



## **Verificação de Projetos de Estruturas Estaiadas e a Pesquisa na UFRJ**

**B. Ernani Diaz<sup>1</sup>, Raissa L. S. de Toledo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Escola Politécnica-UFRJ/ Departamento de Estruturas / ernani.diaz@gmail.com

<sup>2</sup>Atmen Engenharia / Departamento Técnico / raissalst@gmail.com

### **Resumo**

Deve-se ser inicialmente comentado que o projeto e a construção de obras estaiadas já atingiu no Brasil um estágio muito avançado. Existem atuando no país empresas de projeto estrutural, de fornecimento de materiais especiais e firmas de construção aptas a desenvolver e construir projetos altamente complexos de forma totalmente satisfatória. Em contrapartida foram desenvolvidas teses sobre estas estruturas, apresentadas na Coppe e na Escola Politécnica da UFRJ, que acompanham o desenvolvimento das técnicas específicas deste tipo de projeto. Paralelamente, estes projetos exigem uma verificação cuidadosa, cujas características podem ser comentadas, pois uma verificação independente de estruturas sofisticadas tem se mostrado necessária em todos os países desenvolvidos do mundo. As estruturas estaiadas exigem nos seus projetos um grau de sofisticação e de arrojo nunca antes atingido em projetos de estruturas de pontes no Brasil. Apresentam-se aqui as características de algumas obras importantes projetadas e executadas nestes últimos anos. Paralelamente foram desenvolvidas várias teses na UFRJ sobre a análise e a construção de obras estaiadas importantes. Todo este desenvolvimento não teria sido possível sem uma coletânea de ferramentas de análise e de desenho, atuando tanto no projeto como na construção. As análises envolvem várias facetas do projeto, tais como análise das fases construtivas, definição das forças a serem instaladas durante a montagem, o desenvolvimento dos efeitos reológicos do concreto em função do tempo, análises específicas para análise de fases especiais de construção, etc. Características necessárias para as ancoragens e a sua qualificação de acordo com regulamentos internacionais são também comentados. Várias obras de projetistas importantes foram analisadas e comentadas. Embora não seja possível analisar as obras recentemente construídas no Brasil como um todo, o elenco de obras examinadas pode aquilatar o nível técnico alcançado por uma amostragem reduzida. As obras comentadas foram essencialmente construídas nas cidades do Rio de Janeiro e de São José dos Campos.

### **Palavras-chave**

Pontes; Concreto protendido; Estais; Estruturas estaiadas; Verificação de estruturas.

### **Introdução**

Este artigo trata de verificações de obras estaiadas aplicando intensamente o computador por meio da técnica que se designa de Avaliação Computacional de Estruturas. A primeira aplicação desta técnica no Brasil no âmbito profissional remonta ao ano de 1968, com o projeto da Ponte Rio Niterói.

Há uma grande diferença em desenvolver a difícil arte de projetar e a posterior verificação do projeto. Na preparação do projeto há dificuldades de definição da estrutura, da interação com o construtor, da avaliação rápida de esforços, do detalhamento da geometria da obra e da preparação de desenhos de armadura. Na verificação, o projeto está basicamente pronto e a preparação de modelos pode ser feita de forma muito detalhada para facilitar posteriormente a determinação de esforços e o dimensionamento. Mas o importante é que, atualmente, diversos problemas de estruturas podem ser agora avaliados computacionalmente de forma relativamente rápida por meio da Avaliação Computacional de Estruturas, com auxílio de programas robustos de análise e dimensionamento. Os seguintes problemas atuais podem ser agora analisados:

- 1.- Geração interativa automática da geometria de modelos computacionais
- 2.- Avaliação rápida dos esforços em geral em computadores potentes
- 3.- Avaliação de esforços de cargas móveis

- 4.- Determinação de esforços em elementos de barras, placas e sólidos
  - 5.- Modelagem geométrica dos cabos de protensão de forma independente da geometria do modelo
  - 6.- Combinação e dimensionamento dos mais variados tipos de ações
  - 7.- Realização de análises não lineares geométricas com grandes deslocamentos
  - 8.- Estudo de fases construtivas
  - 9.- Determinação numérica de efeitos reológicos
  - 10.- Determinação de cargas críticas elásticas de flambagem
  - 11.- Análise dinâmica no histórico do tempo (abandonando a técnica ultrapassada de análise modal)
- É evidente que falta de forma corriqueira a possibilidade de análise não linear física e geométrica de estruturas em vista da dificuldade da modelagem e da análise que precisa ser efetuada de forma iterativa. Ao longo do artigo alguns destes problemas serão tratados aqui.

### **Comentários gerais sobre obras estaiadas**

Antes de mais nada é interessante assinalar que a publicação mais completa e rica de informações sobre pontes estaiadas é o livro de SVENSSON (2011).

As estruturas estaiadas começaram a ser projetadas e construídas em estruturas de aço. Como sempre ocorre geralmente em estruturas de pontes, as pontes estaiadas de grande vão continuam a ser projetadas em aço, por problemas de peso. O maior vão atual de uma ponte estaiada é o da Ponte Russa, construída com o vão de 1104m, entre a Ilha Russa e a Península de Muravyov-Amursky, ao lado de Vladivostok, na Rússia asiática.

