

# 1 Introdução

Torres estaiadas, Figura 1.1, consistem de uma coluna geralmente rotulada na base, e ancorada lateralmente com vários estais, em geral cabos de aço, e são freqüentemente usadas como suporte de antenas de transmissão de sinais de TV, rádio e telecomunicações. Segundo El-Ghazaly e Al-Khaiat [1], torres estaiadas têm sido também empregadas como suporte para coletores de energia solar e em estruturas off-shore. Uma outra aplicação de torres estaiadas, comum nas últimas décadas, é como suporte de coberturas de grandes espaços, tais como estádios e galpões industriais, e tabuleiros de pontes. Nestas aplicações, a torre tem geralmente seção triangular, quadrada ou tubular.

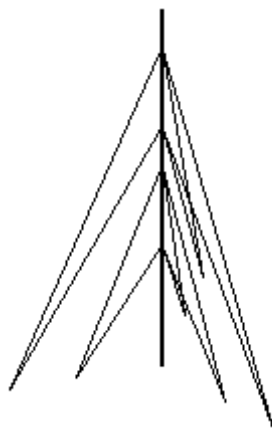


Figura 1.1: Modelo de uma torre estaiada.

O comportamento das torres estaiadas é essencialmente não linear, devido principalmente aos cabos, que, quando sujeitos apenas ao seu peso próprio, têm sua forma descrita pela equação da catenária, onde uma mudança na geometria da torre produz uma variação não-linear na força que o cabo exerce sobre a mesma. Tem-se ainda a não-linearidade geométrica da própria coluna.

As cargas acidentais a que estes tipos de estruturas estão sujeitas são vento, terremotos, ruptura de cabos e, em alguns países, gelo. De acordo com Madugula et al. [2] (apud Mulherin), desde 1959 até recentemente, já foram relatados cerca de cem casos de colapso de torres estaiadas no EUA. Aliado a

isto, tem-se uma demanda cada vez maior de torres, ocasionadas principalmente pela expansão das telecomunicações. Com isto, estas estruturas se tornam cada vez mais esbeltas, tornando-se cada vez mais relevante para a execução de um projeto confiável, o conhecimento sobre sua estabilidade na presença de cargas estáticas e dinâmicas. Nas Figuras 1.2 e 1.3 são mostrados alguns exemplos de torres estaiadas.



Figura 1.2: Torres estaiadas com seção triangular.



Figura 1.3: Torres estaiadas com seção tubular.

Quanto à posição dos estais, existem diversas disposições que são usuais na prática, dentre as quais se destacam as configurações com cabos em leque, tendo o leque a origem na torre ou no ponto de fixação ao solo, e com cabos em paralelo. Estas configurações mais usuais estão ilustradas na Figura 1.4.

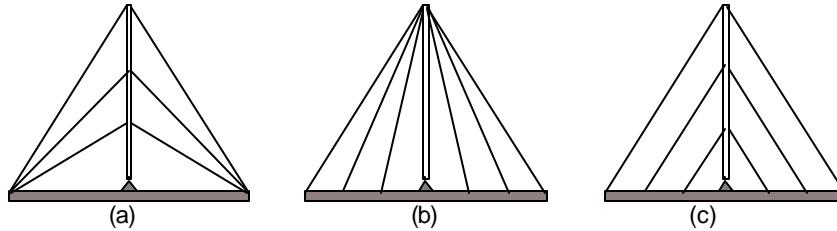


Figura 1.4: Configurações usuais de torres estaiadas.

Na literatura consultada, os trabalhos mais antigos estão mais relacionados com o desenvolvimento de metodologias para determinação dos esforços, visando o projeto [3, 4]. No que se refere ao estudo da estabilidade de torres estaiadas e ao comportamento dinâmico das mesmas, pode-se citar os seguintes trabalhos encontrados na literatura mais recente:

El-Ghazaly e Al-Khaiat [1] apresentam uma análise estática linear, utilizando o ANSYS, de uma torre de 600m de altura, discretizada por elementos de viga coluna. Os cabos são representados como apoios elásticos, com lei constitutiva bi-linear.

Madugula [2] comparou as frequências naturais em modelo planos, obtidas experimentalmente, com as determinadas em uma análise com elementos finitos, discretizando a coluna em elementos de viga coluna ou treliça. Os estais são modelados como cabos. Ele mostra que ambos os elementos conduzem aos valores obtidos experimentalmente e conclui, entre outras coisas, que um aumento na altura da torre tem grande efeito sobre a redução da frequência natural e que um acréscimo das tensões iniciais dos cabos produzem um significativo aumento da frequência natural.

