

Introdução

A busca contínua de sistemas estruturais eficientes como solução para grandes vãos tem sido um dos maiores desafios enfrentados por engenheiros estruturais. Por outro lado, sistemas estruturais que utilizam estais têm sido largamente empregados ao longo dos anos na construção civil. Engenheiros e arquitetos adotam estes sistemas por serem leves, maleáveis, resistentes e esteticamente atrativos, como pontes e passarelas estaiadas entre outras grandes obras. Por outro lado, colunas de aço muito esbeltas são incapazes de suportar cargas elevadas já que são controladas pela flambagem global da estrutura. Sendo assim, colunas de aço esbeltas e estaiadas entram no mercado de forma a atender esta demanda. Um bom exemplo destas colunas de aço esbeltas e estaiadas com utilização de protensão ocorreu durante a montagem do palco principal do Rock in Rio III [2] (Figura 1.1). Utilizando um sistema de barras perpendiculares, no formato de cruz, esta solução estrutural faz com que o comprimento efetivo de flambagem da coluna se reduza em pelo menos a metade, através das restrições geradas pelos “braços” que transferem os esforços dos estais para a coluna principal, enquanto sua resistência a flambagem é substancialmente elevada [28][34]. Estes sistemas estruturais são excelentes para situações onde seja necessário suportar cargas a grandes alturas de uma maneira rápida e fácil para reduzir o tempo das construções. Apesar deste tipo de colunas esbeltas e estaiadas já terem sido estudadas analiticamente ao longo dos anos por pesquisadores, elas são ainda pouco empregadas na construção civil.

A presente tese apresenta um estudo do comportamento estrutural de colunas de aço estaiadas e protendidas com um sistema de restrição por barras em formato de cruz, considerando uma extensiva análise experimental com variação do nível de protensão e da rigidez dos estais. Será apresentado um estudo paramétrico através da análise numérica empregando a inteligência computacional de maneira a otimizar este processo. Também será apresentado um estudo do comportamento dinâmico através de análises modais e transientes.



Figura 1.1 Utilização de colunas de aço estaiada e protendida durante a montagem do Palco Mundo do Rock in Rio III.

1.1

Motivação

Na terceira edição do evento Rock in Rio, realizado em janeiro de 2001, foi construído um dos maiores palcos já produzidos no Brasil. Nele foram apresentados cento e trinta e quatro conjuntos musicais, em quarenta horas de shows que foram transmitidos para diversos países do mundo, com um total estimado de mais um bilhão de telespectadores em todo o mundo [2].

Na cobertura do palco, com quarenta metros de altura, noventa metros de diâmetro e oitenta e oito metros de boca de cena foram consumidos cerca de cento e vinte toneladas de aço e trinta e três quilômetros de lona sintética laminada (Figura 1.2). Assim sendo, a sua montagem representou um grande desafio para o pessoal envolvido devido à complexidade, número de peças, dimensões e restrições do prazo da obra. Com o objetivo principal de resolver estes problemas de velocidade de construção e prazo na entrega da obra foi utilizado um sistema estrutural, até onde se sabe, inovador de suporte temporário: uma coluna de aço estaiada e protendida (Figura 1.3) para a estrutura espacial de modo a liberar o uso dos equipamentos de içamento que,

em determinadas ocasiões, totalizaram mais de seis guias e guindastes utilizados simultaneamente na montagem da estrutura do palco principal, onde a concepção, o projeto estrutural, o sistema construtivo e de montagem do palco principal foi inteiramente realizada pelo Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade.



Figura 1.2 Palco Mundo na fase final da construção– Evento Rock in Rio III.



Figura 1.3 Coluna de aço estaiada utilizada como suporte temporário durante a construção do palco mundo no evento Rock in Rio III.

Além dos carregamentos usuais devido ao peso próprio e cargas de vento foi considerada, ainda, uma sobrecarga de 600 kN referente aos esforços dos sistemas de som, luz, três telões, cabos e fios elétricos, serviços, câmeras, etc. As cargas devidas ao vento e ao peso da lona sintética laminada foram da ordem de 1 kN/m², o que foi conseguido devido ao efeito benéfico de se ter criado uma abertura na lona na parte posterior do palco para a passagem do vento.