É importante sempre lembrar que o projeto que apresentou pela primeira vez as características atuais das pontes estaiadas modernas de concreto foi o da Ponte de Brotonne, localizada na Alta Normandia, França sobre o rio Seine. Foi projetada e construída pela firma Campenon Bernard, em 1977. Possui o vão livre de 320m.

A primeira ponte estaiada projetada no Brasil foi a ponte do Porto de Alencastro sobre o rio Paranaíba, iniciada na década de 1980 e somente inaugurada em 2003, com projeto da Noronha Engenharia. A primeira ponte estaiada construída no Brasil foi a ponte metroviária da estação Santo Amaro, sobre o Rio Pinheiros na cidade de São Paulo com projeto da Enescil. A ponte estaiada ícone de São Paulo é a ponte Otávio Frias de Oliveira, sobre o Rio Pinheiros, na cidade de São Paulo, com projeto da Enescil. Talvez seja a ponte brasileira de projeto mais sofisticado e arrojado.

Aqui são retratadas, indiretamente, as consequências da experiência de verificação de algumas pontes estaiadas projetadas por engenheiros de renome. Algumas delas foram construídas pela firma Construtora Queiroz Galvão, cuja orientação técnica da construção foi efetuada pelo Eng. Renan Gomes.

Alguns conhecimentos de pontes estaiadas foram obtidos por exame das seguintes obras relacionadas, a seguir, com seus projetistas e construtoras:

- Ponte do Saber sobre o canal do Cunha no Rio de Janeiro, projeto de V. Garambone Fº. C. Queiroz Galvão.
- Ponte D. Eugenio de Araujo Sales no Rio de Janeiro, projeto de Mario DeMiranda, Andrade Gutierrez.
- Ponte metroviária sobre o Canal da Barra no Rio de Janeiro, projeto de V. Garambone Fº. C. Queiroz Galvão.
- Ponte do BRT em viga mista Prefeito Pereira Passos entre as Ilhas do Fundão e do Governador, no Rio de Janeiro, projeto da Enescil por Mauro Lemos de Faria. Consórcio Transcarioca.
- Ponte Arco da Inovação, em São José dos Campos, Projeto de ANTW Engenharia por Mauro Lemos de Faria para a estrutura estaiada. Engetec Construções Montagens.

Os arquitetos que deram assessoria nos projetos foram:

- Ponte do Saber. Arq. Alexandre Chan

Não foi possível obter os nomes dos arquitetos de outras obras.

Mostram-se, a seguir, fotografias das obras tratadas aqui.



**Figura 1 - Ponte do Saber e Ponte D. Eugenio de Araujo Sales.**



**Figura 2 - Ponte Metroviária da Barra e Ponte do BRT na Ilha do Governador.**



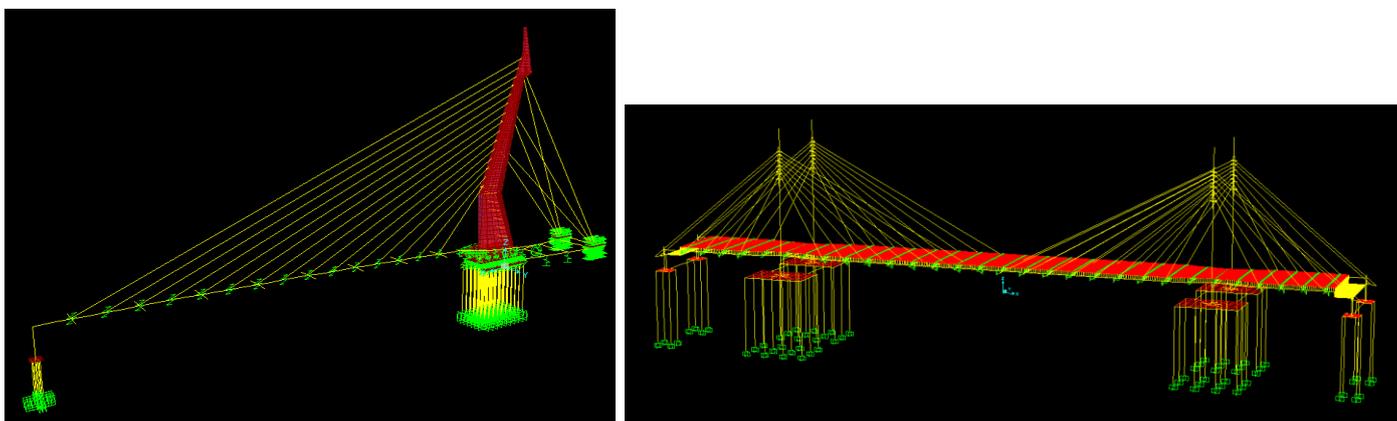
**Figura 3 - Viaduto Arco da Inovação em São Jose dos Campos.**

Com base nestes projetos, várias dissertações e trabalhos acadêmicos de extensão foram preparados por diversos alunos da Coppe e da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. São eles:

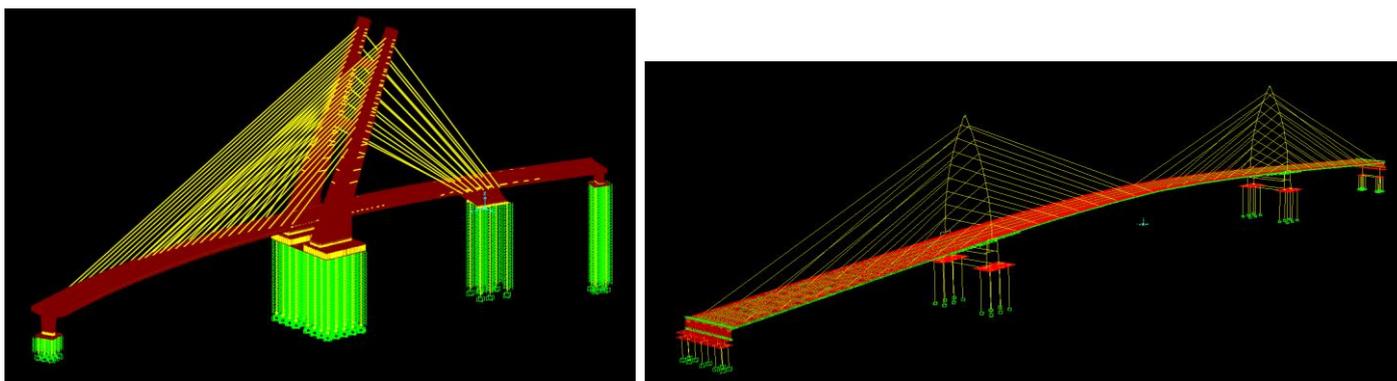
- Renan Ribeiro Setubal Gomes
- Raissa Laubenbacher Sampaio de Toledo
- André Esteves Ferreira de Almeida
- Diego de Faro Cidade
- Adriano Armani da Silva

A verificação destas obras foi efetuada pelos autores deste trabalho.

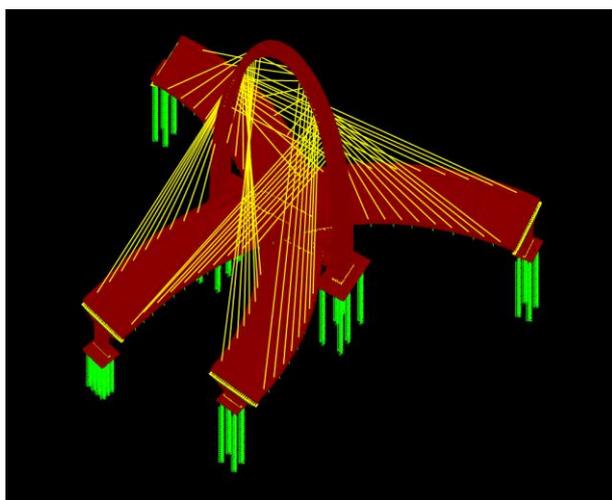
Apresentam-se, adiante, os modelos utilizados na verificação destas estruturas.



**Figura 4 – Modelos da Ponte do Saber e da Ponte D. Eugenio de Araujo Sales.**



**Figura 5 – Modelos da Ponte Metroviária da Barra e da Ponte do BRT na Ilha do Governador.**



**Figura 6 – Modelo do Viaduto Arco da Inovação em São Jose dos Campos.**

### **Projeto, Análise, Desenhos e Tecnologia de Pontes Estaiadas**

Nestes últimos anos o desenvolvimento tecnológico de projeto de pontes foi vertiginoso. As várias tecnologias desenvolvidas nas últimas décadas permitem que estas obras sofisticadas possam ser projetadas com segurança. Os projetistas destas obras precisam atuar com auxílio de programas especializados em alto nível de sofisticação. Aqui serão comentadas as características de desenho e de análise utilizadas na verificação destes projetos, em que foram usados, principalmente, o AutoCad, para o detalhamento das estruturas e o SAP2000+Bridge para a análise e dimensionamento e, evidentemente, outros programas de renome. Comenta-se que na preparação dos diversos projetos executivos aqui tratados foram utilizados outros programas de análise, que geralmente não são explicitados

Como se sabe, sem a possibilidade de definição geométrica digital das complicadas geometrias utilizadas nos projetos não seria possível determinar as características geométricas necessárias à preparação dos modelos de análise. Todo o detalhamento da obra em função de uma geometria geralmente sofisticada depende da definição inicial completa da obra por meio da técnica de CAD.

A determinação de esforços de estruturas estaiadas exige a utilização *sine qua non* de análise não linear geométrica. A razão principal é referente ao comportamento não linear geométricos dos estais. Os dados dos estais precisam levar em conta o peso real dos estais, incluindo as cordoalhas, as graxas, as capas de PEAD e o tubo de envolvimento de PEAD do estai. Ver dados mais completos em TOLEDO, (2014). Estas análises, entretanto, mantêm, geralmente, o comportamento elástico dos materiais empregados (fundações, estruturas de concreto e de aço).

