1 Introdução

Em virtude dos constantes avanços nas áreas de materiais e técnicas construtivas, aliadas ao desenvolvimento dos métodos de cálculo e às necessidades tecnológicas, as estruturas do tipo torres de telecomunicações têm-se tornado cada vez mais altas e esbeltas. A Figura 1.1 apresenta algumas torres de telecomunicações.

(a) CN Tower, Toronto, 553m.

(b) Europe Tower, Frankfurt, 331m.

(c) Torre da TV, Brasília, 224m.

(d) Torre da Telepar, Curitiba, 109.4m.

Figura 1.1: Torres de telecomunicações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

As torres de telecomunicações, devido a sua altura e esbeltez, estão cada vez mais vulneráveis à ocorrência de vibrações excessivas causadas por carregamentos dinâmicos, tais como, por exemplo, ventos e terremotos.

A ação do vento é de suma importância nas torres, pois gera vibrações por flexão, ocasionando grandes deslocamentos e rotações no topo das mesmas. Estas vibrações causam irregularidades nos sinais de torres de telecomunicação, em função de desvios excessivos das antenas, trazendo também certo desconforto às pessoas, em função do movimento, no caso de torres altas com plataformas de observação. Em certos casos estas vibrações podem até mesmo afetar a integridade estrutural da torre.

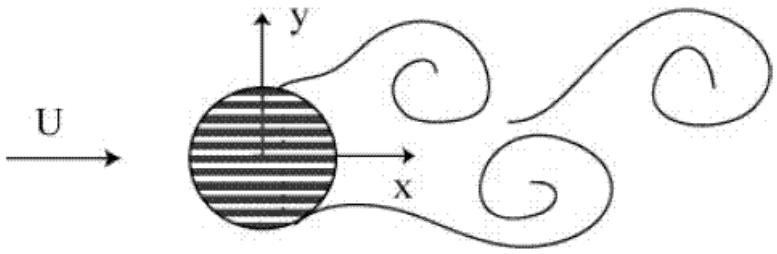

Figura 1.2: Desprendimento de vórtices (Techet, 2005).

As vibrações por flexão em torres são usualmente provocadas pelo desprendimento cadenciado de vórtices, como ilustrado na Figura 1.2, gerando uma força perpendicular à incidência do vento na torre, sendo essa força lateral uma força praticamente harmônica. Conceitos e estudos do comportamento de estruturas submetidas à ação do vento são apresentadas por Korenev & Reznikov (1993) e Pinheiro (2004).

Uma alternativa para minimizar estas vibrações, amplamente estudada nas últimas décadas, é o controle estrutural, que é capaz de absorver e dissipar parte da energia vibratória. O controle estrutural basicamente promove uma alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas (Avila *et al.*, 2005). Estruturas sujeitas a ações dinâmicas, projetadas com esses mecanismos de controle, apresentam vida útil maior, pois as amplitudes de vibração são menores (Pinheiro, 1997). Conceitos básicos, experimentos e aplicações práticas desses dispositivos são encontrados em Korenev & Reznikov (1993) e Soong & Dargush

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

(1997), dentre outros. No Brasil as aplicações práticas de controle estrutural ainda não estão muito difundidas, mas vem atraindo a atenção da comunidade científica devido a sua importância, resultando numa série de trabalhos. Dentre as pesquisas correlacionadas com esse trabalho, podem-se citar: Magluta (1993), Pinheiro (1997), Pinto (1999), Marques (2000) e Avila (2002).

Hoje existem várias metodologias de controle de vibrações em estruturas, que vão desde técnicas simples baseadas na introdução de materiais amortecedores passivos, modificação e otimização do projeto estrutural, até o uso de sofisticados sistemas de controle ativo em malha fechada (Marques, 2000). Nesse contexto, um controle estrutural em franca expansão são os absorsores dinâmicos de vibrações (ADVs). Esse tipo de controle estrutural tem-se revelado robusto, confiável e econômico, sendo que, por essa razão, os ADVs tornaram-se objeto da atenção dos pesquisadores e engenheiros em todo o mundo.

A invenção do ADV é associada ao nome de Frahm, que em 1909 patenteou o primeiro projeto de um ADV (Korenev & Reznikov, 1993). De acordo com Borges *et al.* (2005), pode-se citar como aplicações práticas desses dispositivos os estabilizadores de navios, a absorção de vibração em linhas de transmissão de potência, a redução de vibração em estrutura rígida contínuas de grande porte, torres, edifícios altos e pontes, dentre outras.

Nesse tipo de controle, o sistema auxiliar (ADV), a partir de suas propriedades de massa, rigidez e amortecimento, é responsável pela criação de forças de inércia, forças elásticas e de amortecimento opostas às forças atuantes na estrutura, fazendo com que o trabalho realizado pela força distribuída na estrutura principal seja reduzido. De acordo com Avila *et al* (2005), a adição de um ADV tem como objetivo trazer a amplitude do pico de ressonância para seu mais baixo valor possível, a fim de que amplificações menores ao longo de uma faixa mais larga de freqüência próxima à de ressonância possam ser atingidas.