Foram elaborados dois modelos de coluna de aço estaiada: uma para suportar cargas de 200 kN e outra para suportar cargas de 90 kN. Ambos os modelos eram construídos de tubos de aço com 29 m de altura em aço ASTM A-500.

Para o modelo com capacidade de 200 kN o diâmetro externo do tubo era de 219 mm com espessura de 4,75 mm e para o modelo com carga de 90 kN o diâmetro externo era de 165 mm com espessura de 3,75 mm. Os tubos secundários tinham um comprimento de 1,5 m, fornecendo uma inclinação dos tirantes de protensão de 10%, baseado nos estudos de Belenya [4]. Estes tubos secundários tinham um diâmetro externo de 88 mm com 3 mm de espessura (Figura 1.4).



Figura 1.4 Estais, tubos transversais e cantoneiras de reforço.

Para o estaiamento da coluna foram utilizadas barras redondas de aço ASTM A-36 com 19 mm de diâmetro externo. A protensão aplicada nos estais foi

da ordem de 36% da carga de serviço da coluna, ou seja, 72 kN em cada estai. O controle de aplicação da protensão foi realizado com um sistema em que ao se girar a porca se aferia o número de fios de rosca necessários para induzir a carga necessária. Um sistema de cabos secundários foi utilizado entre os tubos transversais para compensar qualquer instabilidade a torção proveniente de imperfeições, da diferença de força nos estais e compensar qualquer excentricidade gerada nas etapas de transporte e montagem da estrutura. As colunas com maior capacidade de carga utilizaram cantoneiras de 51 mm de aba com 4,7 mm de espessura para reforço (Figura 1.4).

A utilização dos andaimes em forma de torres (Figura 1.5) se tornou um empecilho durante a montagem do palco, devido aos estais que estabilizavam o sistema ocuparem um espaço na obra relativamente grande impossibilitando o avanço das frentes de montagem. Em muitos casos, estes tirantes eram removidos para possibilitar a circulação de equipamentos e estrutura, podendo causar acidentes por perda de estabilidade dos andaimes. Sendo este um dos motivos da sua substituição por um sistema inovador mais compacto. A partir desta fase da obra, as torres de andaimes não foram mais utilizadas dando lugar às colunas de aços estaiadas.



Figura 1.5 Coluna estaiada versus andaimes.

Uma das versatilidades desse tipo de sistema estrutural está na hora de se retirar da estrutura já pronta, o escoramento. A seguir, a sequência de fotos (Figura 1.6) apresenta como foi realizado esse procedimento. Todo processo não demorou mais que quinze minutos. O guindaste chegou a uma altura de mais ou menos 80 m para retirar a coluna por cima da estrutura do Palco Mundo.