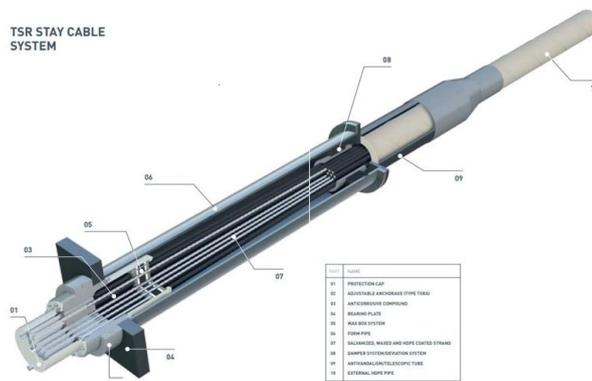
Na fase de projeto, o projetista pode aplicar diversos métodos para a determinação das características dos estais, cujas forças só podem ser determinadas por processamentos iterativos. É usual na fase de definição das estruturas impor deslocamentos nulos verticais para a viga de rigidez, nos pontos de apoio dos estais, e deslocamentos horizontais nulos para alguns pontos dos pilones. Assim, os esforços de flexão na viga de rigidez e nos pilones são reduzidos. Este procedimento iterativo pode ser executado diretamente pelos programas de análise atuais. No SAP2000 este procedimento é designado de CSILoadOptmizer. (ver CSI, 2011) É conveniente impor N condições referentes a deslocamentos da estrutura associados a N fatores incógnitas de pré alongamentos “unitários” dos estais (usualmente tomados iguais a deformação de 0.001). Isto é assim para evitar fornecer dados adicionais sofisticados para a solução do problema. Em TOLEDO (2014) é mostrado o problema matemático envolvido que exige a definição de uma matriz de influência, as condições impostas ao problema e a solução do sistema de equações. A praxe é deixar uma certa folga no dimensionamento para prever variações das forças finais durante o desenvolvimento do projeto, assim como discrepâncias usuais das forças previstas nos estais depois da construção.

Os estais empregados no Brasil são constituídos por cordoalhas de 7 fios galvanizadas, engraxadas e recobertas por capas de PEAD (Polietileno de alta densidade) de diâmetro 15.7mm CP-190 com carga de ruptura característica de 279kN e área mínima de 1.47cm<sup>2</sup> (ver ARCELORMITTAL, 2019). A resistência à fadiga é dominante no dimensionamento dos estais e os ensaios de qualificação das ancoragens dos estais são baseados em parâmetros definidos em documentos internacionais. Os ensaios à fadiga são feitos com a tensão máxima de 0.45 da força de ruptura, a variação de tensão do ensaio é de 200MPa, o erro angular da instalação da ancoragem é de 10mrad e o número de ciclos é  $2 \times 10^6$ , como mostrado em FIB (2005).

Ressalta-se que os construtores precisam ter ciência que erros geométricos maiores que 10mrad implicam, em redução da capacidade à fadiga dos estais. Assim, os projetistas precisam fornecer dados geométricos adequados de locação correta de saída dos estais de suas regiões de ancoragens, incluindo o ângulo decorrente da deformada “parabólica” do cabo. O ângulo de 10mrad corresponde a 0.57°. Estes parâmetros foram modificados em FIB (2019). Há diferenças agora de padrões de fadiga em pontes estaiadas e pontes com extradorso (ver FIB, 2019). Nesta publicação (FIB, 2019) são apresentados resultados de fadiga com curvas C-S (Número de ciclos x Variação de tensão) com valores máximos variáveis de tensões. Nota-se que os padrões normativos americanos e europeus são diferentes.

As ancoragens precisam ser qualificadas. No Brasil não existem exigências, em geral, relativas a ancoragens de cabos de protensão, muito menos de ancoragens de estais. As qualificações efetuadas na Europa são aceitas sem discussão. Precisamos criar uma normalização brasileira sobre o assunto. O mais importante no projeto das ancoragens dos estais é manter o paralelismo das cordoalhas no bloco de aço que as ancora. Além disso, precisa haver uma redução do diâmetro externo do bloco de ancoragem para o diâmetro externo do tubo externo de proteção em PEAD. Ver na Figura 7 o esquema do projeto mecânico das ancoragens móveis da TENSACCIAI (2020). Este paralelismo no bloco de ancoragem não ocorre nas ancoragens usuais de concreto protendido. Por isso as ancoragens usuais não podem ser utilizadas em pontes estaiadas e nem nas pontes com extradorso.

Um importante conceito definido nas dissertações desenvolvidas é a definição matemática dos alongamentos dos estais, designados por pré-alongamentos, que correspondem aos alongamentos nos estais para a situação hipotética de não haver deformação nos elementos de concreto para  $t=0$ . Os pré-alongamentos equivalem ao conceito de mesmo nome da teoria de concreto protendido. O programa de análise precisa destes dados para processar o carregamento inicial não linear geométrico da estrutura.



**Figura 7 - Ancoragem móvel de estai da Tensacciai**

Uma informação de projeto liberada pelos projetistas é a força final de protensão depois de aplicados todas as ações atuantes na estrutura para  $t=0$  (sem retração, var. de temperatura e fluência). De novo, é preciso aplicar o procedimento matemático inerente ao CSILoadOptimizer na etapa de verificação. Neste caso específico, as  $N$  condições do problema são as forças fornecidas nos estais e as incógnitas são os fatores sobre os pré-alongamentos unitários dos estais (geralmente adotados com o valor de 0.001).

