

Considerações finais

A utilização de sistemas protendidos em aço na construção civil vem despertando um interesse cada vez maior devido a sua leveza, velocidade de montagem, capacidade de suporte de carga e economia de material. Estes sistemas são compostos de colunas de aço esbeltas, onde a capacidade de suporte de carga é principalmente controlada pela flambagem global da estrutura e são otimizadas com o uso de sistemas de protensão por estais, transformando-se em uma solução a alguns problemas de engenharia civil muito eficientes. Esta solução estrutural faz com que o comprimento de flambagem da coluna reduza pelo menos a metade enquanto a sua resistência é substancialmente elevada. Como estes sistemas são compostos por colunas muito esbeltas, isto as tornam mais leves que os outros sistemas convencionais de suporte temporário, como por exemplo os andaimes. Estes últimos, que a partir de uma certa altura, necessitam de estais para ancorá-los ao solo e garantir sua estabilidade, abrangendo maior área de atuação, sendo menos eficientes, com montagem mais lenta e com maior custo, sendo esta é apenas uma das possíveis áreas de aplicação das colunas estaiadas.

Portanto, as colunas de aço estaiadas e protendidas entram no mercado de forma a atender esta demanda, onde esta inovação foi utilizada pela primeira vez no Brasil durante a construção do Palco Mundo do Rock in Rio III [2] comprovando a sua eficiência e custo-benefício. Estes sistemas estruturais ainda admitem várias configurações geométricas diferentes da apresentada nesta tese, podendo ser projetada para diversos níveis de carga e comprimentos de forma a atender com economia e segurança às diversas situações dentro da engenharia estrutural.

A presente tese compreendeu uma investigação abrangente do comportamento estrutural de colunas de aço estaiadas e protendidas com um sistema de restrição por barras em formato de cruz. O estudo compreendeu uma análise experimental no laboratório de estrutura e materiais da PUC-Rio, onde foram variados os níveis de protensão e de rigidez dos estais. Também foi apresentado um extensivo estudo paramétrico através da análise numérica empregando a inteligência computacional de maneira a otimizar o processo de obtenção da carga última da coluna de aço estaiada e protendida a investigação

também englobou uma avaliação do comportamento dinâmico através de análises modais e transientes. Uma melhoria no processo de aplicação e medição dos esforços foi realizada com sucesso durante os ensaios, assim como a avaliação dos deslocamentos, deformações e modos de flambagem.

7.1

Conclusões

Neste estudo foi considerada uma coluna estaiada com doze metros de comprimento, onde, através de ensaios em laboratório comprovou-se a eficiência do sistema estrutural, dado que ao se introduzir estais na coluna conseguiu-se atingir um acréscimo de resistência de pelo menos 100% da sua carga de flambagem. Ao se adicionar protensão nos estais, esta resistência aumenta substancialmente chegando a ordem de trezentos por cento da sua carga de flambagem.

Para a primeira coluna ensaiada, a simples utilização dos estais, com protensão suficiente para tirar a folga dos cabos de aço, fez com que a carga máxima conseguida durante o ensaio atingisse 15,64 kN para o “modo x” e 17,46 kN para o “modo +” aumentando em aproximadamente 40% em relação ao ensaio da coluna sem estais, onde a sua resistência era de aproximadamente 10,97 kN (esbeltez $\lambda = 400$). Nesta primeira coluna chegou-se ao limite de 35,76 kN para a protensão de 2,33 kN em cada estai, significando um aumento de 327% acima da carga de flambagem da coluna sem estais no “modo x”. No “modo +” a coluna atingiu o valor de 32,48 kN, significando um aumento de 297%. Esta primeira coluna teve como característica de deformação o primeiro modo de flambagem global da estrutura já que o maior deslocamento ocorreu no centro do vão da coluna.