Os absorsores dinâmicos de vibrações são divididos em: passivos, onde a magnitude das forças de controle é dependente das propriedades do próprio sistema auxiliar; adaptativos, que são aqueles cujos parâmetros físicos de massa, rigidez e amortecimento podem ser ajustados; e híbridos, que dispõem de um elemento ativo (atuador), colocado paralelamente aos elementos passivos. Avila (2002) apresenta uma revisão bibliográfica detalhada sobre os diversos dispositivos de controle estrutural.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

No ADV passivo a magnitude das forças de controle depende apenas de suas propriedades físicas de massa, rigidez e amortecimento. De acordo com Marques (2000), a escolha de seus parâmetros de inércia, amortecimento e rigidez é baseada na sintonização de sua freqüência natural à freqüência de excitação harmônica cujo valor é admitido como fixo. Os ADVs passivos destacam-se dos demais por não necessitarem de energia e não causarem instabilidade, sendo simples e confiáveis. Entretanto, há limitações no uso dessa tecnologia, já que os dispositivos são projetados de forma a funcionar eficientemente dentro de uma determinada faixa de freqüência (Avila, 2002). Uma vez que a estrutura seja excitada fora da faixa de freqüência de projeto, o controle reduz sua eficiência. Liu & Liu (2004), oferecem uma detalhada contribuição ao estudo de absorsores dinâmicos de vibrações passivos, introduzindo novos conceitos e apresentando novos parâmetros ótimos.

No campo dos AVDs passivos, Mustafa & Ertas (1995), Ertas *et al.* (2000), Cuvalci (2000) e Yaman & Sen (2004) apresentam estudos do comportamento de um absorsor pendular acoplado a uma estrutura de um grau de liberdade. Todos destacam a eficiência desse dispositivo na redução das vibrações da estrutura. Mustafa & Ertas (1995) mostram a influência de uma mola torsional junto ao absorsor pendular no ponto de conexão desse com a estrutura. Ertas *et al.* (2000) e Yaman & Sen (2004) estudam a influência da não-linearidade geométrica da estrutura principal e Cuvalci (2000) analisa o comportamento desse sistema com a adição da não-linearidade do absorsor pendular. Mais recentemente, Vyas & Bajaj (2001) estudaram o comportamento de vários absorsores pendulares acoplados a uma estrutura principal de um grau de liberdade. Naquele trabalho também é apresentado um estudo do comportamento do sistema com a variação dos parâmetros dos absorsores e sua influência na qualidade dos resultados. Já Pirner (2002) apresenta um absorsor esférico de vibrações, descrevendo a teoria, experimentos e aplicações práticas e Naprstek & Pirner (2002) demonstram o comportamento não-linear e estabilidade dinâmica desse dispositivo de controle.

Os ADVs adaptativos são aqueles cujos parâmetros físicos de massa, rigidez e amortecimento podem ser ajustados, conferindo aos dispositivos a capacidade de sintonização em uma gama maior de freqüências (Marques, 2000). Ainda, nesse contexto, os recentes avanços tecnológicos obtidos na produção dos chamados materiais inteligentes (materiais piezelétricos, materiais com memória forma,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

fluidos eletro-reológicos e magneto-reológicos) oferecem amplas possibilidades para a proposição de novas configurações de ADVs adaptativos. Winthrop *et al.* (2005) apresentam uma sumarização dos diversos mecanismos de controle de rigidez, fazendo uma comparação da performance desses dispositivos e mostram, ainda, que os resultados encontrados na literatura podem ser explicados a partir da solução exata por eles obtida. Finalizando, apresentam uma ferramenta para o uso dessa técnica em sistema com dispositivos de controle adaptativo de rigidez.

No que diz respeito aos ADVs adaptativos, Franchek *et al.* (1995) propõem um absorsor adaptativo, que tem a rigidez controlada por um algoritmo de realimentação robusto que é baseado nas variações dos parâmetros do absorsor e é insensível a outras perturbações ou mudanças. Williams *et al.* (2002) apresentam um absorsor adaptativo que utiliza uma liga de memória forma para controlar a rigidez, aumentando assim a faixa de freqüência em que o absorsor atua de forma eficiente. Eles apresentam ainda uma discussão das propriedades desse material e seu uso como um material estrutural adaptável no controle de vibrações. Mais tarde, Williams *et al.* (2005) iriam expandir os conceitos do absorsor adaptativo com liga de memória forma utilizando um controlador não-linear, mostrando a melhoria na performance do absorsor. Já Nagarajaiah & Varadarajan (2005) propõem um novo algoritmo para controle de rigidez do absorsor adaptativo para estruturas altas e esbeltas.