O processamento inicial do modelo necessita da análise não linear geométrica, que geralmente é executada pelos programas de análise robustos. No SAP2000 este procedimento é designado por análise P-delta (ver CSI KNOWLEDGE BASE, 2020).

Um fator importante da consideração de uma análise não linear é que não é possível adotar linhas de influências para determinação de cargas de tráfego. Entretanto, é possível, com boa aproximação, partir de um caso não linear geométrico e efetuar análises elásticas adicionais com a rigidez determinada na análise não linear geométrica.

### **As características construtivas de pontes estaiadas**

A dissertação de GOMES (2013) apresenta as características importantes construtivas da Ponte do Saber. O projetista de uma obra estaiada precisa ter ciência de como uma obra deste tipo é executada. Os diversos detalhes de construção são apresentados no trabalho. São apresentados dados referentes à montagem dos estais e à sua protensão. A execução desta obra foi efetuada em balanços sucessivos de forma prevista pelo projetista da obra. Uma treliça de aço precisa ser empregada para a construção em balanço. Os projetos destas treliças são preparados por especialistas de construção. Esta especialidade de projetar os equipamentos de construção é muito importante na técnica moderna de construção. Os equipamentos de construção são em algumas obras verdadeiras máquina sofisticadas.

### **A determinação de esforços de dimensionamento para estruturas com um plano central de estais.**

A dissertação de TOLEDO (2014) mostra como se pode determinar esforços de dimensionamento de armaduras longitudinais para a viga de rigidez de estruturas estaiadas com um plano central de estais. Este caso corresponde, por exemplo, ao projeto da Ponte do Saber. Como já relatado, é possível determinar linhas de influência com o próprio programa SAP2000 ou usar a determinação de linhas de influência sem a clássica modificação do sistema estrutural, como mostra DIAZ (1984). As armaduras instaladas no bordo superior (ou inferior) depende de vários esforços para a sua determinação no ELU: Força normal, Momento fletor,  $F$ . Cortante,  $M$ . de Torção (sem contar com os esforços transversais). O efeito da  $F$ . Cortante equivale à decalagem vertical da armadura de flexão e o efeito do  $M$ . de Torção equivale à força de tração longitudinal clássica quando atua o  $M$ . de Torção em peças de concreto armado. Uma combinação linear das linhas de influência permite avaliar a posição do trem tipo crítico. O trabalho de Toledo (2014) apresenta os detalhes desta determinação. Com as posições definidas das cargas móveis, obtidas com auxílio das linhas de influência, pode-se analisar a estrutura posteriormente por meio de análise não linear física com maior precisão. A Ponte do Saber, ao final da construção, precisou receber um contra peso de concreto introduzido na extremidade do balanço executado em aduelas, para que a reação no aparelho de apoio de neoprene tivesse uma reação mínima adequada.

### **A determinação dos esforços de segunda ordem de pilones isolados de pontes estaiadas.**

No projeto da ponte D. Eugenio de Araujo Sales foram projetados 4 pilones isolados numa obra retilínea. Além disso, o projetista dispôs os estais em planos verticais. Com isto, os estais não provocam, numa

primeira análise, esforços transversais para cargas permanentes. Basta que o centroide do pilone se mantenha geometricamente no plano dos estais na fase inicial do projeto. É interessante notar que os momentos de segunda ordem de pilones com estas características não se comportam como pilares, em que as cargas verticais se mantêm de forma conservativa (se mantêm paralelos). As forças “quase verticais” aplicadas pelos estais, decorrentes dos deslocamentos transversais, se inclinam acompanhando os pontos de contacto dos estais com a viga de rigidez. Este comportamento específico permite que se possa projetar pilones isolados sem contraventamentos adicionais transversais. No plano longitudinal os próprios estais servem de contraventamento dos pilones.

A análise para a determinação dos efeitos de segunda ordem, neste caso, pode ser feita pelos programas de análise por meio de análises não lineares geométricas com grandes deslocamentos. Ver, por exemplo, CSI KNOWLEDGE BASE (2020). Se durante o evento com ações no ELU as tensões seccionais no concreto dos pilones se mantiverem razoavelmente elásticas, a análise elástica não linear física pode ser considerada adequada. No caso da necessidade de determinações de comportamento não linear, é necessário efetuar uma análise iterativa em que as rigidezes seccionais do pilone precisam ser corrigidas por programas específicos externos, que tratam da determinação da rigidez nas duas direções horizontais do pilone e uma vertical e efetuar correções em processamentos iterativos com o SAP2000 até a sua estabilização. Ver, por exemplo, a aplicação desta técnica na análise não linear física e geométrica em pontes marítimas com estacas protendidas por CURY, R., FREITAS, L. B., DIAZ, B. E. (2009).