Uma segunda coluna de aço estaiada com as configurações similares a primeira coluna foi ensaiada no laboratório. Esta estratégia foi usada de forma a replicar e comparar os resultados de ambos os ensaios. Nesse ensaio, assim como no primeiro, variou-se o nível de protensão nos estais. O ensaio realizado com uma carga de protensão de 0,3 kN em cada estai com o objetivo de retirar a folga dos estais e mantê-los simplesmente esticados sem maiores influências na coluna principal obteve uma carga última de 15,26 kN para o “modo x” e 15,99 kN para o “modo +”, ou seja, cerca de 60% a mais que no ensaio sem estais para ambos os modos. O limite atingido para esta segunda coluna foi de 23,73

kN para o “modo x” e de 26,13 kN para o “modo +”, ou seja, 247% para o “modo x” e 271% para o “modo +”. O maior deslocamento para esta coluna variou conforme ia se aumentando o nível de protensão. Até, aproximadamente, o nível de protensão de 1,3 kN a segunda coluna comporta-se com deformação característica o primeiro modo de flambagem. Após este nível de protensão a coluna passou a deformar conforme o segundo modo de flambagem. O que ocasionou a diminuição da resistência à flambagem da segunda coluna em relação a primeira.

Para a terceira coluna ensaiada no laboratório além de variar o nível de protensão nos estais, alterou-se a rigidez trocando o material de cabo para barras de aço (vergalhão), mas mantendo o mesmo diâmetro de 6,3 mm. Com isso conseguiu-se uma resistência inicial apenas retirando a folga dos estais da ordem de 20,94 kN para a protensão de 0,3 kN em cada estai no “modo x” e de 32,14 kN para a protensão de 0,5 kN em cada estai no “modo +”. Como a rigidez são maiores, teve-se dificuldade em aplicar uma protensão suficiente para retirada da folga, pois cada torque aplicado no distorcedor gerava um valor de protensão elevado gerando essa pequena diferença inicial de protensão entre os modos. Porém, para os níveis altos de protensão foi mais fácil de aproximar os mesmos níveis para ambos os modos. O limite atingido para esta terceira coluna foi de 33,5 kN para a protensão de 2,28 kN em cada estai no “modo x” e de 34,04 kN para a protensão de 0,76 kN em cada estai para o “modo +”, sendo que nesta terceira coluna observa-se um patamar na ordem de 33 kN em média entre os níveis de protensão de 0,7 kN à 3,0 kN em cada estai. Sendo assim, para esta terceira coluna o aumento da resistência foi da ordem de 293% para o “modo x” e de 298% para o “modo +”. Esta terceira coluna teve como característica de deformação o segundo modo de flambagem global da estrutura em todos os ensaios realizados.

Para os níveis de rigidez axial dos estais estudados, tanto no modelo numérico quanto nos ensaios, pôde-se concluir que quanto maior for a imperfeição inicial na coluna de aço, menor é o efeito que a protensão exerce na carga crítica. Além da rigidez axial dos estais influenciar o comportamento da coluna de aço estaiada e protendida no modelo numérico, pois com uma rigidez baixa a estrutura comporta-se não-linearmente, enquanto que aumentando esta rigidez o comportamento passa a ser linear. Ressalta-se que durante os ensaios a coluna ensaiada usando barras (rigidez axial alta) como estais atingiu a carga última com um nível de protensão menor que com a coluna com cabos de aço (rigidez axial baixa) como estais.

Também conclui-se que, para esta configuração geométrica de coluna estaiada e protendida com inclinação de 10% nos estais em relação ao centro do vão, uma protensão de aproximadamente 20% da carga de flambagem da coluna sem estais aumenta substancialmente a sua resistência na ordem de 250% à 300% aproximadamente comprovando, assim, a sua eficiência.

Vale ressaltar que em todos os ensaios realizados para as três colunas de aço estaiadas e protendidas não ocorreu nenhum caso de torção e as colunas continuaram mostrando um comportamento associado a uma curva característica de flambagem elástica recuperando-se a geometria inicial após o descarregamento. De essencial importância foi a utilização de células-de-carga especialmente projetadas para medição dos esforços nos estais visto que assim pode-se ter um melhor controle sobre a aplicação da protensão.