Hull [5] apresenta uma análise linear da estabilidade de torres estaiadas, utilizando um modelo de viga coluna. Ele deduz que a estabilidade da torre é mais afetada pelo aumento de rigidez dos cabos que pelo aumento da rigidez da torre, ocasionado pelo aumento do momento de inércia. Com relação aos cabos, ele conclui que é mais econômico elevar a carga de flambagem através do aumento de seu comprimento e, em menor escala, através do aumento de sua seção transversal.

As referências [6, 7] apresentam um estudo da resposta dinâmica de torres estaiadas, sendo que a última simula o efeito do rompimento de cabos na

resposta dinâmica da estrutura. Outros estudos que dizem respeito a torres estaiadas podem ser consultados nas referências [8, 9].

Entretanto estes trabalhos se restringem ao estudo de casos específicos e as conclusões são baseadas exclusivamente nos dados obtidos da solução numérica destes modelos. Não foram encontrados na literatura estudos paramétricos que demonstrem a influência dos vários parâmetros de controle na estabilidade estática e dinâmica da torre, mesmo no caso linear. A influência destes parâmetros no comportamento não-linear da torre praticamente não existe na literatura.

Na literatura, o modelo usualmente empregado para representar a coluna da torre é o de uma viga coluna elástica. Segundo Wahba et al. [6], os modelos simplificados recomendados pela International Association for Shells and Spatial Structures na análise de torres estaiadas são dois: (1) modelo de viga coluna com suportes elásticos não lineares representando os cabos, e (2) via elementos finitos, com a utilização de um modelo de viga coluna elástica para a torre e elementos de cabos (treliça) para os estais. Muitas das simplificações feitas na análise, deve-se a falta de conhecimento do comportamento não-linear da torre.

Neste trabalho desenvolveram-se dois modelos, no primeiro os cabos são resolvidos pela equação da catenária e o segundo consiste em representar os cabos como molas com diversas leis constitutivas. Ambos consideram a coluna como sendo rígida. Apesar disto limitar a aplicabilidade dos modelos, há muitos casos em que esta simplificação é válida, como o da Figura 1.3, por exemplo. Quanto aos cabos, foram considerados inextensíveis.

A partir destes dois modelos, estuda-se a estabilidade estática e dinâmica, utilizando para isto critérios de energia, em particular, o princípio da energia potencial mínima e o princípio de Hamilton.

A análise estática da estabilidade pode ser dividida em quatro partes: análise paramétrica da carga crítica, análise do caminho pós-crítico e de sua estabilidade, estudo das conseqüências de afrouxamento e rompimento dos estais no comportamento da estrutura, e investigação da sensibilidade a imperfeições iniciais, considerando-se imperfeições de carga e geometria.

Na análise dinâmica, primeiramente apresenta-se uma análise paramétrica das freqüências naturais da estrutura em função dos diversos parâmetros físicos e geométricos, incluindo o carregamento. A seguir, tendo por base os resultados da análise estática, descreve-se como a não-linearidade pode afetar o comportamento dinâmico da estrutura. Esta análise é feita no domínio do tempo através da integração numérica das equações não-lineares de movimento.

### **1.1. Motivação**

A motivação para se estudar torres estaiadas é a sua crescente utilização em tele-comunicações, coberturas e em estruturas off-shore.

### **1.2. Objetivos**

Este trabalho faz parte da linha de pesquisa em Instabilidade e Dinâmica das Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, cabe ressaltar que este é o primeiro trabalho desenvolvido nesta área específica dentro desta linha de pesquisa e que o mesmo servirá de base para trabalhos futuros sobre o comportamento não-linear de torres estaiadas.

Por ser o primeiro trabalho, o objetivo é abordar alguns aspectos gerais da análise da estabilidade destas estruturas.

### **1.3. Organização do trabalho**

O capítulo 2 apresenta a equação da catenária, a formulação para a determinação das forças axiais que agem nas extremidades do cabo e a variação do esforço de tração ao longo do seu comprimento. Alguns aspectos gerais de cabos recomendados para torres estaiadas também são apresentados. O capítulo 3 apresenta a análise estática da estabilidade onde os cabos são modelados como molas com diferentes leis constitutivas, enquanto que no capítulo 4 apresenta-se um estudo da estabilidade de torres, onde os estais são modelados como cabos inextensíveis. O capítulo 5 apresenta a análise dinâmica da torre. Atenção é dada ao estudo paramétrico das frequências naturais e à influência da não-linearidade no comportamento dinâmico da torre em vibração livre ou forçada. Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas algumas conclusões e sugestões para a continuação deste trabalho de pesquisa.