### **O comportamento reológico de vigas de rigidez em viga mista**

A obra da ponte do BRT entre a Ilha do Governador e a ilha do Fundão foi projetada com viga de rigidez em viga mista. A laje de rolamento é em concreto armado. A ponte apresenta uma rótula central na viga de rigidez mista. Este projeto de ponte estaiada tem geometria não simétrica no sentido longitudinal. Além disso, o traçado geométrico está em curva. A geometria, evidentemente, dificulta a análise e o detalhamento das estruturas de aço. É importante notar que o comportamento reológico da viga de rigidez mista é essencialmente diferente do caso das vigas mistas contínuas usuais. O comportamento da viga de rigidez mista está associado, neste caso, a uma força de compressão permanente decorrente da ação das forças longitudinais dos estais. A laje de concreto armado está ligada à viga de aço por meio de conectores e, assim, há uma interação da viga de aço com a laje de concreto. Há necessidade, neste caso, da análise das fases construtivas da estrutura e, concomitantemente, de uma análise reológica com o estudo da retração e da fluência do concreto. É evidente que forças de compressão serão transferidas à estrutura de aço por efeito da retração e da fluência do concreto com o passar do tempo. Esta transferência de forças entre a laje de concreto e a viga de aço provoca, com o tempo, uma modificação geral dos esforços nos estais, que precisa ser avaliada. Um fato que precisa ser sempre lembrado em pontes estaiadas de concreto é que a geometria geral da estrutura, por efeito da retração e fluência (nas fundações, nos pilones, e na viga de rigidez), se modifica e a determinação da variação dos esforços nos estais precisa ser determinada por análise reológica por meio de uma análise cuidadosa. Os programas robustos de análise atuais permitem analisar este comportamento. Os dados reológicos podem ser considerados aqueles definidos no SAP2000 pelos padrões dos Códigos Modelos CEB-FIP de 1990 e FIB de 2010. Estes dados são mais modernos do que aqueles da norma NBR 6118 (2014). A técnica computacional sofisticada introduzida, por exemplo no SAP2000, pode ser vista em CSI KNOWLEDGE BASE (2019).

### **Os procedimentos para determinar as forças a serem aplicadas nos estais na construção**

A dissertação de ALMEIDA (2017) trata do estudo das fases de construção de ponte estaiadas. O pesquisador atuou na verificação da estrutura pela sua consultora, ArtePontes. Assim, estava a parte dos assuntos relevantes da obra.

O programa utilizado no estudo das fases de montagem foi o SAP2000, como já comentado. É interessante comentar algumas características da técnica utilizada, por exemplo, pelo SAP2000. O modelo precisa ser todo ele definido *ab initio* para ser possível manipular os elementos que serão modificados (acrescentados ou retirados) durante a construção. Um fato importante que requer extrema atenção é que os vínculos externos instituídos com os nós do modelo não podem ser modificados durante o processamento. Por razões matemáticas de manipulação da matriz de rigidez da estrutura, a definição da matriz de rigidez da estrutura de certa forma precisa ser, em parte, mantida. Por isso, isto exige certa experiência na criação do modelo de análise para permitir introduzir todas as etapas construtivas na análise, especialmente aquelas que modificam as condições de apoio. Uma outra técnica é conhecida na literatura como *ghost structure* (estrutura

fantasma). Esta estrutura fantasma no SAP2000 é designada de *Guide Structure*. Esta estrutura fantasma é criada automaticamente com elementos de rigidez muito pequena. Durante o avanço das etapas de construção as características dos elementos da estrutura fantasma vão sendo modificadas de acordo com a sequência de construção. A suposição que se faz, a confirmar, é que o programa de análise mantém a matriz de rigidez com a sua geometria básica intacta, sendo modificadas somente as rigidezes dos elementos. O artigo ALMEIDA, DIAZ & JUDICE (2017) apresenta um resumo da dissertação ALMEIDA (2017), onde as forças iniciais de construção dos estais são determinadas. A técnica envolve o estudo das seguintes etapas:

a.- Por processo iterativo computacional, como explicado acima, define-se o estado de tensões na estrutura com as forças de projeto fornecidas pelo projetista principal.

b.- A ponte é desmontada paulatinamente e, em cada fase, as forças resultantes nos estais são calculadas imediatamente antes de sua retirada da estrutura. Estas são as forças a serem introduzidas na construção.

c.- A seguir, como verificação final, a ponte é de novo montada com as forças calculadas para verificar se, ao final, as forças de projeto são de novo obtidas.

Na dissertação ALMEIDA (2017) as etapas de construção são descritas com precisão. Trata-se de uma construção padrão de uma ponte estaiada com três vãos. A construção começa a partir dos 4 pilones ao mesmo tempo em balanços sucessivos. Para eliminar esforços indesejáveis na base dos 4 pilones por retração e fluência, o projetista impôs um deslocamento imposto no centro da ponte para compensar as deformações impostas na viga de rigidez pela retração e fluência do concreto com o tempo. Nas duas extremidades da ponte o projetista uniu a viga de rigidez às fundações, que atuam assim, como contra-pesos.

