Vibrações nos Sistemas Mecânicos*, Ed. Edgard Blücher, São Paulo.
- Frahm, H. (1909). *Device for Damping Vibrations of Bodies*, United States Patent nº 989958.
- Hart, F., Henn, W., Sontag, H. (1978). *Multi-Storey Buildings in Steel*, Granada Publishing, Ltd., London.
- Pinheiro, M.A.S. (1997). *Absorção Pendular Não-Linear para Redução de Vibrações em Torres Esbeltas*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Sakai, F., Takaeda, S., Tamaki, T. (1989). Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations, *Proceedings of the International Conference on Highrise Buildings*, Nanjing, China, pp 926-931.
- Simiu, E., Scanlan, R.H. (1996). *Wind Effects on Structures*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Souza, R.A., Battista, R.C., Carvalho, E.M.L. (2002). Atenuador de Coluna de Líquido para Redução de Vibrações em Estruturas. *Anais XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília.
- Souza, R.A., Carvalho, E.M.L., Battista, R.C. (2000). Sistema Fluido para Absorção de Vibrações Estruturais. *Anais XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, Punta del Este.