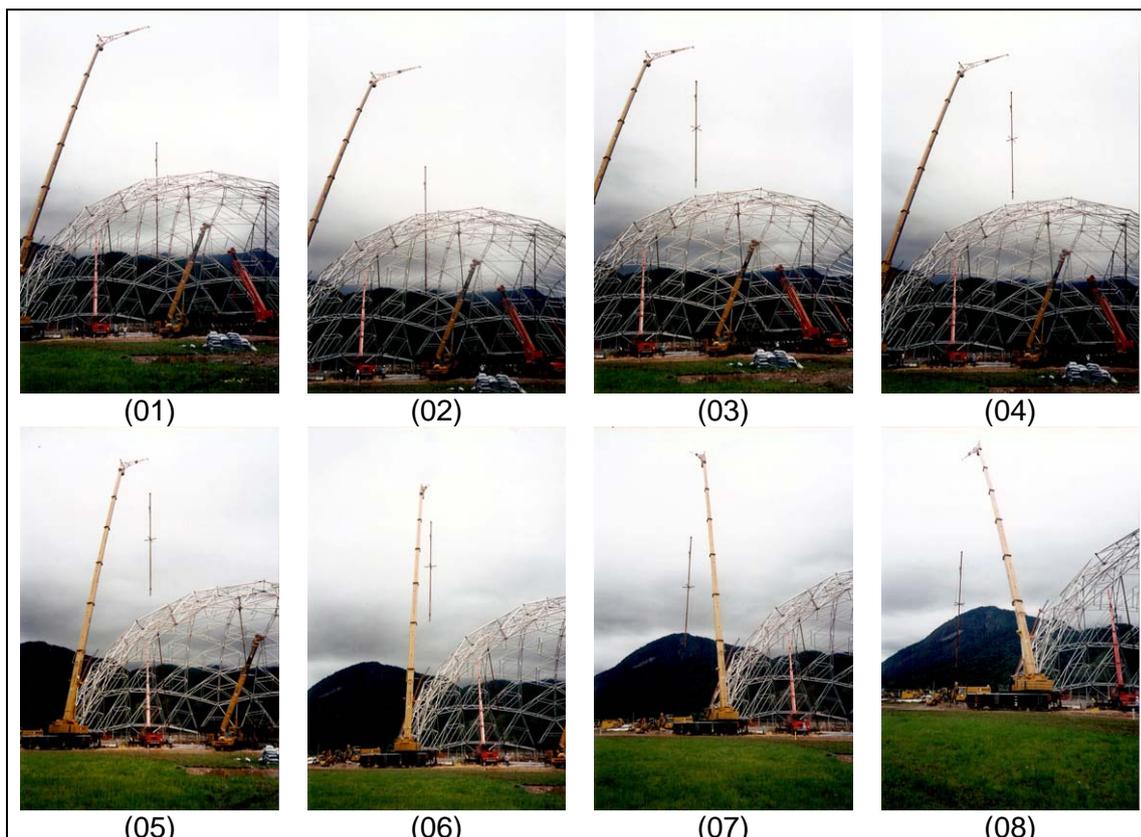


Figura 1.6 Sequência de retirada da coluna de aço estaiada.

Como pôde ser visto, a utilização desse inovador sistema estrutural temporário, com colunas de aço estaiadas, foi de suma importância para que a montagem do Palco Mundo do Rock in Rio III ocorresse rápida e eficazmente. Estes elementos estruturais são excelentes sistemas para situações onde se precisa suportar cargas a grandes alturas com rapidez em sua montagem. Por ser um sistema estrutural muito esbelto, isto o torna muito leve quando comparado a outros sistemas convencionais de suporte temporário, como por exemplo, os andaimes. Estes últimos, que a partir de certa altura, necessitam de estais para ancorá-los no solo para garantir sua estabilidade, sendo menos eficientes, com montagem mais lenta e com maior custo, como pode ser visto na Figura 1.5.

E continuando o trabalho iniciado em 2003 [1], esta tese vem acrescentar o estudo com a complementação de novos resultados experimentais utilizando um novo processo na obtenção dos esforços nos estais e melhorando o antigo sistema de aplicação de carga na coluna. Assim como a utilização da inteligência computacional vem enriquecer o estudo paramétrico e ampliar os resultados sem o estresse de uma análise computacional massiva. As análises dinâmicas vêm de modo a complementar o estudo do comportamento estrutural destas colunas de aço estaiadas e esbeltas. Tanto a utilização da inteligência computacional, o estudo dinâmico e a realização de ensaios em escala real em três dimensões das colunas de aço estaiadas e protendidas são, até onde se tem conhecimento, inéditas, tornando este um dos mais completos estudos dentro desta área de estabilidade estrutural.