#### **A consideração dos efeitos reológicos durante a montagem da estrutura.**

A dissertação do aluno CIDADE (2017) trata do problema da consideração dos efeitos reológicos de um modelo computacional da Ponte do Saber. Esta estrutura possui um esquema de montagem simples, pois a estrutura estaiada só tem uma frente de montagem, como mostra a Figura 1. A técnica segue, em essência, o já descrito no item anterior. Um comentário importante, neste caso, é que a consideração da fluência não pode ser imposta na desmontagem da ponte de forma precisa. Isto é, não se consegue, computacionalmente, tratar a retração e a fluência de forma retroativa. Como as forças determinadas na desmontagem da ponte não levaram em conta a retração e a fluência, a montagem da ponte com base nos esforços iniciais fornecidos pelo projetista não induz a formação de forças nos estais iguais às forças definidas pelo projetista, porque desta vez a retração e a fluência foram levadas em conta. O problema assim é de difícil solução computacional. Pode-se, de forma iterativa, tentar manualmente corrigir as forças iniciais para que as forças finais ao fim da montagem sejam aquelas definidas pelo projetista. Como todo o processamento está automatizado, é possível, iterativamente, obter forças a serem introduzidas na montagem de forma que os esforços, obtidos depois da montagem final (em que os efeitos de retração e fluência foram levados em conta), sejam aqueles definidos no projeto oficial. O artigo CIDADE, D. F., DIAZ, B. E., JUDICE, F. M. (2018) trata deste problema com maiores detalhes.

#### **A determinação de forças iniciais de construção dos estais em estruturas de construção especial.**

A ponte metroviária da Barra foi montada a partir dos pilones inclinados em balanços sucessivos. Entretanto, por questão de prazo, o construtor construiu um trecho avançado em escoramento, que ficou em espera, para ser unido ao balanço em construção. As forças, neste caso, a serem aplicadas nos estais implicam em processamento sofisticado de determinação dos dados de construção. No caso desta estrutura em especial há também a dificuldade de que é necessário determinar as forças em todos os estais, já que a estrutura está em curva. Nas pontes tratadas até aqui o estudo da execução dos balanços sucessivos não introduz nenhuma ação especial de manipulação do modelo de análise, pois a execução dos balanços é efetuada livre de vínculos adicionais. Para tratar da análise dos esforços de construção e das forças nos estais neste caso especial, há necessidade de considerar a interação da estrutura durante a montagem com o comportamento elástico do escoramento. Isto significa que o escoramento deve ser levado em conta na análise. Isto é, na fase de união do balanço em construção com o trecho concretado sobre o escoramento, a análise se complica bastante. Como as forças nos estais não podem variar muito em relação ao que foi estabelecido como forças finais dos estais anteriormente, a análise de estudo da montagem, para obter estas forças pré-definidas, necessita de um processamento bem mais complexo. Este processamento foi efetuado com sucesso pelo projetista da obra.

## **Os assuntos tratados na análise da estrutura do Arco de Inovação.**

A estrutura estaiada projetada para o viaduto do Arco da Inovação em São José dos Campos, em vista de suas particularidades, evidenciou a sofisticação atualmente disponível em projetos de estruturas estaiadas. A estrutura apresenta dois ramos de vias superpostas suportadas por um pilone com dois pilares e uma superestrutura do pilone em arco. Pede-se examinar a Figura 3. A estrutura exigiu o estudo das etapas de construção em que os dois ramos superpostos ficaram sobre escoramentos até a protensão dos estais em sequência e a união final aos 4 pilares de extremidade. Este projeto mostra o nível de dificuldade atualmente existente em projetos de estruturas. Cada vez mais os projetos ficam mais sofisticados, exigindo uma atuação da Avaliação Computacional da Estrutura de forma cada vez mais trabalhosa e sofisticada. No caso desta estrutura a modelagem exigiu uma definição mais detalhada entre o modelo geométrico e o modelo computacional, em vista das relações geométricas entre as definições rodoviárias das vias, as definições geométricas do pilone, das vigas de bordo das duas vias e das suas lajes. A estrutura tem semelhança com a ponte Otávio Frias de Oliveira sobre o Rio Pinheiros na cidade de São Paulo.

Para dar estabilidade à estrutura durante a construção, ficou definido que a estrutura se manteria sobre escoramento até a união monolítica com os 4 pilares de extremidade da obra. Os 4 viadutos adicionais de acesso à estrutura estaiada estão estruturalmente separados da estrutura estaiada com as suas duas vias. As fases construtivas, neste caso, são totalmente diferentes daquelas já tratadas aqui. Os estudos das fases de construção exigiram a introdução de molas adicionais ao modelo, representando a rigidez dos escoramentos dos dois trechos curvos da superestrutura. Como há uma união monolítica aos pilares de extremidade com as duas rampas estaiadas, foi necessário efetuar, adicionalmente, um estudo reológico da estrutura, já que as deformações de retração e fluência das 4 rampas a longo prazo implicaram em esforços adicionais reológicos nos 4 pilares (associados às suas fundações) de extremidades da estrutura.

Uma curiosidade do estudo reológico final foi que ele foi efetuado com os valores fornecidos das forças finais (para a situação final de construção logo depois da protensão dos estais). O estudo da interação com o escoramento e da protensão dos estais mostrou que a estrutura se soltou do escoramento e as forças finais não se distanciaram muito das forças dos estais fornecidas inicialmente, para a fase imediatamente depois da construção. Os efeitos reológicos durante a construção só ocorreram durante a fase de protensão dos estais. Esta etapa de protensão dos estais não demorou muito para ser finalizada. Além disso, os trechos se encontravam com um concreto com idades mais maduras. Assim, os efeitos reológicos ficaram, em parte, restringidos.