Os ADVs híbridos ou ativos possuem um elemento ativo (atuador), colocado paralelamente aos elementos passivos, sendo a força exercida pelo atuador calculada através de uma estratégia de controle previamente estabelecida (Marques, 2000). De acordo com Avila (2002), esse tipo de controle tem a vantagem de exigir forças de magnitudes bem menores nos atuadores que no controle puramente ativo, gerando uma redução considerável no custo, além de um desempenho mais eficiente quando comparado ao controle passivo, ampliando assim a faixa de freqüências em que o mesmo funciona de forma eficiente. Ainda, o ADV híbrido tem a vantagem de seu componente passivo propiciar um certo grau de proteção à estrutura na falta de energia.

Filipovic & Schoroder (1998) apresentam um tipo de absorsor ativo que possui realimentação local, mostrando os conceitos e o comportamento desse dispositivo. Já Jalili & Olgac (1999) apresentam um absorsor ativo que possui múltiplos ressonadores defasados para controlar as vibrações de estruturas com

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

vários graus de liberdade. Oueini *et al.* (1999) propõem um absorsor não-linear ativo baseado na introdução de um absorsor na estrutura juntamente com um sensor e um atuador, onde a realimentação e o controle do sinal são quadráticos.

Nesse estudo aborda-se o comportamento de uma torre com um absorsor dinâmico de vibração sujeita a um dado carregamento harmônico senoidal, que representa, de maneira simplificada, uma carga dinâmica de vento. O ADV utilizado para reduzir as vibrações da torre é o absorsor pendular, que está fixado na extremidade superior da estrutura. Inicialmente, considera-se que o sistema de controle é passivo. Posteriormente, com base no comportamento do absorsor passivo, é proposto um ADV híbrido.

Uma característica do absorsor pendular é que ele pode desenvolver oscilações em regime não-linear, diferente da maioria dos sistemas de absorção massa-mola ou outros mais comuns, sendo o seu uso bastante adequado a estruturas do tipo torre. Assim, deve-se ter um conhecimento melhor dos parâmetros de eficiência no regime não-linear de oscilação. Ao considerar apenas as equações que regem o movimento desse sistema no regime linear, tem-se que os resultados não são confiáveis. Ainda, o modelo matemático que melhor representa o funcionamento do absorsor é dado pelas equações não-lineares completas, contendo os termos de inércia, elástico e amortecimento do absorsor pendular dinâmico de vibrações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

1.1. Motivação

A motivação para o estudo de absorsores dinâmicos de vibrações é o grande interesse da comunidade científica que afirma que o controle estrutural tem um grande potencial para melhorar a performance de estruturas existentes ou novas. Para Avila (2002), obstáculos devem ser superados antes que essa tecnologia de controle estrutural seja aceita de forma geral pelos profissionais de engenharia e construção, apesar dos estudos já realizados e do razoável número de aplicações práticas (Spencer Jr. & Sain, 1997).

1.2. Objetivos

Essa dissertação está inserida na linha de pesquisa em Instabilidade e Dinâmica das Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Pretende-se com essa pesquisa fornecer uma contribuição na área de proteção de estruturas civis contra excitações dinâmicas indesejáveis.

O objetivo é aprofundar o estudo paramétrico do sistema torre-pêndulo no regime não-linear, abordando aspectos gerais ligados à estabilidade dinâmica e propor um sistema de controle estrutural híbrido para controle de vibrações por flexão em torres de telecomunicações.

1.3. Organização do Trabalho

O presente trabalho constitui-se de oito capítulos, incluindo-se esse de introdução, onde são apresentados conceitos básicos, formulações utilizadas, resultados obtidos, conclusões e sugestões para continuação da pesquisa, a saber:

O capítulo 2 apresenta a formulação necessária para obter o funcional de energia, tanto para o caso linear quanto para o caso não-linear. Além disso, são obtidas as equações de movimento através dos funcionais de energia.

No capítulo 3 é apresentada a solução analítica das equações lineares de movimento para obter as freqüências naturais e os modos de vibração de alguns casos relevantes de coluna, para esse estudo.

O capítulo 4 mostra a metodologia utilizada para obter as freqüências e modos de vibração do sistema coluna-pêndulo. Ainda, é feita uma correlação entre o sistema coluna-pêndulo com um modelo discreto de dois graus de liberdade, de onde obtêm-se as equações de movimento do sistema coluna-pêndulo. Na seqüência é apresentada uma análise linear das equações de movimento do sistema, donde são obtidas algumas relações ótimas para o sistema de absorção.

No capítulo 5 é investigado o desempenho do pêndulo absorsor na redução das oscilações da coluna, bem como o comportamento das amplitudes máximas de deslocamento, velocidade e aceleração do sistema.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC

No capítulo 6 é apresentada uma análise da influência do grau de não-linearidade do sistema na resposta, bem como uma análise dos casos onde se tornem necessários ajustes do absorsor pendular.

No capítulo 7 é proposto um absorsor dinâmico de vibrações híbrido, que consiste na junção do absorsor pendular (controle passivo) com uma força de controle ativo (atuador).

Por fim, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para continuação desse trabalho.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410763/CC