1.2

Objetivos

A tese tem como objetivo principal estudar e avaliar o comportamento estrutural de colunas de aço estaiadas e protendidas, aperfeiçoando o trabalho iniciado em 2003 [1] com, entre outros aspectos, a realização de ensaios no laboratório com três colunas de doze metros com aplicação de diferentes níveis de protensão e de rigidez dos estais. Também objetivou-se melhorar a análise paramétrica com novos dados obtidos pela análise numérica e otimizando o processo com a utilização da inteligência computacional com base em redes neurais. Aperfeiçoar o processo de medição dos esforços nos estais durante a aplicação do carregamento e também o sistema de aplicação de carga foi uma consequência devida desta investigação. Por fim, objetivou-se estudar o comportamento dinâmico através da análise modal e da análise transiente com aplicação de carga súbita na extremidade superior da coluna modelada no software de elementos finitos ANSYS [17].

Por outro lado, o principal objetivo deste sistema estrutural, que são as colunas de aço estaiadas e protendidas, é a redução do comprimento de flambagem da mesma, que através dos esforços produzidos pelos estais e transmitidos pelos braços para a coluna gera uma restrição ao deslocamento neste ponto reduzindo em até 50% o comprimento de flambagem e elevando substancialmente a sua resistência. Esse tipo de sistema estrutural permite que

colunas bastante esbeltas possam ser empregadas na construção civil tradicional de edificações e em outros casos como em estruturas espaciais, mastros de navios e torres de transmissão e telecomunicação.

A presente investigação compreendeu:

- uma visão geral dos estudos analíticos que vem sendo realizados por pesquisadores ao longo dos anos;
- uma melhoria substancial da análise paramétrica iniciada em 2003 [1] adicionando novos dados como diferentes comprimentos e seções transversais tanto para a coluna principal como para os braços e estais, além do número de níveis de protensão em relação a carga de flambagem da coluna sem estais e otimizando com a utilização de projetos de experimentos junto com as redes neurais;
- a melhoria no processo de aplicação e medição dos esforços durante o ensaio de escala real da coluna como, por exemplo, a introdução de células de carga individuais para cada estai;
- a avaliação das deformações, deslocamentos e os modos de flambagem do modelo experimental com comparação geral com modelo por elementos finitos realizado no programa ANSYS [17].
- um estudo do comportamento dinâmico através de análises modais e transientes, sendo esta última com aplicação de carga súbita e alterando o nível de protensão e rigidez dos estais para ambos os casos.

Durante a fase de pesquisa não foi encontrado na atividade técnica um programa experimental executado em três dimensões em proporções reais de utilização de uma coluna estaiada e protendida nem um estudo dinâmico da mesma.

A execução dos experimentos resultou no desenvolvimento de um projeto de obtenção dos esforços nos estais, além do aperfeiçoamento do aparelho de aplicação de carga para um ensaio inovador na horizontal. Este sistema teve que ser aperfeiçoado para corrigir efeitos de peso próprio, engastamento, medição de protensão nos estais e foi junto com a modelagem por elementos finitos e otimização por inteligência computacional algumas das principais contribuições.

1.3

Escopo

A tese está dividida em sete capítulos. Na ordem, estes capítulos são: introdução; referências bibliográficas; programa experimental, resultados experimentais, análise paramétrica e inteligência computacional; análise do comportamento dinâmico e considerações finais.

O capítulo dois é dedicado aos estudos analíticos realizados por pesquisadores ao longo dos anos.

O capítulo três descreve como os ensaios experimentais das três colunas de aço estaiadas são realizados compreendendo os materiais utilizados, assim como um novo sistema de medição de força nos estais; os passos e dificuldades na montagem das três colunas e o sistemas de protensão aplicada.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos dos três ensaios experimentais descritos no capítulo anterior, comparando-os com os resultados obtidos na análise numérica.

Dando continuidade ao trabalho inicializado em 2003 [1], o capítulo cinco vem complementar o estudo adicionando novos resultados na análise paramétrica através da análise numérica com a utilização do software de elementos finitos ANSYS [17]. Deve-se ressaltar que, a inteligência computacional ajudou a prever futuros resultados sem a necessidade de realizar novas análises numéricas.

No capítulo seis é apresentado um estudo do comportamento dinâmico em termos de análises modais e transientes com a aplicação de uma carga súbita no topo da coluna de aço estaiada e protendida.

Por fim, o capítulo sete apresenta as considerações finais, compreendendo as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.