## **A interação dos procedimentos computacionais com operações especificamente definidas pelo usuário.**

Sabe-se que é possível com o programa Ansys efetuar operações computacionais específicas durante o processamento dos modelos de elementos finitos introduzindo rotinas especificamente preparadas pelos usuários.

Foi feito um estudo embrionário com o VBA (Visual Basic for Applications) do Excel de interação do usuário com tarefas específicas sequenciais de diversos processamentos com o SAP2000 controladas pelo usuário. Este trabalho acadêmico de Trabalho de Conclusão de Curso está apresentado em SILVA (2017). Foram feitos estudos das fases construtivas da Ponte do Saber com esta técnica. As tarefas iterativas de análises não lineares físicas podem ser feitas desta forma.

## **Conclusões**

Foi evidenciado que uma série de trabalhos acadêmicos foi efetuada adicionalmente aos trabalhos de verificação de várias estruturas estaiadas. Estes estudos foram feitos adicionalmente para avaliar problemas não examinados na verificação das estruturas.

As técnicas de análise estão disponíveis e podem ser consultadas facilmente.

Em vista da multiplicidade de assunto estudados, um volume grande de informações pôde ser criado.

Estes estudos mostraram que a Avaliação Computacional de Estruturas chegou a um nível muito elevado no tratamento de estruturas, que é cada vez mais complexo, mostrando o grau de amadurecimento dos projetistas envolvidos naquelas estruturas estudadas.

Entretanto, sem o ferramental disponível para a análise com os programas atualmente disponíveis, não seria possível o projeto destas estruturas.

É evidente que, cada vez mais, os diversos problemas sofisticados estão sendo analisados de forma viável em projetos.

É de se prever que, dentro de algum tempo, as análises não lineares físicas e geométricas poderão ser processadas de forma mais direta sem a necessidade de desvios específicos de uma análise direta. Além disso, a interação solo-estrutura começa a ser introduzida adicionalmente aos programas de análise de estruturas. Pode-se prever que a análise não linear física levando em conta o comportamento do solo fará, cada vez mais, parte da maioria dos programas robustos de análise, como alguns programas já a fazem, associando a modelagem espacial de estruturas de aço e de concreto com a modelagem espacial do solo.

## Referências

- ABNT, Norma NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto- Procedimento, 2014.
- ALMEIDA, A. E. F., Análise de pontes estaiadas com consideração das fases construtivas. Diss. Mestrado, E. Politécnica, UFRJ, 2017.
- ALMEIDA, A. E. F. & DIAZ, B. E., Estudos de montagem de pontes estaiadas com determinação das forças aplicadas nos estais. 59 Congresso Brasileiro do Concreto, 2017.
- ARCELORMITTAL, Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido, arquivo obtido na internet, 2019.
- CEB-FIP, Model Code Design Code, 1990
- CIDADE, D. F., Análise reológica computacional das etapas construtivas de ponte estaiada. Diss. Mestrado, E. Politécnica, UFRJ, 2017.
- CIDADE, D. F., DIAZ, B. E., JUDICE, F. M., Consideração dos efeitos reológicos em pontes estaiadas, CBPE, Rio de Janeiro, 2018
- CSI, Technical Note, CSILoad Optimizer, 2011.
- CSI KNOWLEDGE BASE, P-Delta effect, arquivo obtido na internet, 2020.
- CSI KNOWLEDGE BASE, Staged Construction, arquivo obtido na internet, 2019.
- CURY, R., FREITAS, L. B., DIAZ, B. E., A análise não linear de estruturas de concreto armado para determinação de esforços de 2ª ordem em estruturas de portos, 51º Congr. Bras. Concreto, 2009.
- DIAZ, B. E., Comentários sobre a determinação de linhas de influência pelo método da Rigidez, Revista Estrutura, Junho 1984.
- Diaz, B. E., Conceitos necessários ao dimensionamento de peças lineares de pontes estaiadas, CBPE, Rio de Janeiro, 2012.
- DIAZ, B. E., TOLEDO, R. L. S., Dimensionamento Longitudinal a Força Normal, Flexão, Cortante e Torsão em Vigas de Pontes Estaiadas. 35ª Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2012.
- FIB. Bulletin 30, Acceptance of stay cable systems using prestressing steels, 2005.
- FIB. Bulletin 89, Acceptance of cable systems using prestressing steels, 2019.
- FIB, Model Code for Concrete Structures, 2010.
- GOMES, R. R. S., Aspectos técnicos e construtivos de uma ponte estaiada. Diss. Mestrado, E. Politécnica, UFRJ, 2013.
- SILVA, A. A., Estudo das fases construtivas do vão principal de uma ponte estaiada, Trab. Conclusão Curso, E. Politécnica, UFRJ, 2017.
- SVENSSON, H, Schrägkabelbrücken, 40 Jahre Erfahrung Weltweit, Ernst & Sohn, 2011.
- TENSACCAI, Tensa-Stay-Cables, arquivo obtido na internet, 2020.
- TOLEDO, R. L. S., Dimensionamento de vigas de rigidez de concreto de pontes estaiadas, Diss. Mestrado, Coppe, UFRJ, 2014.