A utilização da inteligência computacional foi de suma importância para a ampliação da análise paramétrica de colunas de aço estaiadas e protendidas. Através do projeto de experimentos conseguiu-se chegar a um valor ideal de análises necessárias para abranger globalmente todos os resultados. As redes neurais vieram de modo a otimizar o processo computacional sem a necessidade de realizar novas análises numéricas através do programa de elementos finitos. Sendo assim, com o aumento dos dados reais conseguiu-se encontrar a melhor configuração topológica para as redes neurais, apresentando um erro abaixo da expectativa, somente com a utilização de dados ruidosos, concluindo-se que há uma necessidade de um banco de dados ainda maior para que haja uma boa generalização da rede neural sem a necessidade de utilização de dados ruidosos. Todavia, os presentes resultados mostraram que a rede neural com treinamento bayesiano é uma técnica computacional eficaz para a ampliação das análises paramétricas das colunas de aço estaiadas e protendidas, tornando a criação de novos dados mais rápidos e mais simples de serem realizados, diminuindo o tempo de simulações que nem sempre convergem com facilidade.

Ao longo da investigação do modelo dinâmico em relação à análise modal do sistema estrutural, observou-se que a modelagem computacional possui influência significativa na resposta dinâmica das colunas, principalmente, no tocante aos estais (elementos finitos de cabo e de viga espacial). Os valores das frequências naturais apresentam uma variação substancial, de acordo com a modelagem dos estais. Por outro lado, as configurações dos modos de vibração praticamente não são alteradas, a partir da sua modelagem. A protensão nos estais influencia diretamente nos valores das frequências naturais dos modelos,

pois no caso dos estais simulados como elementos de viga espaciais, quando estes são submetidos a esforços de compressão as frequências crescem e em caso contrário (tração nos estais), as frequências diminuem. As principais variáveis do estudo paramétrico foram as características geométricas do material utilizado (cabo ou barra) e o nível de protensão aplicado. Estas duas variáveis alteram substancialmente a resposta dinâmica e provam ser elementos chave para um melhor entendimento da resposta dinâmica do sistema estrutural.

7.2

Principais contribuições

De forma sucinta as principais contribuições desta tese foram:

- A execução pioneira de um ensaio tri-dimensional de colunas de aço estaiadas e protendidas bi-rotulado.
- Destaca-se que foi a primeira vez em que se realizou ensaios tri-dimensionais utilizando cabos de aço e/ou barras (vergalhões) como estais com vários níveis de protensão.
- Desenvolveu-se células-de-carga especialmente criadas para medição dos esforços nos estais e utilizou-se um sistema de apoio rolante no centro do vão da coluna de modo a compensar o peso-próprio da coluna de aço estaiada.
- Uma análise paramétrica foi executada com o método dos elementos finitos e, até onde o autor deste trabalho tem conhecimento, inédito para este sistema estaiado tridimensional.
- Destaca-se também uma investigação inédita usando projeto de experimentos em colunas de aço estaiadas e protendidas de maneira a minimizar as análises numéricas e que se utilizou a inteligência computacional através das redes neurais bayesianas de forma a otimizar e prever novos resultados sem a necessidade de novas análises numéricas.
- Também vale ressaltar o pionerismo do estudo dinâmico deste sistema envolvendo análises modais e transientes nas colunas de

aço estaiadas e protendidas utilizando o programa de elementos finitos ANSYS.

7.3

Sugestões para Trabalhos Futuros

A principal sugestão futura é a continuação do presente ensaio na área de programa de experimentos com uso de três braços distanciados igualmente entre si no centro do vão ao invés de quatro braços repetindo os ensaios utilizando cabos e barras como estais e com os “modo Y” e “modo Y 90°”.

Também se devem expandir os ensaios de maneira a cobrir novas configurações geométricas dos tubos principais, secundários e estais.

Outros modelos desse tipo de sistema estrutural contendo mais braços em outros pontos da coluna central e variando ou não a inclinação dos estais, com o objetivo de minimizar ainda mais os comprimentos de flambagem.

Sugere-se a realização de um estudo paramétrico com uma imperfeição inicial na coluna principal de modo a gerar um período completo de uma senóide e aperfeiçoar o modelo de redes neurais com a utilização de novos dados reais de forma a melhorar a sua configuração topológica.

Na área do comportamento dinâmico na parte de análise modais sugere-se realizar os testes com novas geometrias e níveis de protensão. E na parte da análise transiente sugere-se utilizar carregamentos senoidais no topo da coluna e também no centro do vão de forma a simular um impacto de guindaste por exemplo.